



Aç Kapa Tünel Yöntemi, GAZİRAY Örneği

Cem CEYLAN¹, Nurullah AKBULUT^{*2}, Ali Fırat ÇABALAR³

¹ TCDD Genel Müdürlüğü, Modernizasyon Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

² Federal Waterways Engineering and Research Institute, Karlsruhe, Almanya

³ Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*nurullah.akbulut@baw.de

(Alınış/Received: 25.12.2024, Kabul/Accepted: 24.01.2025, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan ulaşım sistemleri, hızlı nüfus artışı ve sanayileşmeyle birlikte ortaya çıkan birçok problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Gaziantep şehir merkezinde tespit edilen ulaşım sorunlarının çözümü amacıyla, Küçük Sanayi Sitesi ile Organize Sanayi Bölgeleri arasında GAZİRAY projesi hayata geçirilmiştir. Söz konusu projeye ait demiryolu hattı Gaziantep şehir merkezinin kuzey batısından başlayarak güneydoğu istikametine uzanan yaklaşık 25 km'lik bir güzergah boyunca uzanmaktadır. Burada sunulan makalede, km:11+900 ve 16+710 noktaları arasında aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel yapısı başta olmak üzere, tüm güzergah boyunca karşılaşılan zeminler analiz edilmektedir. Güzergah boyunca yapılan 55 adet zemin sondajından elde edilen bilgiler ışığında, inceleme alanına krem renkli kalın tabakalı kireçtaşları (Fırat Formasyonu) ile tebeşirli kireçtaşı ve killi kireçtaşlarından oluşan (Gaziantep Formasyonu) bir jeolojik yapının hakim olduğu, nadiren ise eski alüvyon çökellerinin varlığı tespit edilmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda, alüvyon çökellerindeki en düşük tek eksenli basınç dayanımı 52.7 kPa olarak belirlenirken, Fırat Formasyonu kireçtaşındaki en yüksek basınç dayanımı ise 519.1 kPa olarak tespit edilmiştir. Kireçtaşının doğal birim hacim ağırlığı değerinin 18.90 kN/m³ ile 25.33 kN/m³ arasında değişmekte olduğu, su içeriğinin ise %1.32 ile %5.06 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca RQD değeri alüvyon çökellerinde %0-%5 arasında, kireçtaşında ise %34-%48 arasında bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Gaziantep, Demiryolu, Aç-kapa Tünel, Geoteknik

The Cut-Cover Tunneling Method: A Case Study of GAZİRAY

Abstract: Transportation systems, which are an indispensable part of our daily lives, are faced with many problems that arise with rapid population growth and industrialization. In order to solve the transportation problems available in the Gaziantep city center, the GAZİRAY project was implemented between the Small Size Industrial Site and the Organized Industrial Zones. The railway project extends along a route of approximately 25 km starting from the northwest of the Gaziantep city center and extending to the southeast. In the paper presented here, the characteristics of the soils encountered along the entire route, particularly the tunnel structure constructed by the cut-cover method between km: 11+900 and 16+710 points, are analyzed from a geotechnical point of view. In the light of the information obtained from 55 ground boreholes opened along the route, it was determined that the geological structure consisting of cream-colored thick-bedded limestone (Fırat Formation) and clayey limestone (Gaziantep Formation) dominated the study area, and rarely, the presence of old alluvial deposits was observed. As a result of laboratory studies, the lowest uniaxial compressive strength in alluvial deposits was found to be 52.7 kPa, while the highest compressive strength in Fırat Formation limestone was 519.1 kPa. It was observed that the natural unit volume weight value of limestone varied between 18.90 kN/m³ and 25.33 kN/m³, and the water content varied between 1.32% and 5.06%. In addition, the RQD value was found to be between 0% and 5% for alluvial deposits, and between 34% and 48% for limestone samples.

Keywords: Gaziantep, Railway, Cut-cover Tunnel, Geotechnics

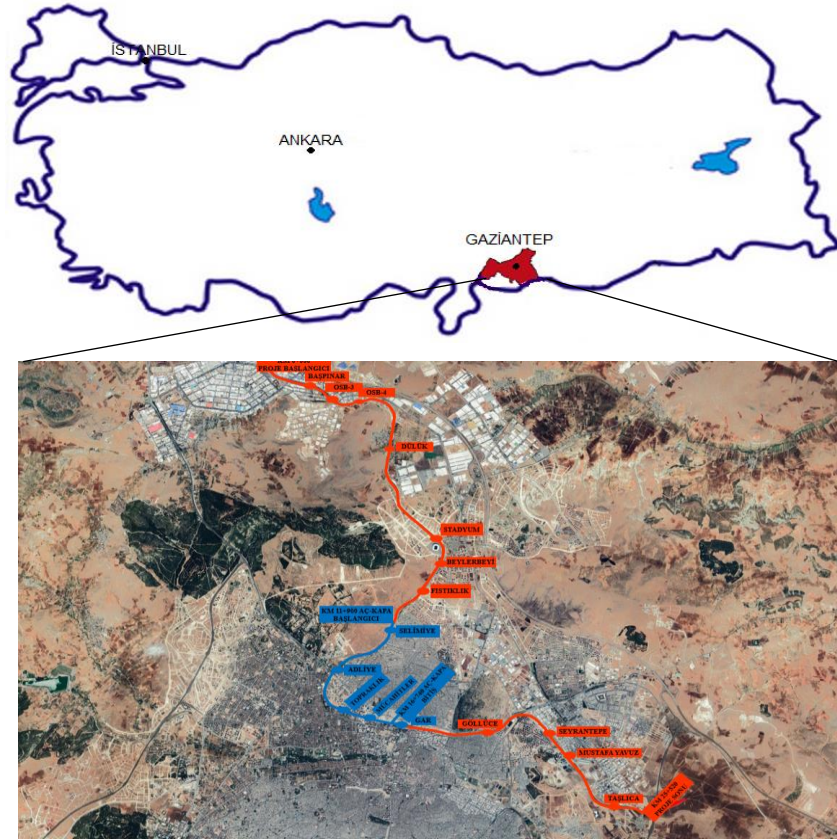
1. Giriş

Hızlı nüfus artışı, yapılaşma, ve sanayileşmenin etkisiyle genişleyen şehir merkezlerinde oluşan ulaşım problemlerinin kalıcı ve çevre dostu çözümü için raylı sistemler tercih edilmektedir [1, 2, 3, 4]. Sanayileşmenin getirdiği üretim ve iç/dış göçten kaynaklı hızlı nüfus artışının yaşandığı şehirlerimizin başında gelen Gaziantep'te sanayi bölgelerine ulaşım uzun yıllardan beri özel halk otobüsleri, minibüsler ve belediye otobüsleri ile çok güç şartlar altında sağlanmakta idi. Şehir merkezinde ortaya çıkan ulaşım sorununun çözümü amacıyla, Gaziantep Büyükşehir Belediyesi ve Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) işbirliğinde, Gaziantep Küçük Sanayi Sitesi (KÜSGET) ile organize sanayi bölgeleri (OSB) arasındaki ulaşımı sağlamak için GAZİRAY projesi hayata geçirilmiştir. Söz konusu proje, mevcut tek hatlı demiryolunun modernize ederek dört hatta çıkarılması, hemzemin geçitlerin kaldırılması, mevcut istasyonların yenilenmesi ve yeni istasyonlar inşa edilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sistem aynı zamanda Mersin- Adana- Osmaniye- Gaziantep yüksek standartlı hızlı tren koridoru boyunca yapılan önemli iyileştirmelerin bir parçası olup demiryolu hattının doğudaki son halkasıdır. Demiryolu güzergahının yerleşim yerlerine çok yakın geçmesi ve demiryolu hattının ileride hızlı tren güzergahı olarak da kullanılacak olması sebebiyle proje tasarım aşamasında bazı önlemler alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu önlemlerin başlıca sebepleri hem gürültüyü engellemek, hem de demiryolu hattının etrafında bulunan yerleşim yeri sakinlerini kazalara karşı korumaktır. Bu bağlamda, projenin özellikle yerleşim yerlerine yakın olan kısımlarının aç-kapa tünel sistemiyle projelendirilmesine karar verilmiştir. Zira, bu tünel yapıları yumuşak/zayıf zemin koşulları, sığ derinlik, ve sınırlı kentsel alanların bulunduğu yerlerde, kutu şeklinde tasarlanarak, kazık grupları ile desteklenen yapılar olup, diğer tünel yapılarına (delme, batırma) kıyasla çok daha ucuz ve pratik bir yapım yöntemine sahiptirler. Burada sunulan makalede, bölgedeki ilk aç-kapa tünel yapısının incelenmesi, bu yapının inşası sırasında karşılaşılan problemlerin analizi, ve geoteknik açıdan zemin yapısının değerlendirilerek, elde edilen birikimlerin araştırmacı ve saha mühendislerinin bilgisine sunulması amaçlanmıştır.

2. Gaziray

2.1. Proje güzergahı

GAZİRAY demiryolu projesi, İstanbul'dan başlayarak Ankara, Konya, Karaman, Adana, ve Mersin üzerinden Gaziantep'e ulaşan hızlı tren demiryolu ağının Gaziantep ili sınırları içerisindeki yaklaşık 25 km'lik kısmı olarak tanımlanmaktadır. Bu güzergahta 2 hat hızlı tren için, 2 hat Banliyö için toplam 4 hat ve 17 istasyon bulunmaktadır. Proje güzergahı Organize Sanayi Sitesi'nin bulunduğu Başpınar İstasyonunda km: 0+000 olarak başlamakta, Kızılcamezra ve Boynuzlukaya tepe etekleri boyunca devam ederek, km: 5+000 civarında Dülük Köyü ve Keber tepe mevkiine uzanmaktadır. Hali hazırda kullanılan devlet demiryolu koridorunu takip ederek devam eden güzergah Beylerbeyi Köyü'nün hemen yanından geçtikten sonra Selimiye Mahallesi üzerinden Şehitkamil Bölgesi'ne ulaşmaktadır. Bu bölgede sırasıyla Özgürlük, Zeytinli, Mücahitler, Budak, Yaprak, ve Yeşilova Mahallesi'ne ulaşan proje güzergahı, Gaziantep İstasyonu üzerinden Güzelyurt, Organize Sanayi Bölgesi ve Acemkaya Tepesi eteklerinden Mustafayavuz İstasyonuna kadar ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra, mevcut devlet demiryolları hattını takip ederek Ardiyeciler sitesinin güneyinden geçip ve Taşlıca köyü yakınlarında km: 25+532'de son bulmaktadır. Proje güzergahını gösteren harita Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. GAZİRAY güzergahı

2.2. Aç-kapa tünel yöntemi

Şekil 1'de görüldüğü gibi, mavi renkle gösterilen güzergah parçası aç-kapa tünel yapısının olduğu kısımdır. Demiryolu güzergahının km:11+900 ve km:16+710 noktaları arasında bulunan yerleşim yerlerinin hemen yanından geçmesi, ve demiryolu hattının ileride hızlı tren güzergahı olarak da kullanılmak üzere planlanmış olması nedeniyle kapalı bir tünel içerisinde geçirilmesi planlanmıştır. Bu kararın alınmasındaki başlıca gerekçeler, güzergah boyunca ortaya çıkacak olan gürültüyü engellemek, ve yakınından geçtiği yerleşim yeri sakinlerini kazalara karşı korumaktır. Yapımı tamamlanan aç-kapa tünel inşasına bazı ait teknik detaylar Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Aç-kapa tünel yapısına ait bazı teknik detaylar

Aç-kapa yapısının güzergâh uzunluğu	4810 m
Platform genişliği	23.50 m
Minimum yatay karp yarıçapı	500 m
Minimum düşey karp yarıçapı	15.000 m
Proje hızı	100 km/s
Maksimum eğim	%1.6
Maksimum dever	90 mm

Aç-kapa tünel inşası öncesi açılan 55 adet sondajdan alınan örnekler vasıtasıyla proje alanındaki zeminlerin jeolojik ve geoteknik değerlendirmesi yapılarak dayanım parametreleri belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında, boyları 14 metre ile 21 metre arasında değişen

7845 adet fore kazık imalatı yapılmıştır. Bu imalatlara ait bazı görüntüler ve güzergah üzerinde inşa edildikleri noktalar, sırasıyla Şekil 2'de ve Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Aç-kapa tünel yapısına ait bazı kazık bilgileri

YERİ	8 ŞUBAT MAHALLESİ		ZEYTİNLİ MAH.		MÜCAHİTLER MAH.		ULUS MAH.		BUDAK MAH.						
	İSTİNAT DUVARLI U KESİT	970 adet kazık 19.365,0 m			6.154 adet kazık 134.223 m				252 adet kazık 3.521 m	İSTİNAT DUVARLI U KESİT					
UZUNLUK	254,00 mt	577,00 mt			3.634,00 mt				198,00 mt	49,00 mt					
KMARALIĞI	11+949,00	12+203,00	12+770,00	12+780,00	13+000,00	13+460,00	13+880,00	14+200,00	14+710,00	15+410,00	15+805,00	16+080,00	16+414,00	16+612,00	16+661,00
Açık Alan Toplam Uzunluğu = 1.078,00 mt						Kapalı Alan Toplam Uzunluğu = 3.634,00 mt									



Şekil 2. Aç-kapa tünel yapısına ait kazık görüntüleri

Kazık imalatının tamamlanmasına müteakip aç-kapa tünel yapısı için kazı çalışmalarına geçilmiştir. Toplam 4810 metre uzunluğundaki tünel için 1.8 milyon metreküp kazı, ve 0.4 milyon metreküp dolgu yapılmıştır. Kazı alanında imalatı yapılan kazıkların birlikte hareket etmeleri ve tünelin üstünü kapatmak amacıyla kiriş başlıkları tasarlanarak imalatı yapılmıştır. Farklı boylarda, ve yüksekliklerde (150 cm- 200 cm) değişen toplam 3289 adet kirişlere ait bazı teknik detaylar Tablo 3'te sunulmaktadır. Şekil 3'te ise kiriş yerleştirme işlemine ait görüntüler sunulmaktadır.

Tablo 3. Aç-kapa tünel yapısına ait bazı kiriş detayları

YERİ	KM: 11+900 - 16+740 ARASI AÇ - KAPA YAPISI İTİNERERİ														
	8 ŞUBAT MAHALLESİ		ZEYTİNLİ MAH.		MÜCAHİTLER MAH.		ULUS MAH.				BUDAK MAH.				
KESİT TİPİ	İSTİNAT DUVARLI U KESİT	Fore Kazıklı Açık Kesit	K1-2 Kirişleri 496 adet	K3A-K3 Kirişleri 923adet	K4-5-6 Kirişleri 475 adet	K7-8-9 Kirişleri 634 adet	K10 Kirişleri 277 adet	Değişken Kirişler 107 adet	K11--12 Kirişleri 254 adet	Değişken Kirişler 66 adet	K13 Kirişleri 50 adet	Fore Kazıklı Açık Kesit	İSTİNAT DUVARLI U KESİT		
UZUNLUK	254,00 mt	577,00 mt					3.634,00 mt				198,00 mt	49,00 mt			
KM ARALIĞI	11+949,00	12+203,00	12+770,00	12+780,00	13+400,00	14+090,00	14+672,00	15+486,00	15+828,00	15+958,00	16+271,00	16+352,00	16+414,00	16+612,00	16+661,00
Açık Alan Toplam Uzunluğu = 1.078,00 mt			Kapalı Alan Toplam Uzunluğu = 3.634,00 mt												

**Şekil 3.** Aç-kapa tünel yapısına ait kiriş montaj görüntüleri

Aç-kapa tünel yapısının içerisinde bulunan demiryolu üstyapı sisteminin imalatında yerinde dökme *slabtrack* kullanılmıştır. Toplamda 4 adet demiryolu makası ile hatlar arası geçiş verilmiştir. Aç-kapa yapısı boyunca kullanılan üstyapı tipleri ve görüntüleri, sırasıyla Tablo 4'te ve Şekil 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Aç-kapa inşaat yapısına ait üstyapı bilgileri

Dingil Yüğü	22,5 Ton
Ray Tipi	60E1
Ray Eğimi	1/40
Bağlantı Tipi	SKL14(W14)
Makas Tipi	1/9 R=300
Maksimum Makas Hızı	50 km/h
Ekartman Genişliği	1435 mm

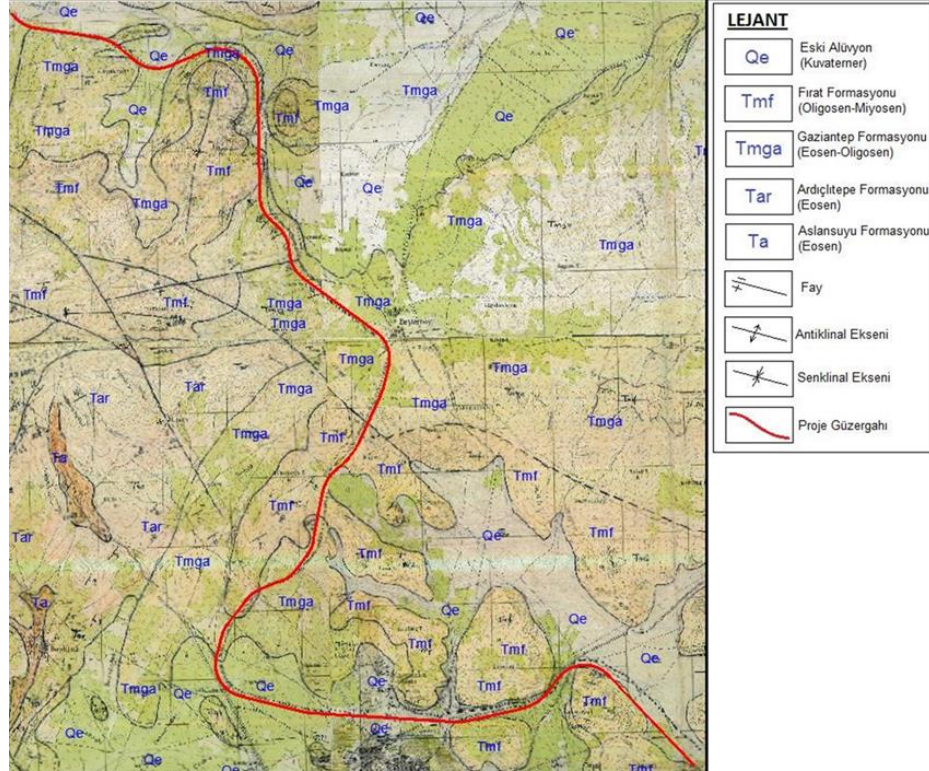


Şekil 4. Aç-kapa tünel yapısına ait üstyapı görüntüleri

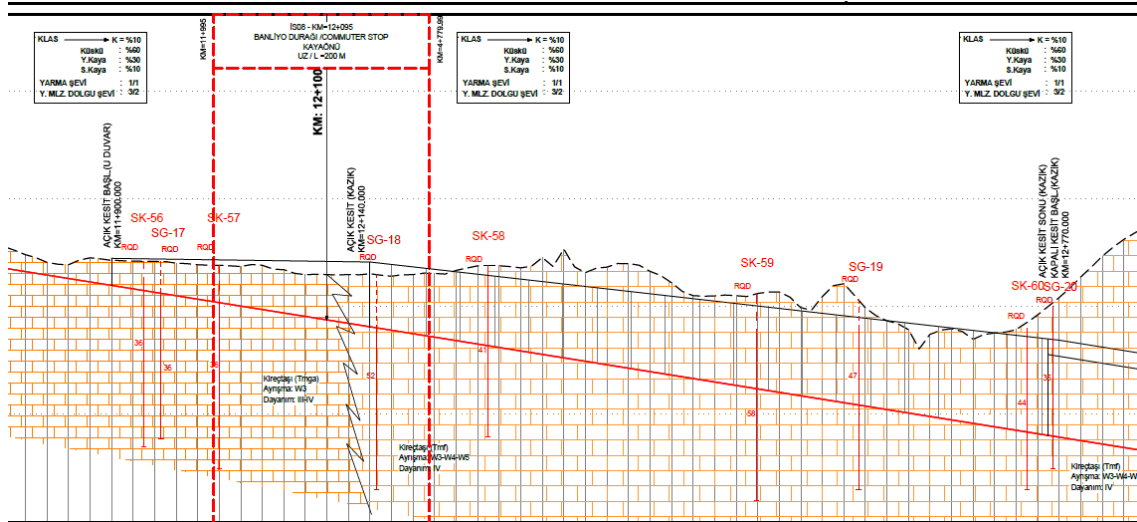
3. Proje Sahası

3.1. Jeoloji

Demiryolu güzergahında krem renkli masif çok kalın tabakalı çört yumrulu resifal kireçtaşları (Fırat Formasyonu, Tmf) ile kireçtaşı, tebeşirli kireçtaşı ve killi kireçtaşlarından oluşan (Gaziantep Formasyonu, Tmga) oldukça yaygındır. Bunun haricinde düzlük alanlarda eski alüvyon çökelleri (Qe) ile bazı kısımlarda Yavuzeli Bazaltı (Ty) tespit edilmiştir. Gaziantep formasyonu (Tmga), yumuşak topografya gösteren killi kireçtaşı ve tebeşirli kireçtaşı şeklinde yüzeylenmektedir ve bazı yerlerde kalın tabakalı kireçtaşlarına rastlanmaktadır. Killi kireçtaşları beyazımsı gri-krem-kirli sarı renkte, ince-orta tabakalı ve çört yumruları oldukça azdır [5]. Fırat Formasyonu (Tmf) ise yer yer resifal karakterli kireçtaşlarından oluşur. Bu birim, krem-beyazımsı-kirli sarı renkte, orta-kalın tabakalı ve bazen tabakasız kireçtaşlarıyla başlar. Üzerine kirli sarı renkte, orta-kalın tabakalı, bol miktarda çört yumrulu ve fosil kavkılı kireçtaşı gelir [6]. Eski alüvyon (Qe) ise genellikle nehirlerin eski yataklarında ve yüksek tepelerle çevrili ovalarda gevşek tutturulmamış çakıl, kum ve çamur taşından oluşur. Şekil 5'te demiryolu güzergahının tamamındaki jeolojik formasyon 1/2000 ölçekli haritada görülürken, Şekil 6'da ise km: 11+900 - 12+770 arası güzergahta açılan sondaj kuyularının jeolojik kesiti görülmektedir.



Şekil 5. GAZİRAY demiryolu hattı ve çevresindeki jeolojik yapı [7]



Şekil 6. Sondaj kuyularının jeolojik kesiti (km: 11+900 - 12+770)

3.2. Stratigrafi

Proje alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin batısında Arap otoktonu ile kenar oluşumlarını kapsayan kuşak boyunca yer almaktadır. En altta allokton konumlu Karadut Karmaşığı, Koçali karmaşığı ve ofiyolit yapı, bunların üzerinde ise otokton konumlu Kretase yaşlı Besni ve Germav Formasyonları, Tersiyer yaşlı Belveren, Beşenli, Aslansuyu ve Ardıçlıtepe formasyonları, Midyat Grubu, Şelmo Formasyonu, Yavuzeli Bazaltı ve Harabe formasyonu bulunur [8,9]. Gaziantep ve civarını kapsayan stratigrafik kolon kesiti Şekil 7'de sunulmaktadır.

3.3. Jeomorfoloji

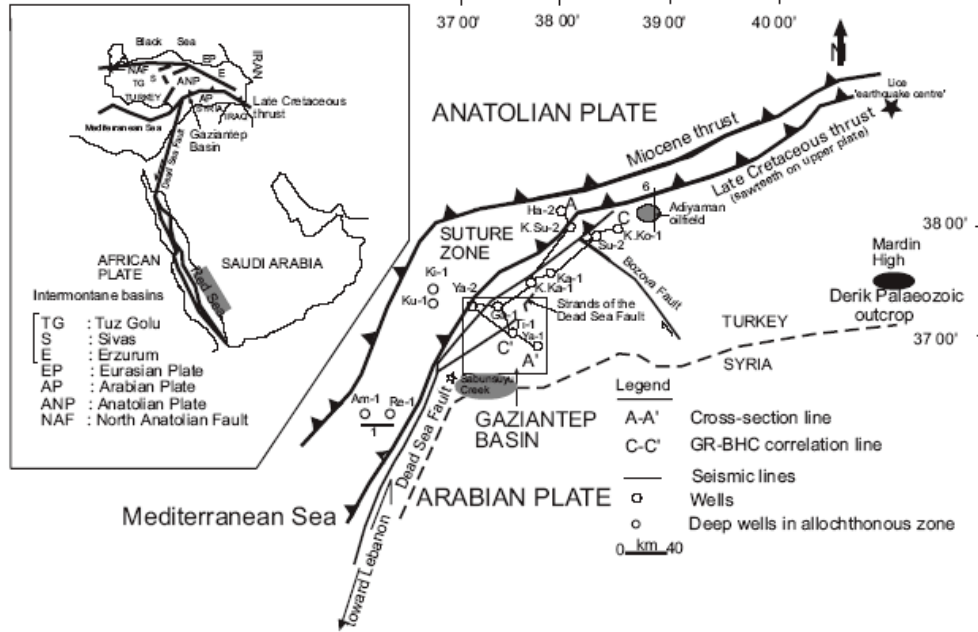
Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin batısında yer alan Gaziantep İli'nin doğusunda Şanlıurfa, batısında Osmaniye ve Hatay, kuzeyinde Kahramanmaraş, güneyinde Suriye, kuzeydoğusunda Adıyaman ve güneybatısında Kilis illeri bulunmaktadır. Gaziantep, 7642 km²'lik yüz ölçümüyle ülkemiz topraklarının yaklaşık %1'lik kısmını oluşturmaktadır. Şehirde geneline dalgalı ve engebeli bir topografya hakimdir. Batıda Hatay ve Osmaniye sınırlarını oluşturan yüksekliği 1527 metreye kadar uzanan Amanos Dağları yer almaktadır. Doğuda Fırat Nehri'ne kadar uzanan şehrin kuzeyindeki Kahramanmaraş ve Adıyaman sınırı boyunca 1250 metre yüksekliğindeki Domik Dağı, 1200 metre yüksekliğindeki İkikız Dağı, 1250 metre yüksekliğindeki Kas Dağı, 1250 metre yüksekliğindeki Sarıkaya Dağı, ve 1400 metre yüksekliğindeki Gülecik Dağı yer almaktadır. Araban ile Yavuzeli ilçeleri arasında bulunan Karadağ'ın yüksekliği ise 950 m dir. Gaziantep ilinin geriye kalan güney ve güneydoğusundaki dalgalı ondüveli arazilerin yanında Barak Ovası olarak adlandırılan doğusunda Fırat Nehri, güneyinde Suriye sınırı boyunca düz ve hafif meyilli araziler yayılmış durumdadır [10]. Proje için incelenen güzergahın büyük bir kısmı oldukça düz sayılabilecek bir topografyaya sahiptir. Proje başlangıcında yaklaşık 899 metre olan kot değeri giderek azalarak proje sonunda 809.5 metreye düşmektedir.

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	GRUP	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR				
MESOZOYİK	SENOZOYİK	TERTİYER	PALEOJEN	Eosen	Midyat	Gaziantep	Fırat	Şelmo	Yavuzeli	Alüvyon, Eski alüvyon, çakıltı, çamurtaşı
										Yavuzeli Bazaltı, siyah, akma yapılı, yer yer tüf ara katkı
										Şelmo Formasyonu, çakıltı, kumtaşı, şeyl, tüfit ve marn ardalannası
										Fırat Formasyonu; krem rengi, masif-çok kalın tabakalı, çört yumrulu resifal kireçtaşı
KRETASE									Gaziantep Formasyonu; aralarında kireçtaşı yüzeyleri bulunan killi kireçtaşı ve tebeşirli kireçtaşı ardalannası, çok az çört yumrulu	
									Karadut karmaşığı, Koçali karmaşığı ve ofiyolit napı Üst Kretase yaşlı Belveren ve Beşenli formasyonları	
TEMEL										

Şekil 7. Gaziantep'te stratigrafi kolon kesiti örneği [11]

3.4. Depremsellik

Gaziantep İl merkezi, yaklaşık 1100 km boyunca kuzey-güney doğrultusunda uzanan Ölü Deniz Fay Hattı'nın kuzeyi ile yaklaşık 580 km boyunca doğuda Bingöl Karlıova'dan güney batı istikametine İskenderun Körfezi'ne doğru uzanan Doğu Anadolu Fay Hattı'nın batısında yer almaktadır (Şekil 8) [11,12,13,14]. 6 Şubat 2023 tarihinde saat 04:17'de merkez üssü Pazarcık (Mw=7.8), ve saat 13:24'te merkez üssü Elbistan (Mw=7.6) olan iki sığ odaklı deprem (5-8 km derinlikte) bahsedilen bu alanda meydana gelmiş, ve çok sayıda can kaybı ile önemli hasarlara neden olmuştur.



Şekil 8. Gaziantep ve civarındaki plaka tektoniği [11]

3.4. Hidrojeoloji

Gaziantep ve civarında çok sayıda akarsu, gölet, ve baraj bulunmaktadır. Tatlıcak Keret Suyu, Bayramlı Sacır Suyu, Uluyatır Mizar Suyu, Nizip Çayı, Mezre Deresi, Kıroğlu Merzimen Çayı bölgedeki önemli akarsulardan birkaçıdır. Kartalkaya Barajı, Hancağız ve Kayacık barajlarının bulunduğu bölgedeki göletlerden bazıları Zülfikar, Balıklı, Çakmak, Burç, Balıkalan ve Gölühöyük olarak sıralanabilir. GAZİRAY Projesi kapsamında yapılan sondajların tamamında 15 metre derinliğe kadar yeraltı suyu gözlenmemiştir. Proje güzergahında geniş alanlar kaplayan killi kireçtaşı ve kireçtaşı birimlerinin kırıklarında yer altı suyu varlığı gözlemlenmiştir. Bazaltın hakim olduğu alanlar ise proje kapsamında fazla yayılım göstermemekle birlikte, yeraltı suyu açısından geçirimsiz özellikte birimlerdir [15]. Bunun yanında mevcut kaynak suları ve mevsimlere göre değişim gösteren sızıntı sularının varlığından söz edilebilmektedir. Hidrojeolojik açıdan hiçbir jeolojik formasyonun güzergaha olumsuz bir etkisi tespit edilmemiştir.

3.5. Geoteknik

Proje güzergahından alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular (su muhtevası, w ; doğal birim hacim ağırlık, γ ; tek eksenli basınç dayanımı, q ; kaya kalite göstergesi, RQD) Tablo 5'te sunulmaktadır. Doğal su muhtevası değerlerinin %1.3 ile %5.06 arasında değiştiği görülmüştür. Doğal birim hacim ağırlık değerlerinin 18.20

kN/m^3 ile 24.50 kN/m^3 arasında tespit edildiği araştırma alanından alınan alüvyon çökellerine ait RQD değerleri %0-%5 arasında, kireçtaşı ise %34-%48 arasında değişmektedir.

Tablo 5. Sondaj bilgileri ve laboratuvar sonuçları

Güzergâh Aralığı (km)	Jeolojik Formasyon	Sondaj Kuyusu	Sondaj Lokasyonu	Numune alınan derinlik (m)	w (%)	γ (kN/m^3)	q (kPa)	Ortalama RQD (%)
11+900 - 12+100	Gaziantep Formasyonu (Tgma)	SK56	11+929					36
		SG17	11+946	5	3.17	21.58	146.5	
		SK57	12+000					
12+100 - 12+770	Fırat Formasyonu (Tmf)	SG18	12+146	10	1.32	23.35	411.9	48
		SK58	12+250	15	1.43	25.13	366.9	
		SK59	12+500					
		SG19	12+574	10	1.71	23.87	509.2	
12+770 - 13+900	Fırat Formasyonu (Tmf)	SG20	12+774	15	1.6	23.41	482	34
		SK1	12+880					
		SK62	13+250					
		SK63	13+500	10	2.93	22.96	192.5	
		SK2	13+700					
		SG21	13+740	5	3.8	21.55	49.2	
		SK64	13+750					
13+900 - 14+720	Eski Alüvyon (Qe) Kireçtaşı (Tmf)	SG22	13+940	1	5.06	18.20	22.3	42
		SK65	14+000					
		SK67	14+289	10	1.64	24.50	208.1	
		SK68	14+289	15	1.3	23.13	260.8	
		SK3	14+315					
		SG23	14+411	10	1.38	25.33	519.1	
		SK69	14+500					
14+720 - 16+080	Fırat Formasyonu (Tmf)	SK71	14+750	5	2.57	21.98	149.3	35
		SK4	14+840					
		SK72	15+000					
		SK73	15+250					
		SK74	15+500	15	2.78	23.16	277.4	
		SK5	15+600					
		SK75	15+750					
		SK76	16+000					
16+080 - 16+720	Eski Alüvyon (Qe) Kireçtaşı (Tmf)	SK77	16+121	1	5.06	18.90	52.7	0 - 5
		SK6	16+170					
		SK78	16+250					
		SK7	16+300					
		SK79	16+500					
		SK8	16+580					
		SK80	16+671					

4. Sonuç

GAZİRAY demiryolu projesi, İstanbul-Gaziantep arası hızlı tren projesinin Gaziantep İl merkezindeki toplam 4 hat ve 17 istasyondan oluşan yaklaşık 25 km'lik kısmını kapsamaktadır. Demiryolu güzergahının yerleşim yerlerine çok yakın olduğu kısımlarında muhtemel gürültü ve kazalara karşı tedbir amacıyla aç-kapa tünel sistemi uygulanmıştır. Güzergah boyunca açılan 55 adet sondaj kuyusundan alınan zemin örneklerin değerlendirilmesi neticesinde tasarlanan, ve boyları 14 metre ile 21 metre arasında değişen 7845 adet kazık imalatı sonrası yaklaşık 2 milyon metreküp kazı-dolgu müteakibinde inşa edilen toplam 3289 adet kiriş ile tünelin üzeri kapatılmıştır. Fırat ve Gaziantep formasyonlarının hakim olduğu bir jeolojik yapıya sahip olan çalışma alanından elde edilen zemin örneklerinin laboratuvarında incelenmesi sonucunda, kireçtaşının doğal birim hacim ağırlığı değerinin 18.90 kN/m^3 ile 25.33 kN/m^3 arasında, doğal su içeriğinin %1.32 ile %5.06 arasında değiştiği görülmüştür. RQD değerleri ise %34 ile %48 arasında tespit edilmiştir. 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan tarifsiz acıların işaret ettiği deprem gerçeğine olan yakınlığı, değişkenlik gösteren jeolojik yapısı ve farklı geoteknik özelliklere sahip bir saha üzerine inşa edilen bölgenin ilk aç-kapa tüneline ait tüm teknik detayların, bir vaka analizi olarak bu makalede sunulmasının araştırmacı ve saha mühendislerinin bilgi ve tecrübelerine büyük katkılar yapacağına inanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılmasında desteklerini esirgemeyen TCDD Modernizasyon Dairesi, ve Kalyon İnşaat GAZİRAY Proje personellerine teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynakça

- [1] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Analytical solutions and 3D numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: A case from Turkey," *International Journal of Geo-Engineering*, 12, 1, 2021, doi:10.1186/s40703-021-00142-7
- [2] A. Inan, H. Kara, "Urban railway system route selection in turkey based on socio-economic and technical criteria using the analytical hierarchy process," *Transportation Research Record*, 2676, 10, 633-644, 2022, doi:10.1177/03611981221090513
- [3] R.H. Crawford, "Greenhouse gas emissions embodied in reinforced concrete and timber railway sleepers," *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no.10, pp. 3885-3890, June 2009, doi:10.1021/es8023836
- [4] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. Remennikoy, "Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects," *Composite Structure*, vol. 134, pp. 158-168, Sep 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.058
- [5] H.Ç.I. Terlemez, K. Şentürk, Ş. Ateş, M. Sümengen, A. Oral, "Gaziantep dolayının ve pazarcık-şakçagöz-kilis-elbeyli-oğuzeliarasının jeolojisi". *MTA Raporu*, No. 9526, Ankara, 1992 (yayımlanmamış)
- [6] Ü. Şafak, E. Meriç, "Kahta geç miyosen ostrakod topluluğu hakkında yeni görüşler," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29, 171-197, 1996
- [7] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2024) <https://www.mta.gov.tr/>
- [8] T. Külah, "Uğruca (Gaziantep) civarı tersiyeristifinin mikro paleontolojik incelenmesi ve ortamsal yorumu," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2006
- [9] A. Türkkan, "Yavuzeli-Araban (Gaziantep) dolayının stratigrafisi ve fırat formasyonu resifal kireçtaşlarının doğal yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2011
- [10] E. Sönmez, İ. Dölek, *Türkiye'nin Fiziki Coğrafyası*, "Türkiye'nin jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri," doi: 10.14527/9786053180647.01, 2016
- [11] B. Coskun, B. Coskun, "The dead sea fault and related subsurface structures, Gaziantep basin, southeast Turkey," *Geological Magazine*, 137 (2): 175–192, 2000
- [12] H. Gursoy, O. Tatar, J.D.A. Piper, A. Heimann, L. Mesci, "Neotectonic deformation linking the east anatolian and Karatas-Osmaniye intercontinental transform fault zones in the gulf of Iskenderun,

- southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Cayhan-Osmaniye volcanics," *Tectonics*, 22(6): 1067, 2003
- [13]R. Westaway, "Present-day kinematics of the middle east and eastern mediterranean," *Journal of Geophysical Research*, 99(B6): 12071-12090, 1994
- [14]R. Westaway, "Kinematics of the middle east and eastern mediterranean updated," *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12:5- 46, 2003
- [15]Ş. Şener, E. Şener, A. Er, "Gaziantep ili yeraltı sularının hidrojeokimyasal özellikleri ve sukalitesi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1253 – 1266, 2021, e-ISSN: 1308-6693

Özgeçmiş



Cem CEYLAN

1990 Mersin doğumlu. 2013 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında TCDD 2. Bölge Müdürlüğünde Mühendis olarak göreve başladı. 2017 yılından beri de TCDD Demiryolu Modernizasyon Dairesinde görev yapmaktadır. Halen Gaziantep Üniversitesinde demiryolu geotekniği üzerine doktora eğitimine devam etmektedir.
E-Posta: cemceylan0990@gmail.com



Nurullah AKBULUT

1987 Mardin doğumlu. İlkokul ve Ortaokul Eğitimini Almanya'da tamamladı. 2011 yılında Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2020 yılında doktorasını Hasan Kalyoncu Üniversitesi'nde tamamladı. Halen, Almanya'da Federal Waterways Engineering and Research Institute'de Araştırmacı olarak çalışmaktadır.
E-Posta: nurullah.akbulut@hku.edu.tr



Ali Fırat ÇABALAR

1977 Gaziantep doğumlu. 2000 yılında Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2007 yılında Doktorasını İngiltere Southampton Üniversitesi'nde tamamladı. 2017 yılında Profesör unvanı aldı. Halen Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde görev yapmaktadır.
E-Posta: cabalar@gantep.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Cem CEYLAN: Metodoloji, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Nurullah AKBULUT: Kavramsallaştırma, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Ali Fırat ÇABALAR: Kontrol, İnceleme.



Heyelan Tünel İlişkisinin Sayısal Analizlerle Değerlendirilmesi (Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi T8 Tüneli)

Evren POŞLUK^{*1}, Kenan OĞUL², Hasan BOZKURT³

¹ TCDD 1. Bölge Modernizasyon Servis Müdürlüğü, Rasim Paşa Mahallesi Tren Garı Yolu Sokak, 34716, İstanbul, Türkiye.

² TCDD Demiryolu Yapım Dairesi Başkanlığı, Hacı Bayram Mahallesi Hipodrom Caddesi No:3, 06050, Ankara, Türkiye.

³ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü C Blok Kat:2 Gülümbe Kampüsü 11230-Bilecik, Türkiye.

*evrenposluk@gmail.com

(Alınış/Received: 12.11.2024, Kabul/Accepted: 11.12.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Yüksek standartlı demiryolları, kat ettikleri uzun mesafeler ve içerdiği yoğun mühendislik yapıları sebebiyle tasarım, yapım ve işletmecilik açısından oldukça karmaşık yapılardır. Demiryolu güzergah çalışmaları sırasında tünel, viyadük, altgeçit, üstgeçit gibi sanat yapılarına sıklıkla başvurulmakta, buda projenin maliyetini, yapım süresini ve işletmecilik sürecinde bakım maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yüksek standartlı demir yolu projelerinin temelini güzergah çalışmaları oluşturmaktadır. Bu çalışmada, heyelan altından geçen Doğançay Ripajı T8 Tüneli 2 farklı güzergah alternetifi (heyelana en yakın ve en uzak) irdelenmiştir. Bu amaçla öncelikle sondaj ve jeodezik yöntemler kullanılarak heyelan geometrileri belirlenmiş ardından geri analiz ve ileri analiz yöntemleri kullanılarak heyelanların farklı güzergahlara etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak heyelanlı bir bölgeden geçen T8 Tünelinde en kısa tünel güzergahının daha fazla destekleme gerektireceği bu nedenle heyelan kayma yüzeyinden en uzak mesafede tünelin konumlandırılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu anlayışa göre konumlandırılan T8 Tüneli sorunsuz bir şekilde 2021 yılında ulaşıma açılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüksek Standartlı Demiryolları, Heyelan, Kayma Yüzeyi, Tünel, Tünel Güzergahı

Evaluation of Landslide Tunnel Relationship with Numerical Analysis (Ankara-Istanbul High Speed Train Project T8 Tunnel)

Abstract: High standard railways are quite complex structures in terms of design, construction and operation due to the long distances they cover and the intensive engineering structures they contain. During railway route studies, engineering structures such as tunnels, viaducts, underpasses and overpasses are frequently used, which directly affects the cost of the project, construction period and maintenance costs during the operation process. Therefore, route studies constitute the basis of high standard railway projects. In this study, 2 different route alternatives (closest and farthest to the landslide) of Doğançay Ripajı T8 Tunnel passing under the landslide were examined. For this purpose, firstly, landslide geometries were determined using drilling and geodetic methods, then the effects of landslides on different routes were evaluated using back analysis and forward analysis methods. As a result, it was understood that the shortest tunnel route in the T8 Tunnel passing through a landslide region would require more support, therefore the tunnel should be positioned at the farthest distance from the landslide sliding surface. Positioned according to this understanding, the T8 Tunnel was opened to traffic in 2021 without any problems.

Keywords: High Standard Railways, Landslide, Slip Surface, Tunnel, Tunnel Route

1. Giriş

Yüksek standartlı demiryolu projelerinin yapım ve uygulanmasında, güvenli ve konforlu taşımacılık yapabilmek amacıyla tasarım kriterleri oluşturulmuştur [1,2]. Farklı kabullere

Atıf için/Cite as: E. Poşluk, K. Oğul, H. Bozkurt, "Heyelan tünel ilişkisinin sayısal analizlerle değerlendirilmesi (Ankara-İstanbul hızlı tren projesi T8 tüneli)," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 13-26, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1537683

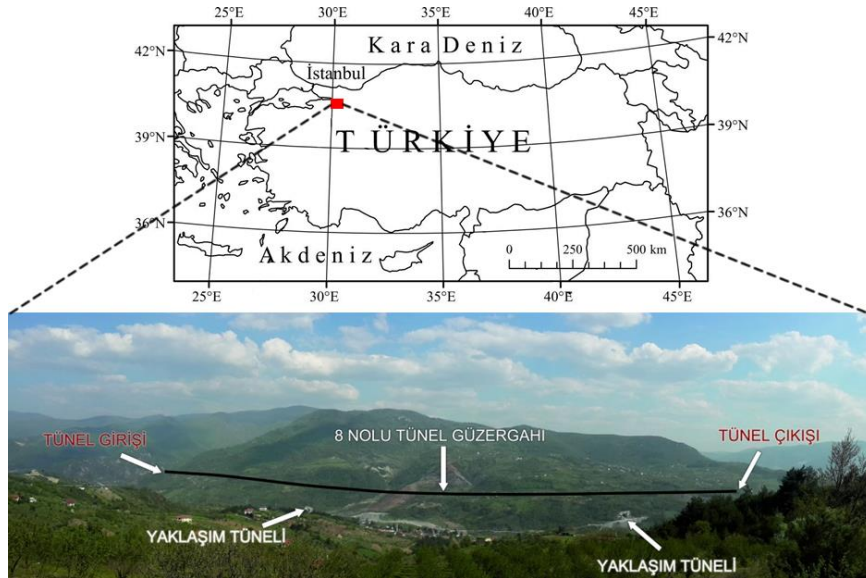
dayanan bu kriterler ülkelere göre değişiklik göstermektedir [3]. Ülkemizde yüksek hızlı demiryolu kriteri olarak 3500 m en düşük kurp yarı çapı ve % 1,6 en yüksek boyuna eğim kullanılmaktadır. Ülkemizin sarp coğrafyasında bu standartlar uygulandığında sıklıkla sanat yapısı kullanılması gerekmektedir. Güzergah planlayıcılar güzergah maliyetini azaltmak için genellikle kısa sanat yapılarının olduğu hatları tercih etmektedir. Bu tercih sonucunda ise hızlı demiryolu hatları çoğunlukla yamaçlardan geçmektedir. Yamaçlardan geçen hatlarda ise heyelanlar, çökmeler, kaya düşmeleri, göçükler gibi olumsuz jeolojik riskleri bulunmaktadır [4].

Kaya düşmesi, kayma, akma gibi jeolojik olaylarla anılan heyelanlar ise doğal yada insan faaliyetleri sonucunda tetiklenmektedirler [5]. Özellikle yeraltı açıklıklarında yapılan kazı çalışmalarında eski (fosil) heyelanlar tetiklenmekte ve yeraltı açıklığı için risk oluşmaktadır [6]. Tünel güzergahı boyunca heyelanlar veya paleo-heyelanlar varsa, bu heyelanların kayma yüzeyleri belirlenmeli ve tünelle ilişkileri tanımlanmalıdır. Ayrıca, heyelanlar sayısal analizde dikkate alınmalıdır [7]. Karmaşık jeolojik koşullarda inşaa edilen tüneller kendilerine özgü sorunlar içerir. Bu sorunların önceden öngörülmesi ve çözümü kapsamlı bir dizi çalışmanın birlikte yürütülmesi ile mümkündür.

Bu çalışma, heyelanlı bir sahadan geçen T8 Tüneli güzergahının maliyet etkin bir şekilde belirlenmesi amacıyla yürütülen bir dizi çalışmayı konu almaktadır. Çalışmalara heyelanların belirlenmesi, heyelanların hareketlerinin takibi, bölgedeki birimlerin jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin tespitiyle başlanmış ardından heyelanın tünele olan etkisi sayısal analizlerle tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. T8 Tünel Hattının Jeolojik ve Jeoteknik Özellikleri

T8 Tüneli, Ankara-İstanbul hızlı tren projesi güzergahında Adapazarı iline bağlı Doğançay beldesi ile Geyve ilçesi arasında (proje km: 138+954 ile 142+780 arasında) bulunmaktadır. Sakarya Nehrine paralel uzanan tünel hattında örtü kalınlığı 60 m ile 114 m arasında değişmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. T8 Tünel güzergahı

T8 Tüneli Üst Kampaniyen-Alt Eosen yaşlı Abant Formasyonu birimlerinden geçmektedir [8]. Tünel boyunca Abant Formasyonunun kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bunları damar, dayk ve stoklar halinde kesen granit birimlerinden geçilmektedir (Şekil 2a). Kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması çoğunlukla gri renkte orta derecede ayrışmalı ve çoğunlukla zayıf

dayanımlıdır. Birimin granitik sokulumlar tarafından kesilen bölgelerinde dayanım artmaktadır [9]. Birim içinde KD-GB doğrultulu fay zonlarına sıklıkla rastlanmaktadır. Fay zonu bölgeleri örselenmiştir. Granit sokulumları ise yüzeyde kahverenkli, derinlerde ise grimsi yeşil renkli olup genelde orta derecede ayrılmıştır (Şekil 2b). Granit sokulumları yüzeylerde zayıf, derinlere doğru sağlam dayanımlı ve sık eklemlidir [10]. Birim içinde kalınlığı birkaç metreye kadar ulaşan fay zonları mevcuttur.



Şekil 2. a) Abant Formasyonu granit üyesi b) Abant formasyonu kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı üyesi

2.1. Kaya malzemesinin jeomekanik özellikleri

T8 Tünel güzergahında yapılan jeolojik ve jeoteknik çalışmalarla granit, sağlam kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bu birimlerin altere seviyeleri ayırtlanmıştır. T8 Tünel güzergahı ve yakın çevresinde yapılan 17 adet sondaj çalışmasından elde edilen silindirik karot numuneleri üzerinde, ISRM [10] standartları kullanılarak kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç direnci, elastisite modülü, poisson oranı değerleri belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. T8 Tünel güzergahında yapılan sondajlara ait deney sonuçları [11, 12]

		Örnek sayısı	Ortalama	En Büyük Değer	En Küçük Değer	Standart sapma
Granit	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	31	25,36	28,04	23,61	0,84
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	30	20,94	50	3,3	12,93
	Elastisite Modülü (E, MPa)	13	6705	10500	1009	300,99
	Poisson Oranı (u)	11	0,28	0,43	0,12	0,1
Sağlam Kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması)	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	37	23,92	26,62	18,1	1,96
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	24	11,8	165,3	2,78	30,41
	Elastisite Modülü (E, MPa)	16	700	1650,3	400	77,23
	Poisson Oranı	5	0,29	0,3	0,23	0,2
Ayrılmış Kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması)	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	22	23,79	26,41	18,1	2,14
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	18	6,05	36,51	1,15	9,56
	Elastisite Modülü (E, mPa)	16	541	146,85	0,03	38,72
	Poisson Oranı	4	0,27	0,3	0,18	0,3

2.2. Süreksizliklerin özellikleri

T8 Tüneli güzergah koridoru boyunca gözlenen granit, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bu birimin alterasyonundan oluşan heyelan malzemesidir. Bu birimlerin ve bu birimlerin

içerdiği süreksizliklerin belirlenmesi amacı ile öncelikle yapılan sondajlardan yararlanılmıştır. Bununla birlikte bölgede gözlemlenen mostra ve yol yarma şevlerinde hat etüdü çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda süreksizliklerin yönelimi, ara uzaklık, açıklık, süreksizliklerin devamlılığı, süreksizlik yüzeylerindeki su durumu, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeylerinin dalgalılığı, ayrışma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve kalınlığı gibi özelliklerin tespiti ISRM [10]'e göre yapılmıştır (Tablo 2). Ayrıca yeraltı suyu emilim durumu RMQR [13] sınıflama sisteminin önerdiği şekilde tespit edilmiştir. Tünel güzergah hattında yapılan sondajlardan derlenen veriler ile Kaya Kalitesi (RQD) değerlerinin granit için 55, altere kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı birimi için 17 ve kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı (sağlam kaya) biriminde ise 37 olarak belirlenmiştir.

2.3. Kaya kütle sınıflama sistemlerine göre tünel güzergah hattının değerlendirilmesi

Kaya kütlelerinin sınıflandırılması kaya kütlelerinin davranışlarını ve karakterini belirlemek açısından önemlidir. Bu amaçla ilk ciddi çalışma 1946 yılında Terzagi tarafından yapılmıştır. Kaya kütle sınıflama sistemleri ile özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve tecrübe gerektirmektedir [14]. Günümüzde en çok kullanılan sistemler RMR [15], Q [16], GSI [17] olarak sayılabilir. Bununla birlikte son yıllarda gelişim aşamasında olan RMQR [13] sistemi de bu çalışmada kullanılmıştır (Tablo 3).

Tablo 2. Tünel güzergahında bulunan kayaların süreksizlik değerlendirmesi

	Süreksizlik Özellikleri								
	Granit		Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Sağlam Kaya)			Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Altere)			
Süreksizlik takımları	60/15	57/289	57/18	47/277	48/68	37/20	53/287	41/170	44/308
Süreksizlik türü	Ekleme	Ekleme	Ekleme	Ekleme	Tabaka	Ekleme	Ekleme	Ekleme	Tabaka
Süreksizlik ara uzaklığı (cm)	18,3	21,1	18,6	12,8	13,1	9,7	9,2	12,8	12,3
Süreksizlik açıklığı (mm)	2	1,7	3,1	5,3	2,7	5,7	6,6	6,2	3
Süreksizlik devamlılığı (m)	2,2	2	6,6	5,1	>20	>10	>10	>10	>20
Süreksizlik pürüzlülüğü (ISRM, 1981)	Dalgalı, pürüzlü	Dalgalı, pürüzlü	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Az dalgalı, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz
Dolgu malzemesinin özelliği	Çok ince kuvars sıvaması	Çok ince kuvars sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu
Süreksizlik bozunma derecesi (ISRM, 1981)	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş
Süreksizlik yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 1981)	Nemli	Nemli	Nemli	Nemli	Kuru	Nemli	Nemli	Nemli	Kuru
Ayrıca yeraltı suyu emilim durumu (Aydan vd., 2014)	Kılcal emici	Kılcal emici	Orta derecede emici	Kılcal emici	Kılcal emici	Orta derecede emici	Orta derecede emici	Orta derecede emici	Kılcal emici

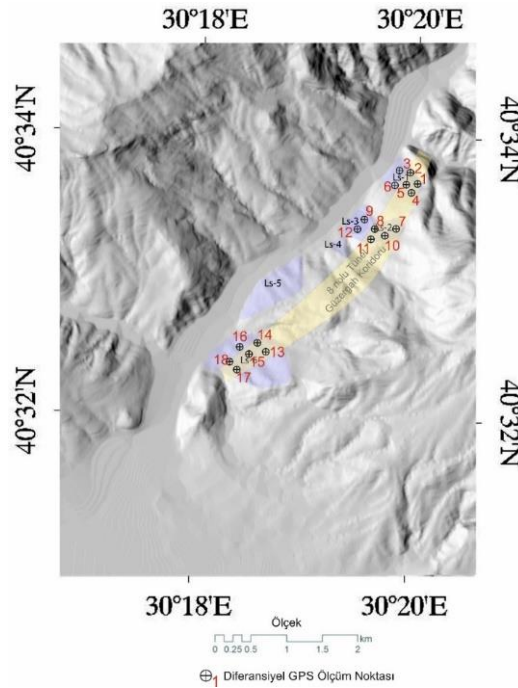
Tablo 3. T8 Tüneli güzergahındaki birimlerin kaya kütle sınıflama sistemlerine göre tanımlamaları

	RMR ₈₉ (Düzeltilmiş)	Q	GSI	RMQR
Granit	47	2,44	55	56
Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Sağlam Kaya)	27,5	0,52	30	33
Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Ayrışmış)	15,5	0,22	21	23

3. T8 Tünel Güzergahında Bulunan Heyelan Hareketlerinin Belirlenmesi

Çalışma sırasında yapılan uydu görüntüsü analizi, sayısal yükseklik modeli değerlendirilmesi ve müteakiben gerçekleştirilen arazi çalışmasına bağlı olarak T8 Tüneli güzergahı boyunca 6 ayrı heyelan kütleleri (Ls-1-6) tespit edilmiş olup bu heyelanlardan Ls-1, Ls-2, ve Ls-6 tünel güzergahında bulunmaktadır (Şekil 3). Heyelan hareketlerinin belirlenmesi çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada heyelanların yüzey yayınlımları belirlenmiş ardından güncel hareketliliği tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise heyelan derinlikleri ve tünele olan etkileri irdelenmiştir. Çalışma sahası içerisinde haritalanan kütle hareketlerine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonlarının izlenmesi amacıyla saha içerisinde 18 adet yüzey ölçüm istasyonu tanımlanmıştır (Şekil 3).

Ölçümlerde diferansiyel GPS (Küresel Konumlama Sistemi, 1 mm hassasiyette) yöntemi kullanılmıştır. Diferansiyel GPS yöntemi GPS yönteminin hassasiyetini arttırmayı amaçlar. GPS yönteminde konumsal verinin hassasiyetini, uydu pozisyonu, bulutluluk, bina ve ağaç örtmesi gibi etmenler sınırlayabilir. Bunlara ek olarak uydu sinyalleri atmosfere girerken gecikmeler olabilir [18]. Diferansiyel GPS yöntemi sabit bir alıcı ve kompakt kolay taşınabilir özellikte el ünitesinden oluşur [19]. Diferansiyel GPS ünitesi hem uydulardan hem de sabit noktada toplanarak gönderilen bilgileri farklı şekilde karşılaştırarak karmaşık temel modeller oluşturarak hata oranlarını azaltır [20].

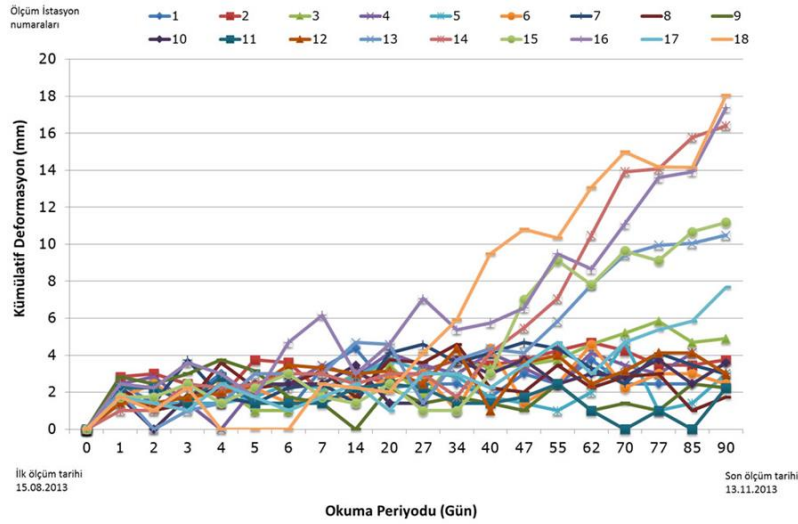


Şekil 3. T8 Tünel koridoru boyunca tespit edilen heyelanlar.

Heyelan bölgelerinde yapılan diferansiyel GPS ölçümleri, 90 gün boyunca alınmıştır. Ölçümler periyotları ilk hafta günlük sonra ise haftalık olarak devam ettirilmiştir. Kuzey (y), Doğu (x) ve Yükseklik (z) şeklinde alınan ölçümler, ilk ölçümden çıkartılarak yer değiştirmeler bulunmuş, ardından toplam yer değiştirme vektörü Denklem 1. kullanılarak hesaplanmış ve grafik oluşturulmuştur (Şekil 4).

$$di = \sqrt{dxi^2 + dyi^2 + dzi^2} \quad (1)$$

Grafik incelendiğinde T8 Tüneli güzergahında bulunan Ls-1, Ls-2 ve Ls-3 isimli heyelanlarda hareketin olmadığı ancak Ls-6 isimli heyelan kütesinde yağışlı mevsime geçilmesi ile birlikte hareketlenmelerin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle yamaçta kalan 14-16 ve 18 numaralı istasyonlarda 1,8 cm kümülatif deformasyon ölçülmüştür. Bu verilerle Ls-6 heyelanının kripi davranış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4. Diferansiyel GPS ölçüm değerleri

T8 Tüneli güzergahına denk gelen heyelanların derinliğinin belirlenmesi amacıyla öncelikle heyelanların yüzey yayılımları belirlenmiştir. Ardından heyelanların alansal yayılım ve dairesel yenilme modeline uyduğu kabul edilerek, Larsen vd. [21] tarafından önerilen ampirik model Denklem 2. kullanılmıştır. Ampirik model ile ulaşılan heyelan derinlikleri karotlu sondaj ve inklinometre ölçümleri kullanılarak heyelan geometrileri oluşturulmuştur (Tablo 4).

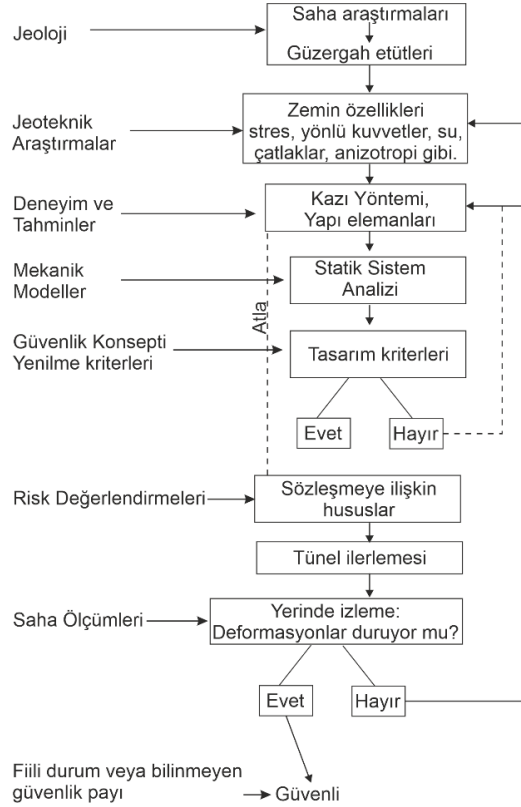
$$V = \alpha Ay \quad (2)$$

Tablo 4. T8 Tüneli güzergahında bulunan heyelanların yayılım ve derinlikleri

Heyelan Adı	Heyelan Yayılımı (m ²)	İnklinometre okumalarına göre heyelan derinliği	Sondajlara göre heyelan derinliği	Heyelan derinliğinin T8 Tünel Koridoruna olan mesafesi (en uzak-En yakın)
LS1	0,1592	17	14	22-32
LS2	0,2224	15	15	12-24
LS6	0,55	15.6	18	3-11

4. Tünel Tasarımı

Mühendislik tasarımı için güvenilir girdi parametrelerinin sağlanması, mühendislik jeologları ve tünel tasarım mühendisleri için en zor görevlerden biridir [22]. Doğru tasarım süreci, girdi parametrelerin gelişmiş tasarım yöntemleriyle eşleşmesi ile mümkündür. Bu süreç ITA [23] tarafından özetlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Tünel tasarımı akış şeması [23]

Tünel tasarımında kaya kütle sınıflama sistemleri, Konverjans Sınırlama Yöntemi, Gözleme dayanan tasarım yöntemleri ve sayısal analizler en çok kullanılan yöntemlerdir. Kaya kütle sınıflandırması, bir kaya kütlelerini tanımlanmış ilişkilere göre gruplara veya sınıflara ayırma sürecidir [15]. 100 yılı aşkın bir süredir kullanılan yöntemlerden günümüzde yeraltı kazı destek sistemi tasarımı amacıyla en çok Kaya Kütle Derecelendirme Sistemi (RMR) [15, 23]. ve Tünel Açma Kalite İndeksi (Q) [16], Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) [17] tercih edilmektedir [34].

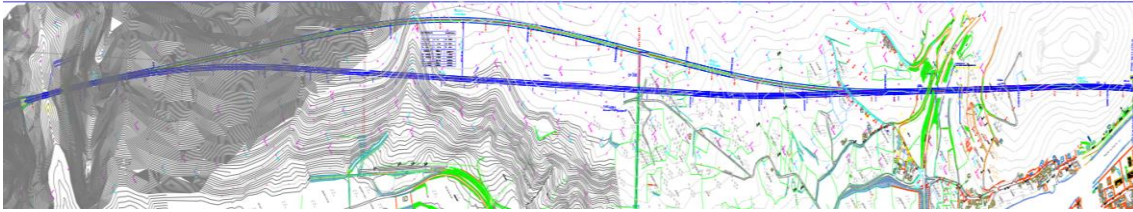
CCM tünellerde önerilen destek sisteminin gerekli yük kapasitesini tahmin etmek için kaya destek etkileşiminin üç boyutlu problemlerini simüle etmek amacıyla kullanılabilen iki boyutlu basitleştirilmiş bir yaklaşımdır [23]. Yöntemin temel prensibi destek ve zemin arasındaki denge durumunu hesaplamak için birleştirilen Zemin Reaksiyon Eğrisi (GRC), Boyuna Yer Değiştirme Profili (LDP), ve Destek Sınırlama Eğrisi (SCC) üç farklı eğriye dayanmaktadır. Gözleme dayanan tünel tasarımı ise yerinde gözlemler ile kaya kütlelerinin deformasyonunu ve destek sistemindeki yükün oluşumunu izlemek için enstrümanların kullanımı, gözlemsel yaklaşımı karakterize eder [25]. Gözlemsel yaklaşımlar günümüzde NATM ve ADECO-RS yöntemleridir.

20. yüzyılın ikinci yarısında tünel açma ve yeraltı kazı problemlerinin çözümünde sayısal yöntemler uygulanmaya başlanmıştır [26]. Tünel modellemelerinde en çok kullanılan hem sonlu

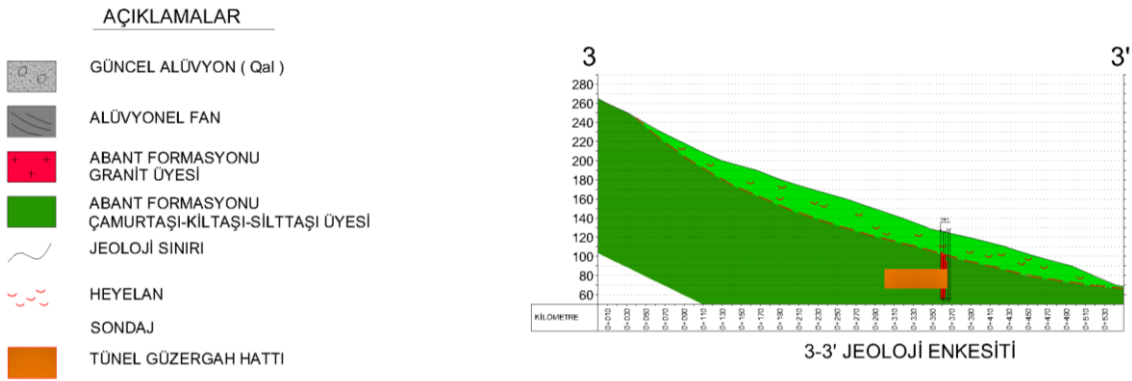
elemanlar hem de sonlu farklar modellemesinde, lineer elastik modeller, elastik plastik modeller (Mohr-Coulomb, Generalized Hoek-Brown, Drucker Prager mukavemet modelleri vb.) ve viskoplastik modeller başta olmak üzere çok sayıda malzeme modeli kullanılabilir. Bu çalışmada NATM yöntemiyle farklı projelerde uygulanan tünel destek modelleri sayısal analiz yöntemi kullanılarak sorgulanmış, tünel heyelan ilişkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.

4.1. Jeolojik modelin oluşturulması

T8 Tüneli güzergah kısıtlamaları nedeniyle en uzun 3827 m en kısa 3805 m olabilmektedir (Şekil 6). Hareketin devam ettiği Ls-6 heyelanı ile T8 Tüneli heyelan etkileşiminin irdelenmesi amacıyla kritik kesit bu hatlar üzerinde belirlenmiştir (Şekil 6). Kritik kesitte T8 Tüneli heyelan kayma yüzeyinin 4.2 ile 21 m arasında altında olup tünel üzeri örtü kalınlığı ise 28 ile 50,9 m arasında değişmektedir (Şekil 7).



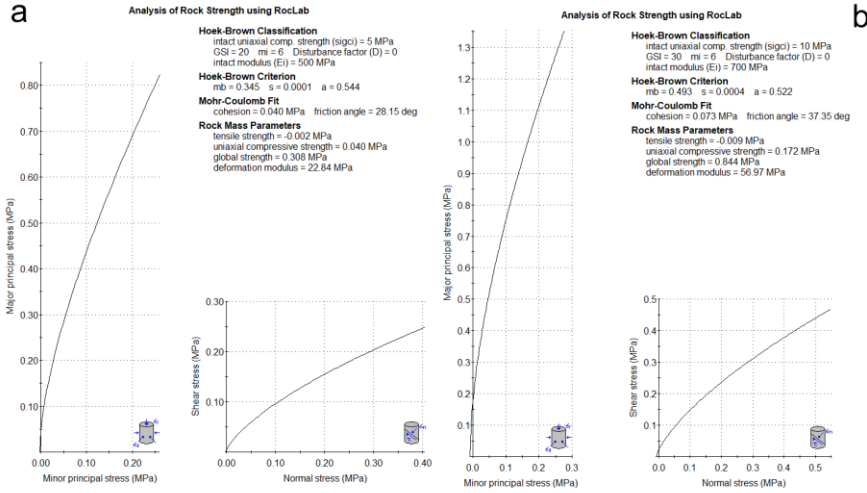
Şekil 6. T8 Tünel güzergahları (en kısa hat koyu, en uzun hat açık mavi ile gösterilmektedir)



Şekil 7. Ls-6 numaralı heyelanın jeolojik modeli

4.2. Analiz parametrelerinin belirlenmesi

T8 Tüneli üzerindeki heyelanın tünele etkisinin araştırması amacıyla gerek geri analiz gerekse ileri analiz çalışmalarında sağlam kaya ve ayrılmış kaya Abant Formasyonu (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması) birimleri için kaya kütle parametreleri belirlenmiştir. Ayrılmış kaya birimleri için GSI değeri 20, kaya malzemesi sabiti olan "mi" değeri 6 alınmıştır. Sağlam kaya Abant Formasyonu için GSI değeri 30, kaya malzemesi sabiti olan "mi" değeri 6, tünel üzeri örtü kalınlığı 30 m ve örülenme faktörü makineli kazı yapılacağı için D=0 alınmıştır. Bu veriler RockLab [27] bilgisayar programı ile değerlendirilmiş ve birimlere ait normal gerilme – kesme dayanımı grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 8).



Şekil 8. Abant Formasyonu birimleri için oluşturulan gerilme-kesme dayanımı grafikleri (a) ayrıışmış Abant Formasyonu birimleri, b) sağlam kaya Abant Formasyonu birimleri; [27]

Geri analiz:

Bir şev kayması olduğunda, şevde güvenlik sayısının (GS) bire eşit yada altında olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla bir şevin hareketi anındaki şev modeli gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir [27]. Bir şevin hareket anındaki koşulları belirleyerek şeve uygun model oluşturma süreci geri analiz veya geri hesaplama olarak adlandırılır [28]. Geri analiz yönteminde şevin hareket anındaki güvenlik sayısının yaklaşık "1" olduğu esas alınır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen zemin parametreleri, kayma yüzeyindeki ağırlıklı ortalama kayma dayanımı parametreleridir ve $GS = 1$ koşulunu sağlayan c:kohezyon, ϕ :içsel sürtünme açısı veri çiftleri deneme yanılma yoluyla belirlenir [28].

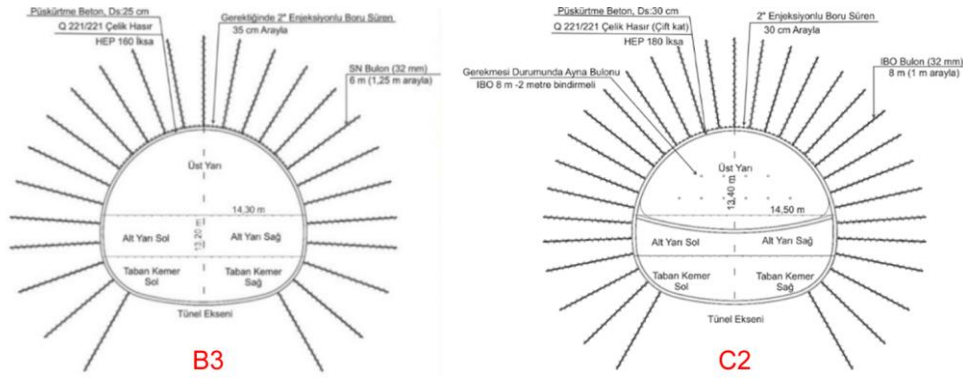
T8 Tüneli üzerindeki heyelan kütesine ait kütle parametreleri, limit denge yöntemleri kullanan Slide V.9 bilgisayar programı kullanılarak geri analiz yöntemi ile hesaplanmıştır. Analizlerde limit denge yöntemlerinden; tam dairesel olmayan kayma koşullarında iyi sonuçlar verdiği bilinen "Janbu" hesap yöntemleri kullanılmıştır [8]. Analiz sonuçlarına göre heyelan malzemesinin birim hacim ağırlığı $2,2 \text{ kN/m}^3$, kohezyonu 4,2 kPa ve içsel sürtünme açısı $12,2^\circ$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Geri analiz yöntemiyle elde edilen heyelan malzemesi parametre değerleri

İleri analizler:

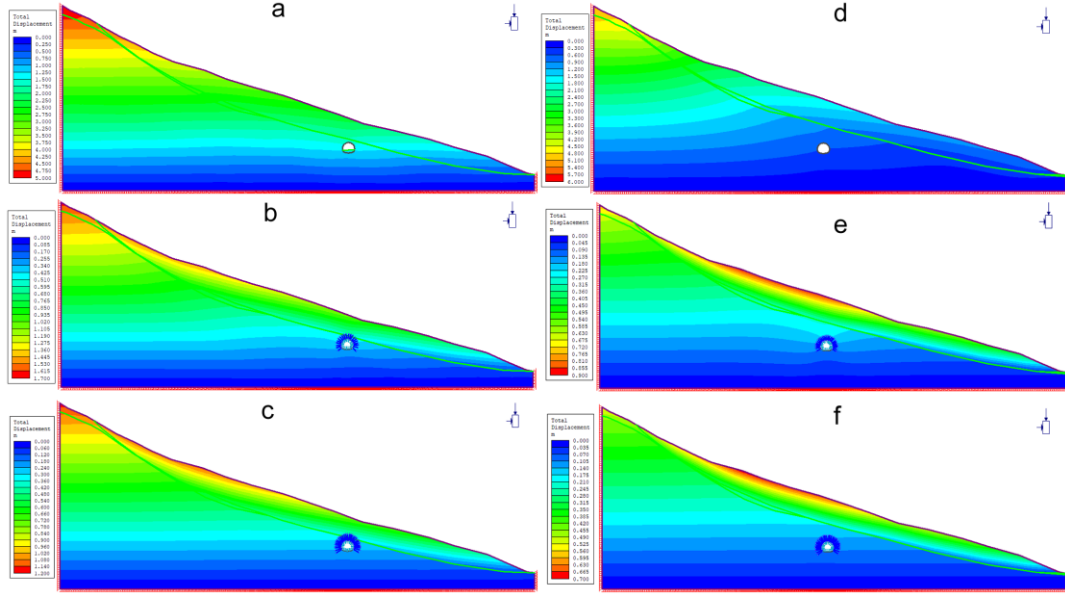
İleri analizler tünel heyelan ilişkisini sorgulayarak T8 Tünel güzergahı için en uygun maliyetli hattın belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Analizler heyelana en yakın ve en uzak tünel güzergahları için desteksiz, ONORM-B 2203 [29]'e göre oluşturulmuş B3 ve C2 destekli tünel koşullarında gerçekleştirilmiştir. Destek sistemi detayları Şekil 10'de verilmiştir. 2 boyutlu analizler gerçek yüzey modelinde Phase2d V. 8,0 [30] programı ile yapılmıştır. Analizlerde malzeme gevşemesi %60 olarak seçilmiş, kazıdan sonra desteklere gelecek yük ise %40 olarak alınmıştır [31]. Analizlerde kullanılan k (σ_h/σ_v) değeri Sheorey [32] formülü kullanılarak 0,5 olarak hesaplanmış analizlere girilmiştir. 6 farklı analizde kullanılan modelleme aşamaları Çizelge 5'de verilmiştir.



Şekil 10. Sayısal analizlerde kullanılan desteklemeler [11, 12]

Tablo 5. Sayısal analiz aşamaları

Aşama	Açıklama	Heyelana En Yakın Tünel Konumu			Heyelana En Uzak Tünel Konumu		
		Desteksiz	B3 Destekleme	C2 Destekleme	Desteksiz	B3 Destekleme	C2 Destekleme
1	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması
2	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)
3	Üst yarı kazısı	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
4	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)
5	Alt yarı Kazısı	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı Kazısı	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
6	Taban kemer bölümü gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban bölümü gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)
7	Taban kemer bölümü kazısı	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban bölümü kazısı	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
8		Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması		Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması



Şekil 11. Sayısal analiz sonuçları a) Heyelana en yakın desteksiz tünel koşulu, b) heyelana en yakın B3 destekleme, c) heyelana en yakın C2 destekleme, d) heyelana en uzak desteksiz tünel koşulu, e) heyelana en uzak B3 destekleme, f) heyelana en uzak C2 destekleme).

Sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde tünelin heyelana en uzak olduğu durumda tünel çevresinde oluşan toplam yer değiştirmelerin daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo). Bununla birlikte tünel stabilitesinin sağlanması amacıyla uygulanan desteklemelerde ise tünelin heyelana en yakın olduğu koşullarda B3 desteklemenin yeterli olmadığı ve 51 cm civarında deformasyonların oluştuğu anlaşılmaktadır. Burada C2 desteklemede ise 30 cm yer değiştirmeler gözlenmektedir. Buna karşın heyelandan en uzak tünel konumunda ise B3 desteklemede 22,5 cm'ye inmektedir. C2 desteklemede ise bu değer 14 cm seviyesine gerilemektedir.

Tablo 6. Sayısal analiz sonuçları özet tablosu

Tünel Desteklemeleri	Heyelana en yakın tünel konumu			Heyelana en uzak tünel konumu		
	Desteksiz	B3	C2	Desteksiz	B3	C2
Tünel tavanı toplam yer değiştirmeleri (mm)	1500,00	510,00	300,00	900,00	225,00	140
Tünel tabanı toplam yer değiştirmeleri (mm)	1250,00	340,00	240,00	600,00	135,00	115
Tünel sol duvar toplam yer değiştirmeleri (mm)	1500,00	425,00	240,00	600,00	180,00	115
Tünel sağ duvar toplam yer değiştirmeleri (mm)	1500,00	425,00	300,00	600,00	180,00	115
Tünel birincil desteklemesi max, moment, (kNm/m)	-	122,23	145,49	-	249,74	276,34
Tünel birincil desteklemesi max, Kesme kuvveti (kN/m)	-	177,79	278,06	-	275,35	124,73
Kaya blonu yükleri (kN)	-	71,09	215,36	-	234,00	169,78

5. Sonuçlar

Bu çalışmada heyelanlı bir sahada tünel konumunun destek ihtiyacına olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Demiryolu güzergahında bulunan

T8 Tüneli incelenmiştir. Sayısal yükseklik modeli üzerinde heyelanlar ve yayılımları belirlenmiştir. Bu heyelanlar 90 günlük periyotta jeodezik yöntemlerle takip edilmiştir. Sondajlar, sayısal yükseklik modeli ve ampirik yaklaşımlar kullanılarak aktif heyelanın geometrisi belirlenmiştir. Belirlenen heyelan modelinde Oluşturulan heyelan geometrisi ile tünel etkileşimleri desteksiz, B3 destekli ve C2 destekli durumlar için Phase V.8 programıyla sorgulanmıştır.

a) Analiz sonuçları, tünel tavanının heyelan kayma yüzeyinden uzaklaştıkça toplam yer değiştirmelerin azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla heyelanlı bir sahada tünel güzergahı belirlenirken mümkün olduğunca heyelan kayma yüzeyinin altından geçilmesi gerekmektedir.

b) doğru jeolojik verilerle oluşturulmuş tünel modellemesi ile sayısal analizlerden yararlanılarak tünelin en az destekleme ile geçeceği güzergah oluşturulmalıdır.

c) Tüneli heyelandan uzaklaşmaya çalıştırmak tünel uzunluğunu arttırmaktadır. Dolayısıyla Tünel uzunluğu ile tünel destekleme ihtiyacı arasında bir seçim yapılması gerekmektedir. Buda ancak maliyet hesaplaması ile mümkündür.

T8 Tünelinin 3805 m uzunluğundaki en kısa hattının 3827 m uzunluğundaki en uzun hattına oranla 1.3 daha maliyetli olacağı değerlendirilerek çalışmalar en uzun hatta yapılmış ve T8 Tüneli 2021 yılında tren trafiğine açılmıştır.

Teşekkür

Yazarlar TCDD yetkililerine, Fugro-SIAL ve Yüksel Proje çalışanlarına göstermiş oldukları destekten dolayı teşekkür ederler.

Kaynakça

- [1] *Application of digital track geometry analysis to the planning of tamping and lining/levelling work*, UIC Code 715-1, 2003
- [2] *Recommandations pour la gestion des rails*, UIC Code 715-2, 2003
- [3] E. Poşluk, “Dünyadaki Son Gelişmeler Çerçevesinde Yüksek Hızlı Demiryolu Tünel Tasarımı ve Türkiye’deki Durum,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 15, pp. 13–29, 2022
- [4] J. Hadjigeorgiou, “Understanding managing and communicating geomechanical mining risk,” *Mining Technology*, vol. 129(3), pp. 159-173, 2020
- [5] Y Y. Jiao, X L. Zhang, J. Zhao, “A two-dimensional DDA contact constitutive model for simulating rock fragmentation,” *Journal of Engineering Mechanics—ASCE*, vol. 138 (2), pp. 199–209, 2012.
- [6] J. Torano, R R. Diez, J M R, Rivas Cid, M M C, Barciella, “FEM modeling of roadways driven in a fractured rock mass under a longwall influence,” *Computers and Geotechnics*, vol. 29 (6), pp. 411–431, 2002.
- [7] C. Gokceoglu, E B. Aygar, H A. Nefeslioglu, S. Karahan, S. Gullu, “A geotechnical perspective on a complex geological environment in a high-speed railway tunnel excavation (a case study from Türkiye),” *Infrastructures*, vol. 7(11), pp. 155, 2022.
- [8] E. Temur, A. Aksay, “1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Adapazarı G24 Paftası,” *MTA Yayınları no:31*, 2002.
- [9] E. Poşluk, S. Dalğıç, İ. Kuşku, E A. Poşluk, “Heyelan İslahında Gereken Dayanma Kuvvetinin Limit Denge Yöntemi ile Belirlenmesi” *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, vol. 27(2), pp. 77-88, 2014.
- [10] ISRM, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods*. Kozan Ofset, Ankara. 2007.

- [11] Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi Doğançay Ripajı İlk Kısım proje raporu, Ankara, 2013 (Yayımlanmamış).
- [12] FUGRO-SİAL, “Ankara İstanbul Hızlı Tren Projesi Doğançay Ripajı İlk Kısım 8 nolu tünel değerlendirme raporu” Ankara, 2013 (Yayımlanmamış).
- [13] Ö. Aydan, R. Ulusay, N. Tokashiki, “A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 47, pp. 1255–1276, 2014.
- [14] H. Sönmez, R. Ulusay, “A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies,” *Yerbilimleri*, vol. 26, pp. 77-99, 2002.
- [15] Z T, Bieniawski, *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, p. 251, 1989.
- [16] N. Barton, R. Lien, J. Lunde, “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support,” *Rock Mechanics*, vol. 6, pp. 189-239, 1974.
- [17] E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi, “Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation,” *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 57, pp. 151-160, 2002.
- [18] P M. Kintner, B M. Ledvina, “The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems,” *Adv. Space Res.* vol. 35, pp. 788–811, 2005.
- [19] L K. Napton, E.A. Greathouse, *Archaeological mapping, site grids, and surveying*, Leftcoast Press, Walnut Creek, CA, pp. 177–234, 2009.
- [20] P. Bolstad, *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*, Eider Press, White Bear Lake, MN, 2000.
- [21] I.J., Larsen, D R. Montgomery, O. Korup, “Landslide erosion controlled by hillslope material” *Nature Geoscience*, vol. 3, pp. 247-251, 2010.
- [22] E. Poşluk, “T26 Tünelindeki Sıkışan Kayalarda Tünel Açma Makinesi (TBM) ile Klasik Kazı Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2024.
- [23] ITA, “ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels, Guideline for the Design of Tunnels,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 3, pp. 237-248, 1988.
- [24] M. Panet, J. Sulem, “Convergence-confinement method for tunnel design,” *Gewerbestrasse*, vol. 1, pp.1-151, 2022.
- [25] D., Kolymbas, “The new austrain tunnelling method, Tunnelling and tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling,” *Tunnelling*, pp. 171-175, 2008.
- [26] O C. Zienkiewicz, K. Morgan, “Finite Elements And Approximation,” A Wiley-Interscience Publication, New York, 1983.
- [27] Roclab, 2011, Version 1.032, www.rocscience.com
- [28] B. Ün, A. Yıldız, “Şev Stabilesi Probleminin Geri Analizle Çözümü: Örnek Bir Vaka,” *Journal of Engineering and Science*, vol. 9(1), pp. 174-181, 2021.
- [29] ÖNORM B 2203, Österreichisches Normungsinstitut. ÖNORM B 2203 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm. Wien, 1994.
- [30] RocScience, 2020. Phase2 8.0 User Guide, [Accessed: 17-Nov-2021]. https://www.rocscience.com/downloads/phase2/Phase2_TutorialManual.
- [31] FHWA, Federal Highway Administration, “Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels,” *Civil Elements*, pp. 702, 2009.
- [32] P R. Sheorey, M G. Murali, A. Sinha, “Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38 (1), pp 1211–1216, 2001.
- [33] J M. Duncan, S. G. VVright “Zemin Şevlerinin Duraylılığı,” Çeviren: Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, Ankara, 299 s., 2005.
- [34] M. Incecik, E. Poşluk, “Tunnel T26 on the Ankara–İstanbul high speed rail route–Tunnelling under difficult conditions,” *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 11(5), pp. 434-440, 2018.

Özgeçmiş**Evren POŞLUK**

1981 yılında doğmuştur. Jeoloji Mühendisliği Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Yüksek Lisans Eğitimini Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesinde, Doktora Eğitimini ise İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'da tamamlamıştır. 2011 yılında katıldığı TCDD Yapım Dairesinde yüksek hızlı demiryolu yapım işlerinde görev yapmış, ardından TCDD 1. Bölge Modernizasyon Servis Müdürlüğünde çalışmaya başlamıştır. Kaya mekaniği, tüneller ve şevler konusunda çalışmalar yürütmektedir.

E-Posta: evrenposluk@gmail.com

**Kenan OĞUL**

1981 yılında Eskişehir'de doğdu. İlk ve orta eğitimini Eskişehir'de tamamladı. 1998 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Meslek Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2005 Yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Kocaeli Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Dumlupınar Üniversitesinde Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2009 yılından beri Yüksek Hızlı Demiryolu Yapım işlerinde görev yapmakta olup halen Demiryolu Yapım Dairesi Başkan Yardımcılığı görevini yürütmektedir.

E-Posta: k.ogul@hotmail.com

**Hasan BOZKURT**

1986 yılında Bilecik'te doğdu. 2008 yılında Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2008-2011 yılları arasında Nippon Koei-Temelsu Uluslararası Müşüvirlik Firmasında Sanat Yapıları Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 2011 Yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2017 Yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi-Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Doktora Programından mezun oldu. Bilecik Şeyh Edebali İnşaat Mühendisliği Bölümünden Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: hasan.bozkurt@bilecik.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Evren POŞLUK: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Sayısal analizler ve Yazma-orijinal taslak hazırlama. Kenan OĞUL: Gözden geçirme ve düzenleme. Hasan BOZKURT: Gözden geçirme ve düzenleme.



Raylı Sistemlerde Bir Sanal Kuplaj Uygulaması

Muhammed Mustafa KAYA*¹, Mehmet Turan SÖYLEMEZ*²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*kayam21@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 13.08.2024, Kabul/Accepted: 01.10.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Son yıllarda büyük şehirlerde artan nüfus ile trafik yoğunluğu artmaktadır. Trafik sorunu şehir içi ulaşımı kolaylaştıran raylı sisteme talebi artırmaktadır. Mevcut demiryolu hatları artan bu talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu yüzden yeni raylı sistem hatlarına ihtiyaç vardır. Fakat bu yeni hatlar yüksek yapım maliyetinden dolayı çok uygun değildir. Şehirlerde kullanılan mevcut hatlar genelde Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sinyalizasyon sistemi altında sabit blok veya hareketli blok prensibi kullanılmaktadır. Bu kontrol sistemini geliştirmek ve hat kapasitesini daha fazla arttırmak için yeni sinyalizasyon prensiplerine ihtiyaç vardır. Sanal Kuplaj, 2 veya daha fazla treni fiziksel bağlantı olmadan sanal olarak bağlar veya ayırır. Bu prensibin hattın kapasitesini arttırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, literatürdeki sanal kuplaj çalışmalarından farklı olarak, Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolü kullanılarak bir sanal kuplaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Araçtan araca (V2V) iletişim yoluyla yapılan kontrolde sanal kuplaj senaryoları için simülasyonlar yapılmıştır. Lider ve takipçi tren topolojisi ile tasarlanan senaryoların simülasyon sonuçlarına bakıldığında sanal kuplajın trenler arası mesafeyi kısalttığı görülmüştür. Ayrıca, önerilen kontrolör lider ve takipçi trenlerin hızlarını eşitlemiştir. İlk senaryoda trenler istenilen mesafe değerine 60 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. İkinci senaryoda takipçi trenin başlangıçta olduğu gibi yine istenilen pozisyona ve hıza 50 saniye civarında ulaştığı görülmektedir. Son senaryoda ise iki tren arasındaki mesafe istenilen değere 180 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sanal Kuplaj, Raylı Sistem, Sinyalizasyon, Hat Kapasitesi, CBTC, PID

A Virtual Coupling Application in Railway Systems

Abstract: In recent years, the traffic density has increased with the increasing population in big cities. The traffic problem increases the demand for the rail system that facilitates urban transportation. Existing railway lines may be insufficient to meet this increasing demand. Therefore, new rail system lines are needed. However, these new lines are not very suitable due to their high construction costs. Existing lines used in cities generally use the fixed block or moving block principle under the Communication Based Train Control (CBTC) signaling system. New signaling principles are needed to improve this control system and further increase the line capacity. Virtual Coupling connects or separates 2 or more trains virtually without a physical connection. There are studies showing that this principle increases the capacity of the line. In this study, unlike the virtual coupling studies in the literature, a virtual coupling study was carried out using Proportional-Integral-Derivative (PID) control. Simulations were made for virtual coupling scenarios in the control made via vehicle-to-vehicle (V2V) communication. When the simulation results of the scenarios designed with the leader and follower train topology are examined, it is seen that virtual coupling shortens the distance between trains. Moreover, the proposed controller has equalized the speeds of the leader and follower trains. In the first scenario, the trains reached the desired distance value around 60 seconds and the speeds were equalized. In the second scenario, the follower train is seen to reach the desired position and speed again around 50 seconds as it was at the beginning. In the last scenario, the distance between the two trains reached the desired value around 180 seconds and the speeds were equalized.

Keywords: Virtual coupling, Railway system, Signaling, Line capacity, CBTC, PID

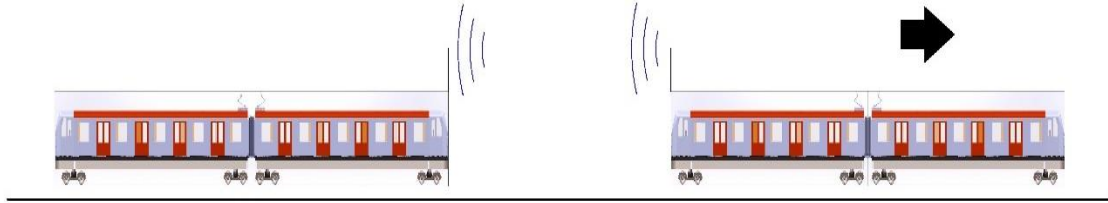
Atıf için/Cite as: M.M. Kaya, M.T. Söylemez, "Raylı sistemlerde bir sanal kuplaj uygulaması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 27-38, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1532577

1. Giriş

Büyük şehirlerde son yıllarda nüfus artmaktadır. Artan nüfus şehir içinde bazı sorunlar oluşturmaktadır. Bu sorunların başında trafik gelmektedir. Artan trafik ile ulaşım sorunu, çevre kirliliği ve gürültü kirliliği gibi sorunlar oluşmaktadır. Bu sorunlardan dolayı trafik problemi farklı ulaşım yöntemlerine ilgiyi arttırmıştır. Raylı sistemler trafik sorununu azaltan uygun bir yöntemdir. Fakat mevcut olan demiryolu hatları artan talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Mevcut raylı sistem hatları dışında yeni hatlar inşa etmek yüksek maliyetlidir. Bu yüzden mevcut hatların hat kapasitesini arttırmak daha ekonomik bir çözüm olacaktır.

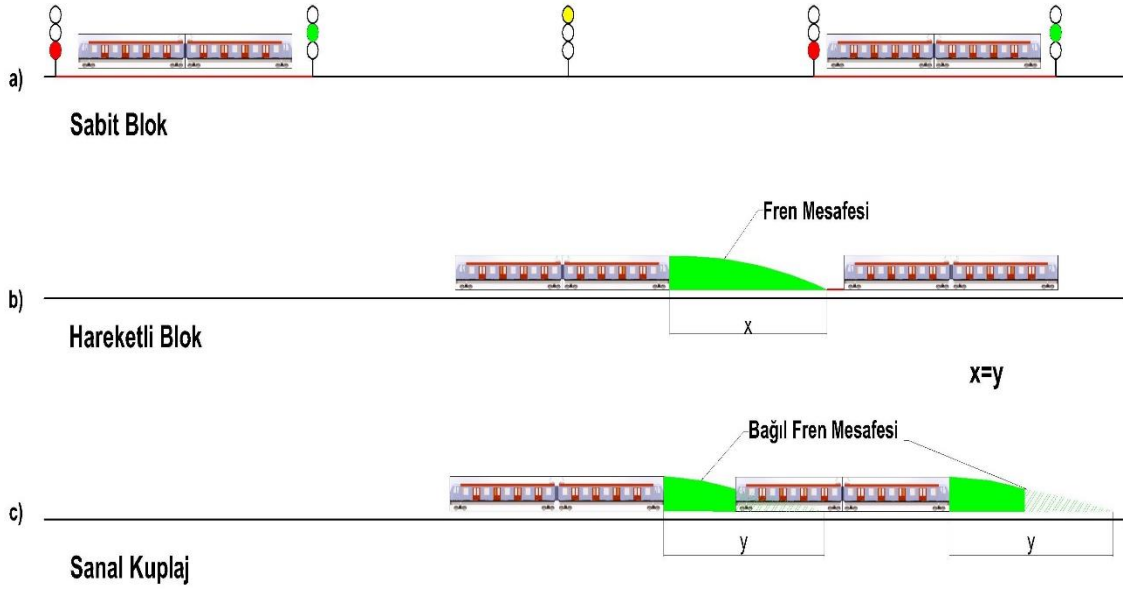
Günümüzde kent içi raylı sistemlerinde genellikle Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol (CBTC) sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır [1]. Bu kontrol sistemi sabit blok ve hareketli blok prensiplerine göre çalışmaktadır. CBTC sistemi altında kullanılan diğer sistemler mevcuttur. Bunlar Otomatik Tren Koruma (ATP), Otomatik Tren İşletimi (ATO), Otomatik Tren Kontrol (ATC) ve Otomatik Tren Denetleme (ATS)'dir.

Artan nüfus sebebiyle mevcut hatların kapasitesini arttırmak için mevcut sinyalizasyon sistemlerini geliştirmeye ihtiyaç vardır. Avrupa Ufuk 2020 kapsamında Shift2Rail Ortak Girişiminde geliştirilmesi gereken konulardan olan Sanal Kuplaj prensibi şehir içinde artan nüfus talebini karşılayacak bir prensiptir [2]. Sanal Kuplaj 2 veya daha fazla treni kendi arasında fiziksel bir bağlantı olmadan bağlar veya ayırır. Bu yeni prensip ile öndeki yani lider tren arkadaki yani takipçi trene anlık olarak konum, hız ve ivme bilgilerini iletir. Takipçi trende bu bilgiler ile hızını ayarlayarak öndeki trene yaklaşır. Böylece trenler arası mesafe ve süre (headway) daha kısalmır. Mevcut demiryolu hattında daha fazla tren işletilebilir. Böylelikle mevcut demiryolu hat kapasitesi iyileşmiş olur. Şekil 1'de sanal kuplajın haberleşme gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 1. Sanal kuplaj haberleşme gösterimi

Demiryollarındaki hat kapasitesi problemi için sanal kuplaja yönelik literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler ve sonuçlarından bazıları aşağıdaki metinde bahsedilmektedir. Bu çalışmada literatürde bulunan sanal kuplaj çalışmalarından farklı olarak PID denetleyicisi ile sanal kuplaj çalışması yapılacaktır. Matlab ortamında yapılan simülasyon çalışmalarında farklı senaryolarda 2 trenin durumları incelenmiştir. Şekil 2'de kullanılmakta olan sinyalizasyon sistem prensipleri ve sanal kuplaj prensip gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2. Sinyalizasyon sistem prensipleri gösterimi a) Sabit blok prensibi b) Hareketli blok prensibi c) Sanal kuplaj prensibi

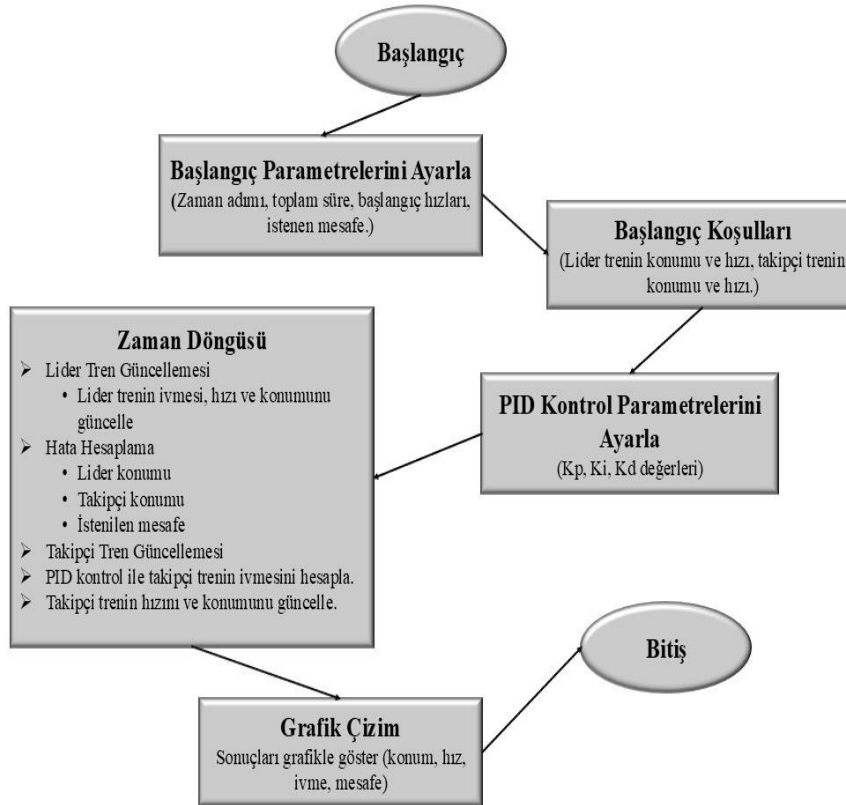
Sanal kuplaj prensibi üzerine yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki paragrafta detaylandırılmaktadır.

Göreceli Mesafe Frenleme Modu (GMFM) ve Mutlak Mesafeli Frenleme Modu (AMFM) karşılaştırıldığında, GMFM tabanlı yaklaşımın daha verimli olduğu ve hat kapasitesini yaklaşık %70,23 oranında artırdığı tespit edilmiştir [3]. Bir diğer çalışmada, yüksek hızlı trenler, ana hat trenleri, bölgesel trenler, kentsel trenler ve yük trenleri üzerinde yapılan incelemelerde, sanal kuplajın hareketli blok sistemine göre daha yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [4]. Tren Koruma Uyarı Sistemi (TPWS), ETCS 2 ve ETCS 3 ile Araçtan Araca (V2V) iletişim mimarisi olan sanal kuplajın gerçek hat üzerindeki bir simülasyon çalışmasında, trenler arası mesafenin sırasıyla %79, %77 ve %43 oranında azaldığı bulunmuştur [5]. Bir diğer çalışmada, metro hattında merkezi olmayan bir Model Kestirimli Kontrol (MPC) yöntemi ile sanal kuplaj kullanılarak yapılan simülasyon, hareketli blok ve diğer kontrol yaklaşımlarına kıyasla trenler arasındaki mesafeyi önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada, sanal kuplajın metro hatlarında otomatik tren kontrolü için merkezi olmayan bir model tahminli kontrol sistemi tasarlanmış ve iki farklı senaryoda trenlerin istenen duruma kendilerini otomatik olarak ayarladığı gözlemlenmiştir [7]. Çin'deki gerçek bir hat verileri kullanılarak yapılan bir çalışmada simüle edilen trenlerin sanal kuplaj kullanarak hat kapasitesini artırdığı ve artan tren sayısı sayesinde yolcu konfor oranının da yükseldiği belirtilmiştir [8]. Çin'de yapılan bir başka çalışmada bir metro treninde ATC, ATP ve ATO sistemlerinden yararlanılarak sanal kuplaj yönteminin kullanıldığı ve bu sayede istasyonda gereksiz bekleme süresinin %90,7 oranında azaldığı ve hat kapasitesinin %4,9 oranında arttığı tespit edilmiştir [9]. Sanal kuplajı ERTMS/ETCS bağlamında tanıtan bir çalışmada, ETCS çalışma modları olan Tam Denetim (FS) ve Kısmi Denetim (PS) üzerinden Tam Denetim Sanal Kuplaj (FSVC) şeklinde yeni bir çalışma modu sunularak yapılan analizde gecikme sürelerinin azaldığı ve hattaki tren sayısının arttığı görülmüştür [10]. Rusya'daki bir hatta yapılan bir diğer çalışmada, sabit blok ve sanal kuplaj ile 2 trenin hat verimi karşılaştırıldığında, sanal kuplaj ile trenler arası mesafenin 1500 metreye kadar düştüğü ve hat veriminin %19,05 oranında arttığı tespit edilmiştir [11]. Son olarak, Pekin-Şangay hızlı treninin bir bölümünde sanal kuplaj için tren işletim kontrolü ve kazaları önleme amacıyla yerel lider-takipçi uygulama şeması önerilmiş ve trenlerin minimum takip mesafesi ile öngörülen takip mesafesi hesaplanarak en iyi performans için en fazla dört tren önerilmiştir [12].

Bu makale beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı, önemi, konuyla ilgili literatür taraması, mevcut araştırmalar ve bu çalışmaların literatüre katkıları gibi unsurları içeren giriş kısmı sunulmaktadır. İkinci bölümde, araştırmada kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde kullanılan parametreler tanıtılmaktadır. Dördüncü bölümde, araştırma sonuçları grafiklerle desteklenmiş olarak sunulmakta ve bu bulgular üzerine tartışmalar yapılmaktadır. Son olarak, beşinci bölümde, çalışmanın bulguları değerlendirildikten sonra gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunmaktadır.

2. Yöntem

Bu bölümde tren hareketinin konum ve hız hesaplaması için formüller verilmiştir. Bu çalışmada, bir lider ve bir takipçi tren arasındaki dinamik etkileşim, Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol mekanizması kullanılarak sanal kuplaj için belirlenen senaryolar altında simüle edilmiştir. PID kontrolör devamlı olarak sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı yani hata değerini hesaplayarak buna bağlı bir çıkış üretir [13]. Kontrolörde bulunan oransal (P) bileşen, mevcut hataya bağlı bir çıkış üretir. İntegral (I) bileşeni, hatanın toplam değeri ile ilgili bir çıkış üretir ve sürekli haldeki hataları düzeltir. Türev (D) bileşeni ise sistemin gelecekteki davranışını tahmin ederek sistemin geçici hal yanıtının düzeltilmesine yardımcı olur. Bu üç bileşenin birleşimi, geniş bir yelpazedeki kontrol problemleri için etkili ve esnek bir çözüm sunar. Şekil 3'te sanal kuplaj uygulaması akış diyagramı gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3. Sanal kuplaj uygulaması akış diyagramı

Hata değeri, takipçi trenin lider trene olan gerçek mesafesinin, hedeflenen mesafeden ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder. PID kontrolörü, bu hatayı kullanarak, hata değerine orantılı bir şekilde (P-Oransal), hatanın zaman içindeki toplamına bağlı olarak (I-İntegral) ve hatanın zamana göre değişim hızına bağlı olarak (D-Türev) bir kontrol sinyali $u(t)$ üretir. Bu kontrol sinyali, takipçi trenin ivmesini ayarlayarak lider tren ile arasındaki mesafeyi hedeflenen değere

getirmek için kullanılır. Pozitif bir hata değeri, takipçi trenin liderden daha uzakta olduğunu ve bu mesafeyi azaltması gerektiğini gösterirken, negatif bir hata değeri, takipçi trenin lider trene hedeflenen mesafeden daha yakın olduğunu ve mesafeyi artırması gerektiğini gösterir. PID kontrolörü, sistem çıktısını istenen referans değerlere ulaşacak şekilde otomatik olarak ayarlar. Bu şekilde, lider ve takipçi trenler arasındaki mesafe, PID kontrolörü kullanılarak istenen mesafede tutulur ve trenler arasında sanal kuplaj sağlanır.

PID kontrolü için aşağıdaki formüller, PID kontrolörünün, sistem çıktısını istenen referans değere ulaştırmak için nasıl çalıştığını matematiksel olarak gösterir. Hız hesaplaması için (Denklem (1)) tanımlanmaktadır.

$$dV = a * dt \quad (1)$$

Bu denklemde dV hızda oluşan fark, a ivme ve dt geçen zamandır. Alınan yol hızı ve geçen zamana bağlıdır. Yol denklemi (Denklem 2) ile tanımlanabilmektedir.

$$dx = V * dt \quad (2)$$

Bu denklemde dx trenin toplam ilerlediği yol, V hızı ve dt zamandır. Buradan sanal kuplaj için bir hata mesafesi denklemi (Denklem (3)) elde edilir.

$$e(t) = (x_{lider}(t) - x_{takipci}(t)) - d_{hedef} \quad (3)$$

Bu denklemde e(t) zamana bağlı olarak hesaplanan hata değeri, $x_{lider}(t)$ zamana bağlı lider trenin konumu ve $x_{takipci}(t)$ zamana bağlı takipçi trenin konumudur. Integral bileşeni, hata teriminin zaman içindeki toplamını alarak uzun süreli hatalara karşı düzeltme yapar. Bu, sistemdeki sürekli hal hatasını düzeltmeye yardımcı olur ve sistem çıkışının istenen değere ulaşmasını sağlar. İntegral hesaplama denklemi (Denklem (4)) ile tanımlanmaktadır.

$$I(t) = I(t - 1) + e(t) * dt \quad (4)$$

Bu denklemde I(t) zamana bağlı olarak hesaplanan integral değeri, I(t-1) önceki adımda hesaplanan integral değeri, e(t) mevcut hata ve dt zaman adımıdır. Türev bileşeni, hatanın zamana göre değişim hızını hesaplar. Bu, sistemdeki ani değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verilmesini sağlar ve aşırı salınımların önlenmesine yardımcı olur. Türev hesaplama denklemi (Denklem (5)) ile tanımlanmaktadır.

$$D(t) = (e(t) - e(t - 1)) / dt \quad (5)$$

D(t) zamana bağlı olarak hesaplanan türev değeri, e(t) ile e(t-1) sırasıyla mevcut ve önceki hata değerleri ve dt zaman adımıdır. PID çıkışı, oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) bileşenlerin toplamıdır ve sistem üzerinde uygulanacak olan kontrol sinyalini temsil eder. PID çıkışı (Denklem (6)) ile tanımlanmaktadır.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * I(t) + K_d * D(t) \quad (6)$$

Bu denklemde u(t) kontrol sinyali, K_p , K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançlar ve e(t), I(t) ve D(t) sırasıyla hata, integral ve türev değerleridir.

3. Simülasyon Verileri

Trenlerin hareketlerini PID kontrolü ile simüle etmek için Matlab programı kullanılmıştır. Bu kod yazılımında bir lider tren ile bir takipçi tren arasındaki mesafeyi ve hızlarını PID kontrolörü

kullanarak simüle edilmiştir. Simülasyonda trenler belirlenen hız ve ivme sınırlamaları ile hareketi sağlanacaktır. Bu simülasyon çalışması için farklı senaryolar belirlenmiştir. Belirlenen senaryolar için aynı tipte 2 tren aracı kullanılmıştır. Simülasyon parametrelerine göre trenlerin hareketleri incelenmiştir. 3 farklı senaryoda incelenen simülasyon parametreleri alt başlıklarda verilmiştir.

3.1. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryosu

İlk senaryo olan İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj senaryosunda, başlangıçta farklı hız ve farklı konumda olan trenlerin benzetimi yapılmıştır. Lider tren sabit bir hızla ilerlerken, başlangıçta durağan halden hızlanan takipçi tren hızını ve konumunu PID kontrolörü ile ayarlayarak istenen mesafe ve hızda korumasını sağlar. İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj Senaryosu, parametre değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 2. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryo parametreleri

Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	72	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	54	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe (hata)	200	m
2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	500	m
Lider Tren Hedef Hız	Sabit	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Maksimum İvme	1,2	m/sn ²
Minimum İvme	-1.2	m/sn ²
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID K _p Değeri	1	
PID K _i Değeri	0,01	
PID K _d Değeri	5	

3.2. Fren manevrası senaryosu

Fren Manevrası senaryosu, başlangıçta aynı hız ve istenen konumda olan 2 trenin frenleme durumunu simüle eder. Lider tren hareketinden belirli bir zaman sonra hızını azaltmaya başlar. Takipçi tren, liderle arasındaki mesafeyi istenen seviyede tutmak ve hızları eşitlemeye çalışmak için PID kontrolü ile hızını azaltmaya başlar. Fren manevrası senaryosu, parametre değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 4. Fren manevrası senaryo parametreleri

Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe	200	m

2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	200	m
Lider Tren Hedef Hız	10	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Lider Tren Fren Başlangıç Zamanı	20	sn
Maksimum İvme	1,2	m/sn ²
Minimum İvme	-1.2	m/sn ²
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID Kp Değeri	1	
PID Ki Değeri	0,01	
PID Kd Değeri	5	

3.3. Hatta sanal kuplaj senaryosu

Hatta Sanal Kuplaj senaryosu, başlangıçta farklı konum ve hızlarda bulunan 2 trenin hareketini simüle eder. Bu senaryo daha gerçekçi parametreler içerir. Diğer senaryolardan farklı olarak lider tren değişen ivme ve farklı başlangıç koşulları ile hareket etmektedir. Bu hareket için belirlenen bir saniyede lider tren hızını artırır. Artan hız istenen hedef hıza ulaştığında sabit ilerler. Takipçi tren başlangıçta aralarında olan mesafe ve hızı kapatmaya çalışırken lider trenin değişen ivmesini de hesaba katar. Lider tren ile aralarındaki mesafeyi istenen mesafede tutmaya ve hızı eşitlemeye çalışır. Hatta sanal kuplaj senaryosu, parametre değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 6. Hatta sanal kuplaj senaryo parametreleri

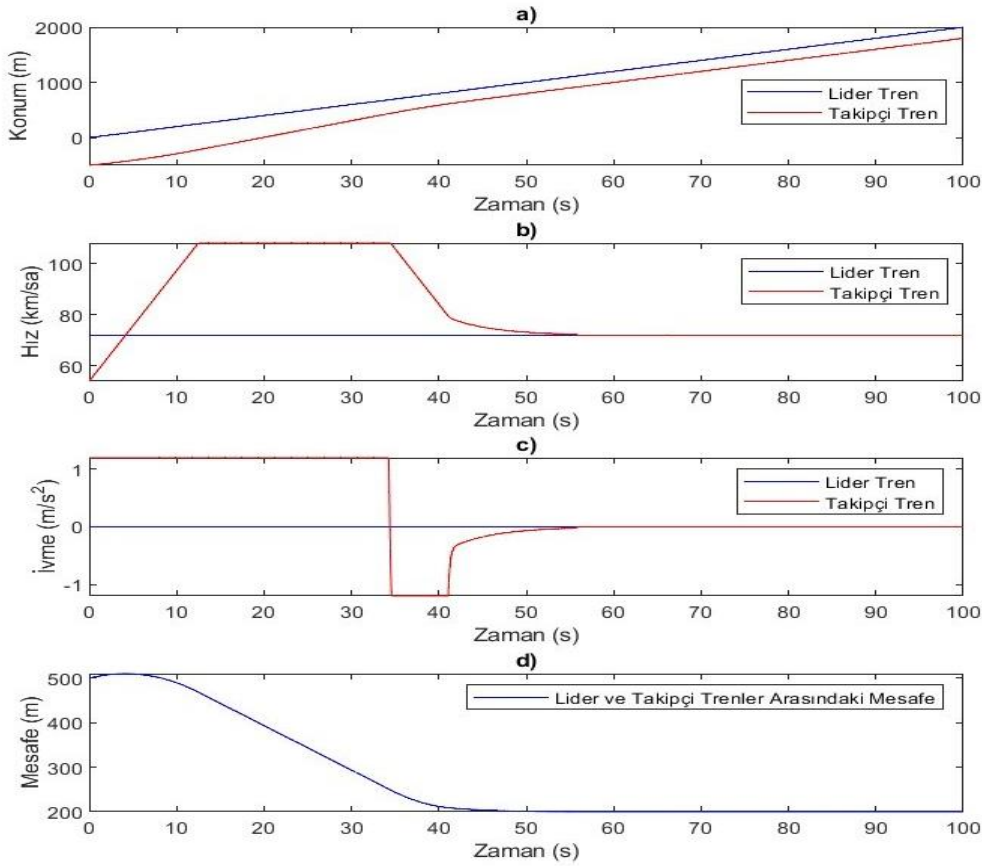
Parametreler	Değerler	Birim
Lider Tren Başlangıç Hızı	20	km/sa
Takipçi Tren Başlangıç Hızı	15	km/sa
2 Tren Arası Hedef Mesafe	200	m
2 Tren Arası Başlangıç Mesafesi	400	m
Lider Tren Hedef Hız	25	km/sa
Takipçi Tren Hedef Hız	Liderin Hızı	km/sa
Lider Tren Hızlanma Zamanı	10	
Maksimum İvme	1,2	m/sn ²
Minimum İvme	-1.2	m/sn ²
Lider Tren Hızlanma İvmesi	1	m/sn ²
Maksimum Hız	30	km/sa
Minimum Hız	10	km/sa
PID Kp Değeri	1	
PID Ki Değeri	0,01	
PID Kd Değeri	5	

4. Bulgular

Belirlenen senaryolarda elde edilen simülasyon sonuçları alt başlıklarda verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ele alınan senaryolarda PID kontrolör kullanılarak 2 tren arasında sanal kuplajın sağlanabildiği görülmektedir.

4.1. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryosu

İlk senaryo olan “İstasyon Çıkışında Sanal Kuplaj” ile sabit hızla hareket eden lider tren ile istenen mesafeyi ayarlamaya ve aynı hıza ulaşmaya çalışan ve bir istasyondan harekete başladığı varsayılan takipçi trenin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir. Sonuç grafikleri değerlendirildiğinde 60. saniye civarında 2 tren arası mesafe istenen değere ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Sanal kuplaj bu senaryo çerçevesinde sağlanmıştır. Sonuçlar, Şekil 4’te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve mesafe-zaman grafikleri olarak verilmiştir.

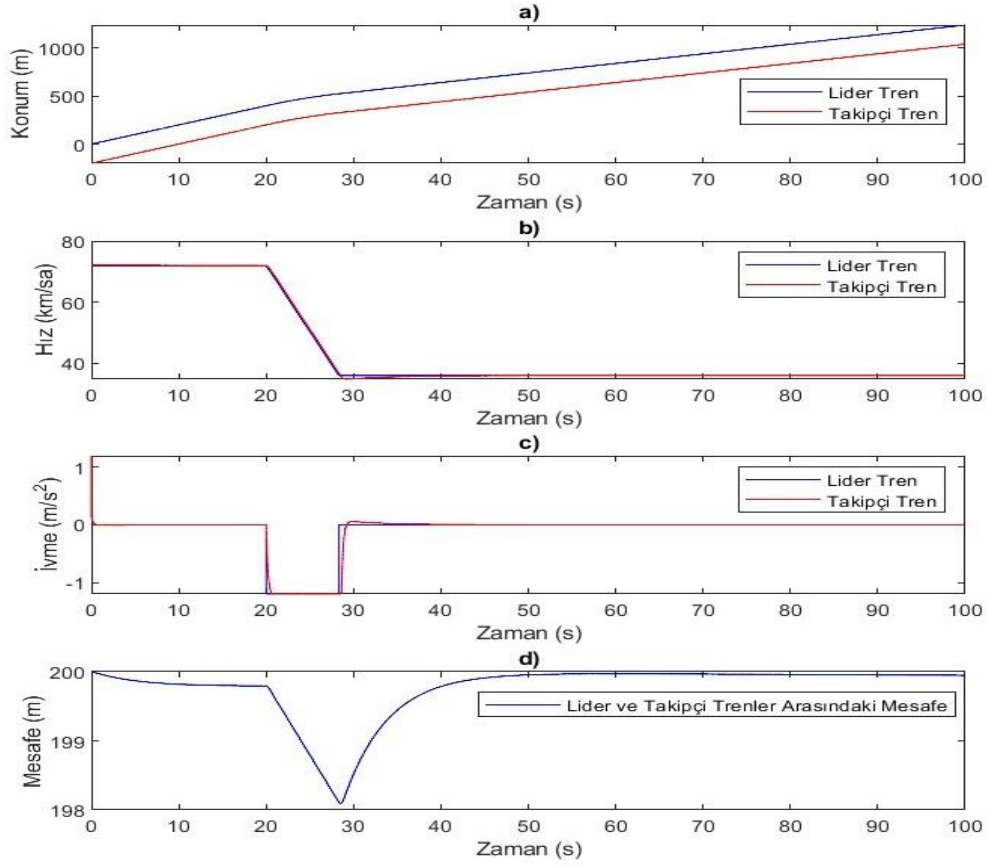


Şekil 4. İstasyon çıkışında sanal kuplaj senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

4.2. Fren manevrası senaryosu

İkinci senaryo olan “Fren Manevrası” ile aynı hız ve istenen konumda hareket eden trenlerden lider trenin frenleme yaparak yavaşlaması halinde takipçi trenin bu değişen harekete uyumu simüle edilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında takipçi trenin 50. saniye civarında istenen konuma ve hıza başlangıçta olduğu gibi tekrar ulaştığı görülmektedir. Sonuçlar, Şekil 5’te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve

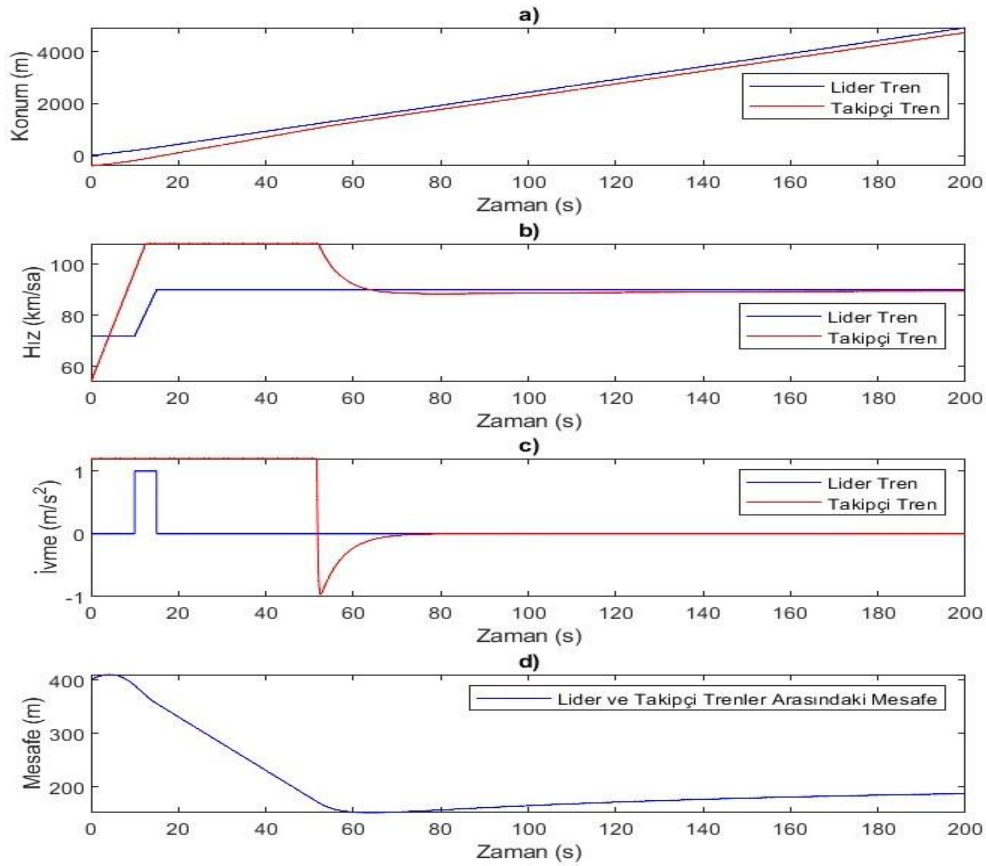
mesafe-zaman grafikleri olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Fren manevrası senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

4.3. Hatta sanal kuplaj senaryosu

Son senaryo olan “Hatta Sanal Kuplaj” ile farklı hızlarda ve farklı konumlarda hareket eden trenlerden lider trenin ivmeli hız değişimine takipçi trenin uyumu simüle edilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Çıkan grafiklere bakıldığında 180. saniye civarında 2 tren arası mesafe istenen değere ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Sonuçlar, Şekil 6'te konum-zaman, hız-zaman, ivme-zaman ve mesafe-zaman grafikleri olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Hatta sanal kupaaj senaryo grafikleri a) Konum-zaman grafiği b) Hız-zaman grafiği c) İvme-zaman grafiği d) Mesafe-zaman grafiği

5. Sonuç

Bu çalışma, raylı sistemlerde sanal kupaaj sinyalizasyon prensibi uygulanması için endüstride sıklıkla kullanılan PID kontrolör yapısının kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Sanal kupaaj mevcut raylı sistemlerdeki sınırlamaları azaltarak trenler arasındaki mesafeyi azaltmaktadır.

Matlab yazılımında yapılan simülasyonlar, sanal kupaajın etkinliğini değerlendirmek için tasarlanmıştır. PID kontrolörü kullanılarak lider ve takipçi trenler arasındaki mesafe hedeflenen değerde tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, sanal kupaajın başarılı bir şekilde sağlanarak trenlerin sanki aralarında fiziksel bir kupaaj varmış gibi hareket edebildiklerini göstermiştir. Önerilen PID kontrolör yapısı trenler arasındaki mesafeyi istenen değere getirmek ile kalmayıp aynı zamanda sürekli halde iki tren arasındaki hız farkını da ortadan kaldırarak trenlerin aynı hızda seyretmelerini sağlamıştır. Sistemin yanıt süreleri bu takip işleminin emniyetli bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir.

İlk senaryoda, trenler istenilen mesafe değerine 60 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. İkinci senaryoda, takipçi trenin başlangıçta olduğu gibi yine istenilen pozisyona ve hıza 50 saniye civarında ulaştığı görülmüştür. Son senaryoda ise iki tren arasındaki mesafe istenilen değere 180 saniye civarında ulaşmış ve hızlar eşitlenmiştir. Bu sonuçlar, sistemin farklı koşullarda ve hız profillerinde dahi trenler arası mesafeyi istenilen mesafede düzenleyebildiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma bir simülasyon ortamında hazırlanmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar için gerçek hat üzerinde denenmesi gerekir.

Bu çalışmanın sonuçları, sanal kupaajın demiryolu sistemlerinde potansiyel olarak önemli bir rol

oynayabileceğini göstermektedir. Daha fazla inceleme ve saha testleri, bu hızla gelişen değişen teknolojinin reel dünya uygulamalarında etkinliğini daha detaylı bir biçimde değerlendirebilir ve demiryolu ağlarının verimliliğini artırabilir. Önümüzdeki çalışmalarda farklı ve daha gerçekçi senaryolarda sanal kuplaj sinyalizasyon prensibi için simülasyon çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] *IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*, IEEE Std 1474.1-2004 (Revision of IEEE Std 1474.1-1999), 2004. doi: 10.1109/IEEESTD.2004.95746
- [2] Shift2Rail Joint Undertaking, "Multi-Annual Action Plan," 2015. [Online]. Available: https://www.shift2rail.org/wp-content/uploads/2013/07/MAAP-final_final.pdf. [Accessed 26-Nov-2015]
- [3] S. Su, W. Liu, Q. Zhu, R. Li, T. Tang, and J. Lv, "A cooperative collision-avoidance control methodology for virtual coupling trains," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 173, 2022, Art. no. 106703. doi: 10.1016/j.aap.2022.106703
- [4] J. Aoun, E. Quaglietta, R. M. P. Goverde, M. Scheidt, M. Blumenfeld, A. Jack, and B. Redfern, "A hybrid delphi-AHP multi-criteria analysis of moving block and virtual coupling railway signalling," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 129, 2021, Art. no. 103250. doi: 10.1016/j.trc.2021.103250
- [5] E. Quaglietta, M. Wang, and R. M. P. Goverde, "A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 15, 2020, Art. no. 100195. doi: 10.1016/j.jrtpm.2020.100195
- [6] J. Félez, Y. Kim, and F. Borrelli, "A model predictive control approach for virtual coupling in railways," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, pp. 2728–2739, 2019. doi: 10.1109/TITS.2019.2914910
- [7] X. Luo, H. Liu, L. Zhang, and J. Xun, "A model predictive control based inter-station driving strategy for virtual coupling trains in railway system," in *Proc. IEEE Int. Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Indianapolis, IN, USA, 2021, pp. 3927–3932. doi: 10.1109/ITSC48978.2021.9564895
- [8] Z. Qianqian and W. Hongwei, "A multi-train cooperative control method of urban railway transportation based on artificial potential field," in *Proc. Chinese Autom. Congr. (CAC)*, Hangzhou, China, 2019, pp. 1350–1355. doi: 10.1109/CAC48633.2019.8997212
- [9] M. Chai, H. Wang, T. Tang, J. Chai, and H. Liu, "A relative operation-based separation model for safe distances of virtually coupled trains," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, 2023. doi: 10.1109/TIV.2023.3301009
- [10] F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone, A. Petrillo, S. Santini, and V. Vittorini, "Towards railway virtual coupling," in *Proc. IEEE Int. Electr. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propulsion Road Veh. Int. Transp. Electric. Conf. (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607523
- [11] V. Olentsevich, V. Konyukhov, A. Olentsevich, and D. Lysenko, "Efficiency of implementation of interval traffic regulation by the virtual coupling system on the section of the railway line in the framework of the digital railway project," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1661, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012106
- [12] Y. Cao, J. Wen, and L. Ma, "Tracking and collision avoidance of virtual coupling train control system," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 120, pp. 76–90, 2021. doi: 10.1016/j.future.2021.02.014.
- [13] Wikipedia katılımcıları, "PID," 2024. [Online]. Available: <https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=PID&oldid=31190908>. [Accessed: 20-Ağu-2024]

Özgeçmiş**Muhammed Mustafa KAYA**

1998 yılında Malatya’da doğdu. Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü’nde tamamlamıştır. Yüksek lisans öğrenimine İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı’nda devam etmektedir. TCDD Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. Firmasında Sinyalizasyon Mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: kayam21@itu.edu.tr

**Mehmet Turan SÖYLEMEZ**

İTÜ Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden lisans (1991), Manchester Üniversitesi’nden yüksek lisans (1994) ve doktora (1999) derecelerini almıştır. Bir kitap, 25 bilimsel dergi makalesi ve 150’den fazla ulusal ve uluslararası bildirinin yazarıdır. Tamamlanmış 8 adet doktora ve 43 yüksek lisans tezine danışmanlık yapmıştır. Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi genel sekreterliği, İTÜ Raylı Sistemler Ana Bilim Dalı Başkanlığı, IEEE CBTC Standart Komisyonu üyeliği, İTÜ Arı Teknokent’te kurulu olan HI-SIM Teknoloji Mühendislik Ltd. Şti. Genel Müdürlüğü gibi değişik görevleri yürütmektedir.

E-Posta: soylemezm@itu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Muhammed Mustafa KAYA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mehmet Turan SÖYLEMEZ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol, Gözden geçirme ve düzenleme.



Demiryollarında Araç Kaynaklı Yol Yüklerinin Belirlenmesi İçin Ölçüme Dayalı Hesaplamalı Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Simülasyon Ortamında Analizi

Nihat BULDUK^{1,2}, Muzaffer METİN^{*2}, Deren MARABAOĞLU^{*2}

¹ İstanbul Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*mmetin@yildiz.edu.tr

(Alınış/Received: 31.07.2024, Kabul/Accepted: 16.09.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Demiryolu taşıtlarının hareketi sırasında, taşıtın hızı, kütlesi, tekerlek, ray ve yol geometrisi, sürtünme katsayısı gibi parametrelerin etkisiyle tekerlek-ray temas bölgesinde raylara dinamik bir etki oluşmaktadır. Raya yanal ve düşey yönde etkiyen bu kuvvetler rayı tasarım geometrisinden sapmaya zorlar ve derayman riski doğurur. Özellikle kurplarda meydana gelen yanal kuvvetler deraymanın en büyük sebeplerindedir. Bu nedenle raylara etkiyen tekerlek kuvvetlerinin anlık olarak takip edilebilmesi özellikle demiryollarını ilk hizmete alırken oldukça önemlidir. Ayrıca, demiryollarında zamanla yaşanan deformasyonlar nedeniyle ortaya çıkabilecek deraymanın önüne geçmek için yol bakım çalışmalarının zamanında yapılması hayati öneme sahiptir. Doğru ve etkin bakım çalışması yapabilmek için de raya etkiyen kuvvetlerin periyodik olarak izlenmesi önemlidir. Bu çalışmada, raya etkiyen yanal ve düşey kuvvetlerin anlık olarak belirlenebilmesi için, araç üzerinden yapılacak çeşitli ölçümlerle elde edilecek verilerin çeşitli hesaplamalarla işlenerek kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılacak hesaplama denklemleri Newton'un ikinci yasası kullanılarak elde edilmiştir. Denklem içerisinde işlenecek değişkenler ise süspansiyon sapsmaları, boji gövdesi ve tekerlek seti ivmeleri gibi anlık değişen parametrelerdir. Araç üzerinde ölçülen bu ve benzeri verilerin denklemlerde kullanılması sonucu raya etkiyen yanal ve düşey kuvvetlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Saha testleri öncesinde oluşturulan metodun doğruluğunu araştırmak için profesyonel projelerde ve akademide yaygın olarak kullanılan SIMPACK çoklu gövdeli dinamik simülasyon yazılımında aynı araç ve yol modeli oluşturulmuştur. Aynı zamanda, analitik metotla geliştirilen dinamik denklemler MATLAB/Simulink programında modellenmiştir. Her iki model (analitik ve sayısal) ile yapılan eş simülasyonlar sonucunda elde edilen düşey ve yanal tekerlek temas kuvvet çıktıları, geliştirilen denklemlerin tutarlı olup olmadığını görmek amacıyla karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda taşıtın 60 km/sa hızla düz yolda ilerlediği ve aynı hızla 200 metre yarıçaplı 14 cm dever yüksekliğe sahip bir kurptan geçtiği varsayılmıştır. Her iki modelden elde edilen simülasyon çıktıları karşılaştırıldığında, düz yolda yanal ve düşey tekerlek temas kuvvetlerinin %99'un üzerinde, kurpta ise yanal tekerlek temas kuvvetinin %94'ün ve düşey tekerlek temas kuvvetlerinin de %97'in üzerinde tutarlı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, geliştirilen denklemlerin içerisinde kullanılan değişkenlerin saha ölçümlerinde araç üzerinden ölçülebilecek nitelikte olduğu ortaya konmuştur. Bu bakımdan, literatüre şerh içi demiryolu hatlarında araçlardan raylara etkiyen kuvvetlerin anlık olarak izlenebilmesini sağlayan uygulanabilir bir yöntem kazandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Ray Kuvveti İzleme, Ray Yüğü, Kurp Analizi, Derayman, Yol Bakımı

Development of a Measurement-Based Computational Method for Determination of Vehicle-Induced Road Loads on Railways and Its Analysis in a Simulation Environment

Abstract: During the movement of railway vehicles, a dynamic effect occurs on the rails in the wheel-rail contact zone due to the effect of parameters such as vehicle speed, mass, wheel, rail and road geometry and friction coefficient. These forces acting on the rail in lateral and vertical directions force the rail to deviate from its design geometry and cause the risk of derailment. Especially the lateral forces occurring in curves are one of the biggest causes of derailment. For this reason, it is very important to be able to monitor the wheel forces acting on the rails instantaneously, especially when the railways are first put into service. In

Atıf için/Cite as: N. Bulduk, M. Metin, D. Marabaoğlu, "Demiryollarında araç kaynaklı yol yüklerinin belirlenmesi için ölçüme dayalı hesaplamalı bir yöntemin geliştirilmesi ve simülasyon ortamında analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 39-60, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1525811

addition, it is vital that track maintenance works are carried out in a timely manner in order to prevent derailment that may occur due to deformations in railways over time. In order to perform accurate and effective maintenance work, it is important to periodically monitor the forces acting on the rail. In this study, a new method has been developed to determine the lateral and vertical forces acting on the rail instantaneously by processing the data to be obtained from various measurements on the vehicle with various calculations. The calculation equations to be used in this method are obtained using Newton's second law. The variables to be processed in the equation are instantaneously changing parameters such as suspension deflections, bogie body and wheel set accelerations. By using such data measured on the vehicle in the equations, it is aimed to determine the lateral and vertical forces acting on the rail. In order to investigate the accuracy of the method before the field tests, the same vehicle and track model was created in SIMPACK multi-body dynamic simulation software, which is widely used in professional projects and academia. At the same time, the dynamic equations developed by the analytical method were modeled in MATLAB/Simulink. The vertical and lateral wheel contact force outputs obtained from the simulations with both used models (analytical and numerical) were compared to see if the developed equations are consistent. In the simulations, it is assumed that the vehicle travels on a straight track at a speed of 60 km/h and passes through a curve with a radius of 200 meters and a 14 cm superelevation height at the same speed. When the simulation outputs obtained from both models are compared, it is seen that consistent results are obtained over 99% for lateral and vertical wheel contact forces on the straight road, 94% for lateral wheel contact force and 97% for vertical wheel contact force on the curve. In addition, it has been demonstrated that the variables used in the developed equations can be measured on the vehicle in field measurements. In this respect, a feasible method that enables instantaneous monitoring of the forces acting on the rails from vehicles on urban railway lines has been introduced to the literature.

Keywords: Railway, Rail Force Monitoring, Rail Load, Curve Analysis, Derailment, Track Maintenance

1. Giriş

Günümüzde, insanların en çok kullanmakta olduğu ulaşım çeşitlerinden biri olan ve birçok ülkede son yıllarda yatırımları artan ulaşım modu demiryolu ulaşımı olmuştur [1]. Demiryolu ulaşımına olan ilginin artması ve yapılan yeni yatırımlarla birlikte demiryolu ulaşımı ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalarda da artış görülmektedir.

Taşıtların demiryolu üzerinde hareketiyle birlikte doğal olarak tekerlek ve ray arasında dinamik bir etkileşim oluşmaktadır. Oluşan bu dinamik etkileşim sonucu tekerlek-ray temas noktasında düşey ve yanal eksenlerde temas kuvvetleri meydana gelmektedir. Meydana gelen bu temas kuvvetlerinin belirlenebilmesi için de tekerlek ve ray arasında temas bölgesi için düşey ve yanal tekerlek temas kuvvetleri hesaplanabilmekte ve taşıt üzerinde oluşan kuvvetler belirlenebilmektedir. Ayrıca, demiryolu taşıtlarının güvenliği, konforu, bakım maliyeti vb. birçok durumu etkileyen en önemli faktörün tekerlek-ray arasında oluşan temas kuvvetleri olduğu bilinmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında da gün geçtikçe tekerlek ve ray arasındaki temas kuvvetleri anlayabilmemizi ve en iyi şekilde tahmin edebilmemizi sağlayacak araştırmaların yapıldığı görülmektedir [2-6].

Demiryolu ulaşımında, güvenli ve konforlu bir ulaşımın yapılabilmesi için taşıt ve yol üzerinden çeşitli verilerin gözlemlenmesi ve incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, uluslararası standartlarca (EN14363, UIC 518) belirlenen sınır değerlere göre verilerin değerlendirilmesi ve sınır değerlerin aşılması durumunda anlık olarak müdahale edilebilmesi için taşıt veya hatta ait çeşitli verilerin anlık olarak ölçülmesi gerekmektedir.

Demiryolu taşıtları ve raylar üzerinden anlık olarak verilerin alınabilmesi ve analiz edilebilmesi için çeşitli ölçüm ve hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Demiryolu ulaşımında, hat boyunca yapılacak testlerde araca yerleştirilen sensörler ile taşıt üzerinden veriler alınabilmektedir. Fakat tüm hat boyunca raylar üzerinde verilerin izlenmesi oldukça zor ve maliyetli bir işittir. Son dönemlerde bu alanda özellikle fiber temelli sensörler ile yapılan araştırmalar devam etmektedir. Hat boyunca raylara yerleştirilen fiber kablolar ile her ne kadar yola etkiyen araç kaynaklı düşey

yükler ölçülebilse de yanal yüklerin nasıl ölçüleceğine dair yöntemler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Raylar üzerinden hat boyunca ölçüm yapmanın zorluğu nedeniyle bu ölçümler genellikle araç üzerinden gerçekleştirilir. Bunun için geliştirilen teknikler içerisinde iki yöntem ön plana çıkmaktadır. İlki, geçmiş yıllardan itibaren çok yaygın olarak kullanılan sensör tekerlek uygulamasıdır [6-17]. Bir diğer yöntem ise son yıllarda gelişen ve yaygınlaşmaya başlayan ölçüme dayalı hesaplama yöntemidir [18-30].

Sensör tekerlek uygulamasında, tekerlek seti üzerine veya içerisine yerleştirilen gerinim ölçer gibi sensörler üzerinden ölçüm yapılmaktadır. Sensör tekerlek uygulaması ile ilgili olarak yapılan çalışmalara bakıldığında, Ren ve Chen [6] sensör tekerlek takımı ile tekerlek-ray temas kuvvetlerinin tahmini için kuvvet denklemleri içerisinde yer alan doğrusal olmayan denklemleri çözmek yerine durum uzay teorisine dayalı bir yöntem önermiş ve yöntemin doğruluğunu simülasyon ve saha testleri ile doğrulamak istemiştir. Bu yöntem ile tekerlek göbeği üzerindeki gerinim ölçer köprülerinden gelen sinyallerle temas kuvvetlerinin hesaplanabildiğini ve tekerlek-ray kuvvetlerinin izlenebildiğini belirtmiştir. Younesian vd. [7] demiryolu hattına etki eden kuvvetlerin ölçümü için yeni bir yöntem önermiş ve tekerlek gövdesinin iki tarafındaki gerilmeler ölçülmüştür. Gerinim ölçerler tarafından elde edilen elektrik sinyalleri üzerinden hatta etki eden kuvvetleri tahmin etmek için yapay sinir ağı algoritması kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kuvvetlerin tahmini için düşük hata oranına sahip kuvvet tahmini yapılmıştır. Bizic vd. [8] sensör tekerlek seti kullanılarak tekerlek-ray kuvvetlerini ve temas noktası konumunu deneysel olarak belirlenebilmesi için yöntem geliştirmiştir. Sensörlerin optimum sayısını ve konumunu belirlemek için ters tanımlama algoritmasını ve sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanmıştır. Yapılan çalışmada, düşey ve yanal kuvvet ile derayman kriteri (yanal kuvvet/düşey kuvvet) (%80-90) oranında tahmin edilmiştir. Gullers vd. [9] düşey tekerlek temas kuvvetlerinde 0-2000 Hz frekans aralığının etkisini saptamak için İsveç ray ağını kullanarak saha testleri yapmıştır. Sensör tekerleklerde görülen tekerlek rezonans durumunu da bastırıcı etkisini dahil edecek sinyal işleme için yeni yöntem kullanmıştır. Tekerek temas kuvvetlerini değerlendirirken yüksek frekans dinamiklerinin dikkate alındığı ray düzensizlikleri sınıflandırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, 100-1250 Hz aralığındaki frekans dinamiklerinin tekerlek temas yorgunluğunun oluşmasına neden olabileceği belirtmiştir. Gupta ve Bharti [10]'de aynı Guller vd. gibi tekerlek-ray arasındaki yüksek frekanslı temas kuvvetlerini ölçmek için sensör tekerlek seti kullanmıştır. Analiz için dört farklı ray düzensizliği bulunan raylar kullanılmıştır. Analizler sonucunda, yüksek frekans dinamiğinin temas kuvvetlerine büyük etki ettiği ve bu durumun tekerlek temas yorgunluğunun oluşmasına neden olabileceği söylemiştir. Hondo vd. [11] tekerlek-ray teması nedeniyle tekerlek seti üzerinde oluşan tekerlek yükünün yanal kuvvet üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla sensör tekerlek seti kullanmış ve çalışma için tekerlek gövdesinde oluşan kesme gerilmelerini önerilen konfigürasyon olarak kullanmıştır. Önerilen yöntem ile tekerlek dönme durumunda bile tekerlek yükünün yanal kuvvet üzerindeki etkisinin azaltılabileceğini belirtmiştir. Bagheri vd. [12] sensör tekerlek setinin hassas gerinim ölçer yapısını optimize etmek için bir yöntem önermiştir. Kuvvet tahminlerinin doğruluğunun ölçüm sensörlerinin konumuna bağlı olduğu söylemiş ve ortalama hata kareleri yöntemi uygulayarak gerinim ölçerlerin optimum radyal konumlarını belirlemiştir. Önerdiği yöntemin sayısal doğrulamasını yapmış ve standart yapıdaki tekerlek setlerine uygun olduğunu belirtmiştir. Yine Bagheri vd. [13] tekerlek gövdesi üzerinden radyal gerilmelere göre tekerlek temas kuvvetlerini tahmin etmek için yeni bir dolaylı tanımlama yöntemi önermiştir. Açısal gerinim konfigürasyonlarını kullanarak tekerleğin dönüş etkisini ortadan kaldırmak istemiştir. Önerdiği yöntemin doğruluğunu incelemek için sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve tekerleğin dönme hızının, yüklemenin ve ölçüm gürültülerinin normal kuvvet üzerindeki etkisi incelenmiş ve dönme hızının ihmal edilmesi durumunda yüksek hız aralıklarında kayda değer hatalara neden olduğu belirlenmiştir. Urda vd. [14] gerinim ölçer ve lazer mesafe ölçer sensörleri ile donatılmış 1:10 ölçekli dinamometrik tekerlek seti tasarımı önermiştir. Gerinim ölçer için tekerlek sapması ölçümünü ve lazer mesafe ölçer sensörle de tekerleğin gövdesindeki sapma ölçümü kullanılmıştır. Önerilen dinamometrik tekerlek setini, ölçekli pist düzeneğinde birkaç test etmiştir. Her bir testte

elde edilen kuvvet ölçümleri ile ölçekli modelin hesaplamalı modelinden elde edilen kuvvet tahminleri ile karşılaştırması yapılmış ve yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Hondo vd. [15] raylı taşıtın kurp performansını ve çalışma güvenliğini değerlendirmek için yeni yapılandırılmış sensör tekerlek seti önermiş ve tekerlek temas kuvvetlerini belirlemek istemiştir. Tekerlek gövdesi üzerindeki deliğe 3 eksenli gerinim ölçer yerleştirilmiş ve aynı anda hem kayma gerilmelerinin hem de normal gerilmelerin ölçülebildiğini böylece oluşacak hatanın azaltılabileceği belirtmiştir. Önerilen yöntemin sayısal incelemesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanmış ve statik yük analizi yapmıştır. Yapılan analizler sonucunda, önerilen yöntem ile tekerlek gövdesine yerleştirilen 3 eksenli gerinim ölçerlerin geleneksel yöntemdeki ile aynı konuma yerleştirilebildiği ve geleneksel yöntemde göre kuvvet değerlerini daha doğru belirlenebildiğini söylemiştir. Bizic ve Petrovic [16] EN 14363 ve UIC 518 standartlarına göre tasarlanmış olan düşey ve yanal tekerlek temas kuvvetlerini sürekli ölçebileceği sensör tekerlek seti tasarımı önermiştir. Tekerlek seti üzerindeki gerinim ölçerlerin uygun konumlarını saptamak için ANSYS yazılımı içerisindeki sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Ardından gerinim ölçerlerin sayısı, bağlantı şekli ve düzenleri optimize edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, düşey ve yanal kuvvetlerin belirlenmesi için gerinim ölçerlerden alınan karışık sinyal değerlerini ayarlayıcı ters kararlılık algoritması geliştirilmiştir. Belirlenen düşey ve yanal kuvvetlerin değerleri sonlu elemanlar yöntemi üzerine oluşan model üzerinden karşılaştırılmıştır. Yapılan yaklaşım sonucunda düşey ve yanal tekerlek kuvvetleri yüksek doğrulukta tahmin edilmiştir. Sensör tekerlek uygulaması üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında düşey kuvvetlerde yüksek oranda kuvvet tahmininin yapılabildiği görülse de bu yöntemin ilk yatırım, bakım-onarım ve sistemin işletmesi gibi maliyetlerinin pahalı olması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, tekerleklerin hassas sensörlerle (gerinim ölçer/yük hücresi vb.) donatılması, kablosuz iletim teknolojilerine sahip olması, dinamik yük altında hasarsız çalışmak zorunda olması, hassas işleme ve imalat zorluğu da bu yöntemin kullanılmasında diğer dezavantajları olarak görülmektedir. Bu nedenle, sensör tekerlek uygulamasının dezavantajlarını minimuma indirecek yüksek doğruluğa sahip ve düşük maliyetli bir yöntem ihtiyacı duyulmuştur ve sensör tekerlek uygulamasına alternatif olarak, son yıllarda geliştirilen ölçüme dayalı hesaplama yöntemi hem ekipman, bakım ve onarım maliyetinin düşük olması hem de sensör tekerlek uygulamasında karşılaşılan dezavantajların birçoğunu üzerinde barındırmaması nedeniyle çok fazla tercih edilmeye başlanmıştır [18-30]. Ayrıca, herhangi bir arıza durumunda hızlı müdahale edilebilmesi, kalibrasyonlarının kolay ve hızlı olması bu yöntemin diğer avantajlarıdır.

Ölçüme dayalı hesaplamalı yöntemler kabaca süspansiyonlardan aksa iletilen dinamik kuvvetlerin kütsel ataletler, yerçekimi ve merkezkaç etkiler ile birleşmesi sonucu direkt olarak yola etkidiği varsayımına dayanarak işletilir. Ölçüme dayalı hesaplama yöntemi ile ilgili olarak literatüre bakıldığında, Wei vd. [18] demiryolu taşıtlarının çapraz rüzgârlara maruz kalması durumundaki tekerlek temas kuvvetlerini ölçmek için dolaylı yöntem önermiştir. Düşey ve yanal tekerlek kuvvetlerini analiz etmek için, süspansiyon ve aks üzerinden ölçümler almıştır. Saha testleri yapılmış ve saha testleri üzerine alınan ölçümler ile elde edilen dolaylı yöntem kuvvet çıktıları, sensör tekerlek seti kuvvet çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, dolaylı yöntem ile elde edilen kuvvet verileri ile uzun vadeli olarak taşıt güvenliğinin izlenebileceği belirtilmiştir. Zhu vd. [19] tekerlek temas kuvvetlerini elde etmek için dinamik yük tanımlama yöntemi kullanan dolaylı ölçüm yöntemi önermiştir. Ayrıntılı bir test araç simülasyon modeli oluşturulup farklı çalışma koşulları için ivme ölçümleri alınmıştır. Alınan ivme ölçümleri dinamik yük tanımlama yöntemine girdi olarak girilmiştir. Tanımlanan düşey ve yanal tekerlek takım kuvvetleri, tekerlek yük boşalması ve raydan çıkma kriterlerine göre simülasyon modeli kuvvet çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Doğrudan kuvvet ölçümlerine ihtiyaç duymadan yalnızca ivmelenme ölçülerini kullanarak aracın güvenlik değerlendirilmesinin yapılabileceği belirtilmiştir. Xia vd. [20] tekerlek temas kuvvetlerini belirlemek için bir vagon gövdesinin sistem ölçümlerini kullanarak ters vagon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen ters vagon modeline girdi olarak vagonun düşey ve yanal doğrusal ivmeleri ile vagon gövdesinin yuvarlanma, yalpa ve kafa vurma açısız ivmeleri girilmiştir. Geliştirilen vagon modeline göre yapılan analizler sonucunda,

tekerlek temas kuvvetleri ile yanal ve yalpa yer değiştirme hareketleri tahmin edilmiştir. Zhu vd. [21] dinamik tekerlek yükleri için zaman alanı tersine çevirme yöntemi önermiştir. Ters çevirme matematiksel modeli, durum uzay denklemine, dinamik programlama yöntemlerine ve Bellman optimallik ilkesine dayandırılarak modellenmiştir. Düşey ve yanal tekerlek temas kuvvetlerini belirlemek için yüksek hızlı bir aracın aks kutusu ivmeleri kullanılmıştır. Ters çevirme yöntemi kuvvet çıktıları, aynı kinematik parametrelere sahip SIMPACK simülasyon modeli kuvvet çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, düşey ve yatay tekerlek temas kuvvetlerinin SIMPACK simülasyon sonuçları ile yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Zhu vd. [22] tekerlek temas kuvvetlerini tahmin etmek için aks kutusu üzerinden ölçülen ivmelere dayalı ters matematiksel dinamik model geliştirmiştir. Dinamik model için yirmi yedi serbestlik dereceli yüksek hızlı demiryolu taşıtı modeli oluşturulmuştur. Ters matematiksel modele girdi olarak ölçülen veriler girilerek düşey ve yanal tekerlek temas kuvvetleri belirlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra ters matematiksel dinamik modelden elde edilen kuvvet çıktıları, daha karmaşık çalışma koşulu için simüle edilen SIMPACK kuvvet çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Li vd. [23] düşey tekerlek temas kuvvetini saptayabilmek için dolaylı tanımlama yöntemi önermiştir. Ray üzerinden ölçülen ray ivmeleri girdi olarak kullanılmış ve hesaplamalı program geliştirilmiştir. Araçtan raylara iletilen düşey tekerlek temas kuvvetleri elde edilmiştir. Mal vd. [24] tekerlek setinin doğrusal olmayan dinamiklerini hesaplamak ve tahmin etmek için değişken adhezyon koşulları altındaki tekerlek setini SIMPACK/MATLAB'de modellemiş ve Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanan model tabanlı tahmin algoritması geliştirmiştir. Yapılan çalışma ile önerilen modelin, demiryolu taşıtının frenleme ve çekiş durumlarında değişen ray koşullarında (ıslak/kuru veya kirli/temiz) yüksek performans gösterdiğini, böylece tren kazalarının ve raydan çıkma durumlarının önlenmesi için durum izleme sistemlerinde kullanılmasını önermiştir. Zhao vd. [25] tekerlek temas kuvvetlerini belirlemek için tren bojsi üzerindeki hareket ölçümlerini kullanacak bir durum gözlemleyicisi tasarlamıştır. Gözlemlenen tekerlek temas kuvvetlerinin, doğru tahmini için tekrarlamalı en küçük kareler algoritması kullanılmış ve tekerlek temas kuvveti denklemi içerisindeki parametreler tahmin edilmek istenmiştir. Önerilen yöntemin doğruluğu sayısal simülasyonlara araştırılmıştır. Önerilen yöntem ile boji üzerinden alınan sınırlı ölçüm ile yüksek tahmin yapılabildiği gösterilmiştir. Xu vd. [26] düşey tekerlek temas kuvvetini tahmin etmek için ray ölçüm treninden gelen dinamik sinyalleri kullanan bir yaklaşım önermiştir. Ölçüm almak için aks kutusuna ve boji çerçevesine üç eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Ölçülen araç ivmelerine bağlı olarak düşey tekerlek temas kuvveti tahmin modeli oluşturulmuştur. Önerilen yöntem ile yüksek hassasiyetli düşey tekerlek temas kuvveti tahmin edildiği belirlenmiştir. Pires vd. [27] sensör tekerlek seti kullanmadan düşey ve yanal tekerlek temas kuvveti oranını tahmin etmek için makine öğrenme yöntemi önermiştir. Makine öğrenmesi için sensör tekerlek verileri girdi olarak girilmiş ve düşey/yanal kuvvet oranı çıkış olacak verecek makine öğrenme modeline öğretilmiştir. Yapılan çalışma ile yüksek veri girişi yapılarak düşey/yanal kuvvet oranı makine öğrenmesi ile saptanmıştır. Matsumoto vd. [28] tekerleklerden raya iletilen kuvvetleri belirleyen yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, yanal temas kuvvetinin, birkaç temassız (lazer) yer değiştirme sensörü tarafından doğrudan tekerleğin düşey eksenle yaptığı açısal hareketi ölçülerek belirlenebildiğini söylemiştir. Normal temas kuvveti, boji çerçevesinin gerilmesinden veya birincil yayın sapması ile ölçüldüğünü ve boyuna temas kuvvetinin de aks kutusu destek bağlantı kolunun gerilmesi ile ölçüldüğünü belirtmiştir. Ancak bu çalışmada gerek kullanılan sensörlerin (özellikle lazer mesafe ölçerin) dayanıklı (robust) çalışmaması gerekse temas bölgesi sürünme etkilerinin ihmal edilmesi dolayısıyla sağlıklı sonuçlara ulaşılamadığı görülmektedir. Yine Matsumoto vd. [29] önceki çalışmasına ek olarak demiryollarında yer alan keskin kurplarda sürtünme katsayısının değişimine göre yeni bir derayman kontrol yöntemi geliştirmiştir. Ray düzensizliklerinin de deraymana etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada yaygın kullanılan Nadal formülasyonuna alternatif bir yöntem geliştirmiştir. Kataori vd. [30] kurp geçişlerinde tekerlek seti atak açısının yanal kuvvetlere etkisini Matsumoto vd.'nin kullandığı yöntemle benzer bir şekilde ölçerek hesaplara dâhil etmiştir. Bu çalışmada da tekerleğin ilerleme yönündeki eksen etrafında yaptığı açı (atak açısı) tekerleğin iki ucundaki yanal hareketlere dair yer değiştirmeler yine lazer sensörler yardımıyla ölçülerek hesap edilmiş ve dinamik denklemler içinde

kullanılmıştır. Fakat Matsumoto vd. ve Kataori vd.'nin yapmış oldukları bu çalışmalarda raylara iletilen yanal kuvvetlerin içerisinde yer alan sürünme kuvvetlerinin ihmal edilmesi bir eksik olarak görülmektedir. Ayrıca kullanılan lazer sensörlerin uzun süreli kullanımlarda kararlı verilerin üretilmemesine de neden olacağı düşünülmektedir. Bosso ve Zampieri [31] tekerlek-ray temas kuvvetlerini hesaplamak için doğrusal olmayan sürünme kuvvetleri üzerinden bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntemi FASTSIM ve Polach yöntemlerine göre algoritmalarını karşılaştırmıştır. Ayrıca yöntemi deneysel olarak test etmek için tekerlek setinin prototipini modellemiş ve test etmiştir. Cheng vd. [32] taşıtın kurp üzerinde hareketi sonucunda oluşan dinamik etkiyi ifade etmek için sezgisel doğrusal olmayan dinamik hareket denklemini kullanmıştır. Sistemi 21 serbestlik derecesine (DOF) sahip olacak şekilde modellemiş ve yanal hareket denklemlerini elde etmiştir. Yaptığı modelleme sonucunda sistem modelini 6-DOF ve 14-DOF olacak şekilde alt kümelerine indirmiş ve kritik hız analizi yapmıştır.

Bu çalışmada, araçtan raylara iletilen düşey ve yanal kuvvetlerin belirlenebilmesi için ölçüme dayalı hesaplamalı yöntem kullanılmış ve sürünme kuvvetlerini de içinde barındıran bir dinamik kuvvet denklemi elde edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle raylı taşıtın yanal ve düşey hareketi nedeniyle oluşan tekerlek-ray arasındaki temas kuvvetlerinin bulunabilmesi için matematiksel model oluşturulmuştur ve oluşturulan matematiksel model içerisinde yer alan ve esasen araç üzerinden ölçülmesi gereken kütleles ivmeler, süspansiyon kuvvetleri SIMPACK yazılımında modellenmiş olan Yerli İstanbul Tramvayı simülasyon modeli üzerinden çekilerek ölçüm verileri gibi kullanılmış ve matematiksel modele entegre edilmiştir. Daha sonra oluşturulan matematiksel model, MATLAB/Simulink yazılım programı içerisinde modellenmiş ve belirlenen kurb yarıçapı, taşıt hızı ve dever miktarına göre yapılan simülasyonlar sonucunda düşey ve yanal tekerlek kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen düşey ve yanal kuvvet verileri SIMPACK yazılımı üzerinden elde edilen düşey ve yanal tekerlek kuvvetleri ile karşılaştırılmış ve matematiksel denkleme ait sonuçların tutarlılığı incelenmiştir. Belirlenen kurp ve hız senaryosu için yapılan analizler sonucunda, geliştirilen matematiksel metot kuvvet çıktıları ile SIMPACK yazılımından elde edilen kuvvet çıktıları karşılaştırıldığında, düz yolda raylara iletilen toplam yanal tekerlek ve düşey tekerlek temas kuvvetlerinin %99'un üzerinde, kurpta ise toplam yanal temas kuvvetinin %94'ün ve düşey tekerlek temas kuvvetlerinin de %97'in üzerinde tutarlı olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmanın içeriğine bakıldığında, ikinci bölümde geliştirilen matematiksel metot hakkında bilgi verilmiş ve kuvvet denklemleri elde edilmiştir. Üçüncü bölümde, geliştirilen matematiksel metot ile elde edilen kuvvet çıktıları ile SIMPACK'ten elde edilen kuvvet çıktıları karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde ise yapılan analize ait sonuçlar açıklanmıştır.

2. Metot

Bir demiryolu taşıtının hareketi ile oluşan dinamik etkilerin doğru bir şekilde analiz edilmesindeki en önemli faktör hareket denklemlerinin doğru bir şekilde oluşturulmasıdır. Demiryolu taşıtlarının hareketi sonucunda oluşan dinamik etkilerin belirlenebilmesi için geçmişten günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Literatürdeki yapılan çalışmalara bakıldığında, demiryolu taşıtı hareket denklemlerinin çıkarılması için birçok teorik çalışma yapıldığı görülmektedir. Garg ve Dukkipati [35] demiryolu taşıtının hareketi sonucunda demiryolu taşıtında oluşan dinamik etkileri gösteren bir kitap yayınlamış ve hareket denklemlerinin oluşturulması için birçok teorik formülasyonun (Kalker Doğrusal Teorisi, Johnson ve Vermeulen Teorisi, Kalker Ampirik Teorisi) olduğundan bahsetmiştir. Ancak literatürde yapılan bu çalışmalara bakıldığında temelinde tekerlek-ray arasındaki etkileşim nedeniyle temas alanında oluşan sürünme kuvvetlerinin olduğu görülmektedir. Sürünme kuvvetleri, tekerlek-ray temas alanına, sürünme faktörüne, tekerlek-ray temas açısına, tekerlek ve rayın malzemesine, taşıtın hızına, tekerlek profil konikliğine, rayın profiline ve birçok parametreye bağlıdır ve bu nedenle sürünme kuvvetleri, oldukça karmaşık ve çok sayıda değişken barındıran bir algoritma ile birbirine bağlıdır [35]. Sürünme etkileri ile ilgili olarak Denklem 1 ve 2'de sol tekerlek-ray teması

sonucunda oluşan düşey ve yanal sürünme kuvveti örnek denklemleri ve Şekil 1’de tekerlek-ray etkileşimi nedeniyle ortaya çıkan sürünme etkilerine dair algoritma verilmiştir. Algoritmada görülebileceği gibi demiryolu taşıtının hareketi sonucunda birçok parametrenin birbirine bağlı olması ve test sırasında yola etkiyen anlık yüklerin tespit edilmesi sürecinde sürünme etkilerinin ölçülmesi ve denklem içerisine entegre edilerek hesaplanması gerekmektedir. Ancak, belirlenmesi gereken onlarca parametre ve ölçülmesi gereken tekerlek hareketleri bulunmaktadır. Dolayısıyla bu halde hesaplama ve ölçüm çok zor bir iş olup, mümkün görünmemektedir.

Tablo 1’de Denklem 1 ve 2’de verilen sürünme kuvvetlerinde kullanılan simgeler ve açıklamaları bulunmaktadır.

$$F_{Lz} = \left\{ -(f_{11}/V)[\dot{y} + r_L\dot{\phi} - V\psi] - (f_{12}/V) \left[\dot{\psi} - \frac{V}{R_w} - \Omega\delta_L \right] \right\} (\delta_L + \phi) \quad (1)$$

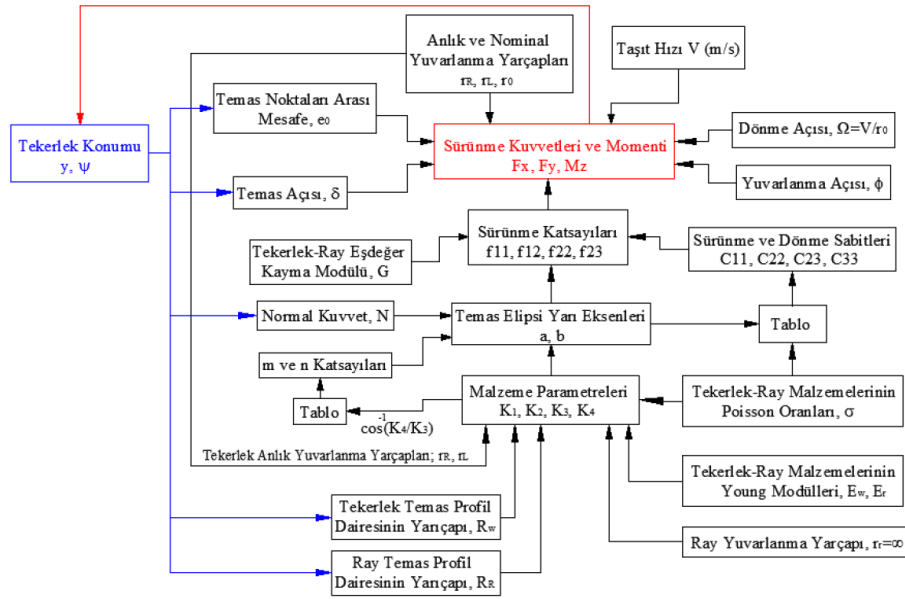
$$F_{Ly} = \left\{ -\left(\frac{f_{33}}{V}\right) \left\{ V \left[1 - \left(\frac{r_L}{r_0}\right) + \frac{a_0}{R_w} \right] - a_0\psi \right\} \right\} \psi \quad (2)$$

$$- \left\{ (f_{11}/V)[\dot{y} + r_L\dot{\phi} - V\psi] + (f_{12}/V) \left[\dot{\psi} - \frac{V}{R_w} - \Omega\delta_L \right] \right\}$$

Tablo 1. Sürünme kuvveti parametre açıklamaları

Simge	Açıklaması
F_{Lz}	Sol tekerlek temas bölgesi sürünme kuvveti düşey bileşeni
F_{Ly}	Sol tekerlek temas bölgesi sürünme kuvveti yanal bileşeni
f_{11}	Sürünme katsayısı matrisi 1. Satır 1. Sütun elemanı
f_{12}	Sürünme katsayısı matrisi 1. Satır 2. Sütun elemanı
f_{33}	Sürünme katsayısı matrisi 3. Satır 3. Sütun elemanı
V	Taşıt hızı
y	Tekerlek seti yanal yer değişimi
r_L	Sağ tekerlek anlık yuvarlanma yarıçapı
r_0	Tekerlek nominal yuvarlanma yarıçapı
a_0	Raylar arası mesafe
ϕ	Tekerlek seti ilerleme eksenini etrafındaki açılmalık yer değiştirme
ψ	Tekerlek seti düşey eksen etrafındaki açılmalık yer değiştirme
R_w	Tekerlek profil eğrisinin anlık enine yarıçapı
Ω	Taşıt hızının nominal tekerlek yarıçapına oranı
δ_L	Sol ray temas açısı

Ölçüme dayalı hesaplama yöntemi deneylerinde, Denklem 1 ve 2’de verilen denklemlerde görülebileceği gibi sürünme kuvvetleri içerisinde yer alan birçok parametrenin (tekerlek-ray temas açısı, temas alanı eliptik yarı eksenler, anlık tekerlek yuvarlanma yarıçapı, sürünme katsayılarının belirlenmesi için kullanılan kalker rijitlik katsayısı vb.) deneysel olarak ölçümünün mümkün olmaması hatta imkânsız olmasından dolayı bu teorik formülasyon yapılan bu çalışmada kullanılmamış deneysel olarak ölçümü mümkün olan parametreleri barındıran bir matematiksel model geliştirilmiştir.



Şekil 1. Tekerlek-ray etkileşiminde meydana gelen sürünme etkilerine dair algoritma [36]

Ölçüme dayalı hesaplamalı yöntemi uygulamasının (dolaylı ölçüm yöntemi) en can alıcı noktası dinamik kuvvet matematiksel denkleminin doğru ifade edilmesidir. Matematiksel denklem içerisinde deneysel olarak ölçümü mümkün olan parametrelerin yer alması, bu yöntemin birçok araç üzerinden ölçüm alınarak dinamik kuvvetlerin hesaplamasında kullanılacak bir yöntem olmasını sağlayacaktır. Bu yöntemle sadece test edilecek aracın bazı parametrelerinin bilinmesi yeterli olacaktır. Yapılan analizler içinde Newton'un ikinci yasasına göre kuvvet ve moment denklemleri kurulmuştur.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel metot içerisinde yer alan kütleli ivmeler, süspansiyon yer değiştirmeleri ve hız değişimleri, SIMPACK yazılımında oluşturulan model üzerinden belirlenen senaryo için çekilmiş ve ölçüm verileri yerine geliştirilen matematiksel metoda girdi olarak kullanılmıştır. Analitik denklemlerden elde edilen yanal ve düşey kuvvetlerin zamana göre değişimi yine SIMPACK simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve geliştirilen metot için kurgulanan dinamik denklemlerin doğru çalışıp çalışmadığı irdelenmiştir. Geliştirilen matematiksel metodun analizi için test edilecek simülasyon senaryosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Simülasyon senaryosu

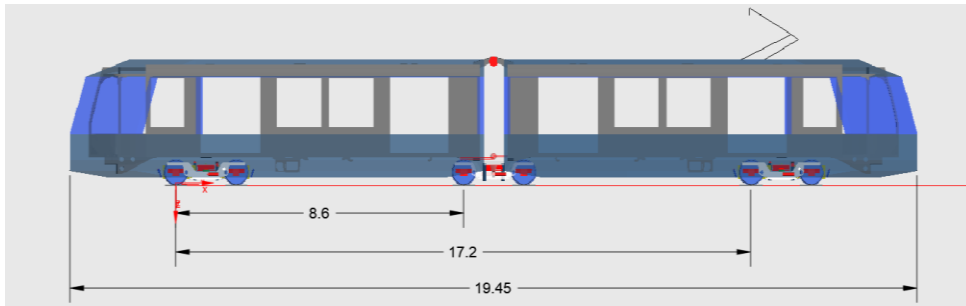
Senaryolar	Taşıt Hızı (km/sa)	Kurp Yarıçapı (metre)	Dever Miktarı (metre)
1	60	200	0,14

Bu çalışmada ayrıca SIMPACK yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımın kullanılmasındaki amaç, SIMPACK yazılımının, karmaşık doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, esnek elemanların dinamik analizlerinde, temas problemlerinin çözülmesinde büyük avantaj sağlamasıdır. SIMPACK yazılımının sahip olduğu, doğruluğu kanıtlanmış yüksek çözücü algoritmalar sayesinde verimli ve hata payı daha az hesaplamalar yapılmaktadır. Ayrıca sahip olduğu görselleştirme özellikleri sayesinde yapılan işlemlerin sonuçları hakkında daha iyi bilgi vermektedir. Sadece raylı sistemlerde değil diğer çoklu gövde analizlerinde de özellikle profesyonel projelerde ve akademiye yaygın olarak kullanılmaktadır. Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, bu alanda yapılan birçok akademik çalışmada geliştirilen analitik modellerin tutarlılığının incelenmesinde bir karşılaştırma aracı olarak kullanılmıştır.

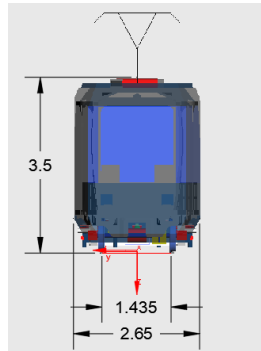
Bu çalışmada, geliştirilen matematiksel metodun analiz edilmesi için kurulmuş olan SIMPACK yazılımı Yerli İstanbul Tramvay modeli Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Tablo 3'te sistemin parametreleri verilmiştir.

Tablo 3. Raylı taşıt genel sistem parametreleri

Nominal Tekerlek Yarıçapı	0,35 m
Yanal Tekerlek Açıklığı	0,75 m
Hat Açıklığı	1435 mm
Dinamik Sürtünme Katsayısı	0,32 N/m
Statik Sürtünme Katsayısı	0,4 N/m
Bojiler Arası Mesafe	8,6 m
Araç Yüksekliği	3,5 m
Araç Genişliği	2,65 m
Araç Uzunluğu	19,45 m
Toplam Araç Kütlesi	35 ton



Şekil 2. Yerli İstanbul Tramvayı Simpack modeli yandan görünüşü



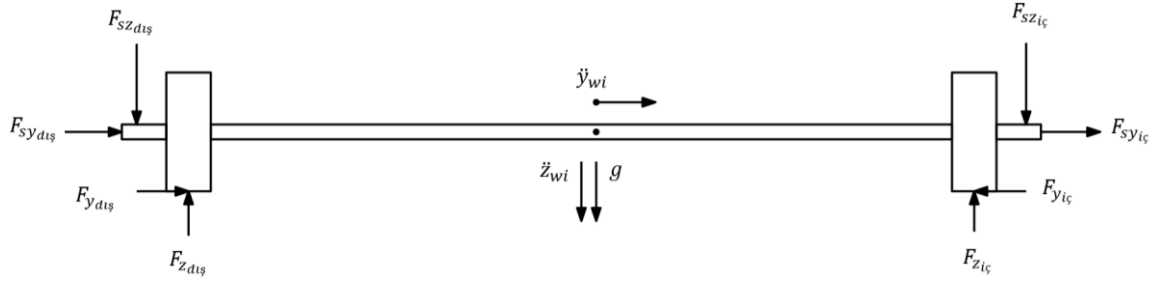
Şekil 3. Yerli İstanbul Tramvayı Simpack modeli önden görünüşü

2.1. Düz yol düşey tekerlek-ray temas kuvvetlerinin belirlenmesi

Demiryolu araçlarından raylara etkiyen düşey yüklerin ölçüme dayalı hesaplamalı metotlarla dolaylı şekilde belirlenmesine dair günümüze kadar yapılan birçok çalışma mevcuttur [27, 33-34]. Bu çalışmalar arasında küçük yaklaşım farklılıkları olsa da genel anlamda raya iletilen dinamik düşey yükler, teorik formülasyonlarla veya oluşturulan matematiksel modellerle elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, dolaylı ölçüm yöntemleri için önemli bir faktör olan parametrelerin ölçülebilir olması koşulundan dolayı Newton'un ikinci yasasına göre denklem oluşturulmuş ve Şekil 4'de verilen tekerlek setine etki eden süspansiyon kuvvetleri ve atalet kuvvetine göre moment

denklemleri kurularak Denklem 4 ve 6'daki gibi düz yoldaki dış ve iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Düz yolda tekerlek seti serbest cisim diyagramı

- Düz yoldaki dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti:

$$\begin{aligned} \frac{m_w \ddot{z}_{wi} L_c}{2} + \frac{m_w g L_c}{2} - m_w \ddot{y}_{wi} r_0 - F_{syiç} r_0 - F_{sydış} r_0 + F_{szdış} \frac{(L_s + L_c)}{2} \\ - F_{szıç} \frac{(L_s - L_c)}{2} - F_{zadış} L_c = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

İç tekerlek-ray temas noktasına göre kurulan moment denklemi sonucunda dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti Denklem 3'deki gibi elde edilmiştir. Elde edilen denklem içerisinde gerekli düzenlemeler yapılarak, düz yoldaki dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 4'deki gibi elde edilmiştir.

$$F_{zadış} = \left(\begin{aligned} (m_w \ddot{z}_{wi} + m_w g) \frac{L_c}{2} - (m_w \ddot{y}_{wi} + F_{syiç} + F_{sydış}) r_0 + F_{szdış} \frac{(L_s + L_c)}{2} \\ - F_{szıç} \frac{(L_s - L_c)}{2} \end{aligned} \right) / L_c \quad (4)$$

- Düz yoldaki iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti:

$$\begin{aligned} - \frac{m_w \ddot{z}_{wi} L_c}{2} - \frac{m_w g L_c}{2} - m_w \ddot{y}_{wi} r_0 - F_{syiç} r_0 - F_{sydış} r_0 + F_{szdış} \frac{(L_s - L_c)}{2} \\ - F_{szıç} \frac{(L_s + L_c)}{2} + F_{ziç} L_c = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Dış tekerlek-ray temas noktasına göre kurulan moment denklemi sonucunda düz yoldaki iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti Denklem 5'deki gibi elde edilmiştir. Elde edilen denklem içerisinde gerekli düzenlemeler yapılarak, düz yoldaki iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 6'daki gibi elde edilmiştir.

$$F_{ziç} = \left(\begin{aligned} (m_w \ddot{z}_{wi} + m_w g) \frac{L_c}{2} + (m_w \ddot{y}_{wi} + F_{syiç} + F_{sydış}) r_0 - F_{szdış} \frac{(L_s - L_c)}{2} \\ + F_{szıç} \frac{(L_s + L_c)}{2} \end{aligned} \right) / L_c \quad (6)$$

Düz yoldaki dış ve iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvvet denklemleri içerisinde yer alan parametreler ve açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kuvvet denklem parametreleri ve açıklamaları

m_w	Tekerlek seti kütlesi
$\ddot{z}_{wi}, \dot{y}_{wi}$	Tekerlek setinin doğrusal düşey ve yanal ivmeleri
$F_{sy_{iç}}, F_{sy_{dış}}$	Yanal yönde iç ve dış tekerlek birincil süspansiyon kuvvetleri
$F_{sz_{iç}}, F_{sz_{dış}}$	Düşey yönde iç ve dış tekerlek birincil süspansiyon kuvvetleri
L_s	Boji ve tekerlek setini birbirine bağlayan birincil süspansiyonlar arasındaki yanal mesafe
L_c	Bir tekerlek setindeki iki tekerlek temas noktası arasındaki yanal mesafe
r_0	Tekerleğin nominal yuvarlanma yarıçapı
$F_{z_{iç}}, F_{z_{dış}}$	İç ve dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetleri
$F_{y_{iç}}, F_{y_{dış}}$	İç ve dış tekerlekteki yanal tekerlek temas kuvvetleri
V	Taşıt hızı
\emptyset_{se}	Dış ve iç raylar arasındaki yükseklik farkı sonucunda oluşan dever açısı
R ve g	Kurp yarıçapı ve yer çekim ivmesi

Tekerlek setine etki eden dış ve iç tekerlek birincil düşey süspansiyon kuvvet denklemleri, Denklem 7'deki gibi elde edilmiştir.

$$F_{sz_{dış}} = F_{sz_{iç}} = K_{pz}(z_{wi} - z_{ti}) + K_{pz} \frac{L_s}{2} (\emptyset_{wi} - \emptyset_{ti}) + K_{pz} L_1 \beta_{ti} + C_{pz} (\dot{z}_{wi} - \dot{z}_{ti}) + C_{pz} \frac{L_s}{2} (\dot{\emptyset}_{wi} - \dot{\emptyset}_{ti}) + C_{pz} L_1 \dot{\beta}_{ti} + F_{sz_{statik}} \quad (7)$$

Tekerlek setine etki eden iç ve dış tekerlek birincil yanal süspansiyon kuvvet denklemleri, Denklem 8'deki gibi elde edilmiştir.

$$F_{sy_{iç}} = F_{sy_{dış}} = K_{py}(y_{wi} - y_{ti}) + K_{py} L_1 \psi_{ti} - K_{py} h_t \phi_{ti} + C_{py} (\dot{y}_{wi} - \dot{y}_{ti}) + C_{py} L_1 \dot{\psi}_{ti} - C_{py} h_t \dot{\phi}_{ti} \quad (8)$$

Düşey ve yanal süspansiyon kuvvet denklemleri içerisinde yer alan parametrelerin açıklamaları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Süspansiyon kuvvet parametreleri ve açıklamaları

z_{wi}, z_{ti}	Tekerlek setinin ve bojinin doğrusal düşey yer değiştirmeleri
$\dot{z}_{wi}, \dot{z}_{ti}$	Tekerlek setinin ve bojinin doğrusal düşey hızları
y_{wi}, y_{ti}	Tekerlek setinin ve bojinin doğrusal yanal yer değiştirmeleri
$\dot{y}_{wi}, \dot{y}_{ti}$	Tekerlek setinin ve bojinin doğrusal yanal hızları
$\emptyset_{wi}, \emptyset_{ti}$	Tekerlek setinin ve bojinin boyuna yuvarlanma açısal yer değiştirmeleri (x ekseninde dönme)
$\dot{\emptyset}_{wi}, \dot{\emptyset}_{ti}$	Tekerlek setinin ve bojinin boyuna yuvarlanma açısal hızları (x ekseninde dönme)
β_{ti}	Bojinin yanal yuvarlanma açısal yer değiştirmesi (y ekseninde dönme)
$\dot{\beta}_{ti}$	Bojinin yanal yuvarlanma açısal hızı (y ekseninde dönme)
ψ_{ti}	Bojinin yalpa yuvarlanma açısal yer değiştirmesi (z ekseninde dönme)

$\dot{\psi}_{ti}$	Bojinin yalpa yuvarlanma açısal hızı (z ekseninde dönme)
K_{pz}, C_{pz}	Düşey süspansiyon yay katsayısı ve sönüm katsayısı
K_{py}, C_{py}	Yanal süspansiyon yay katsayısı ve sönüm katsayısı
L_1	Bojinin ön ve arka tekerlek setleri arasındaki boyuna mesafenin yarısı
$F_{sz_{statik}}$	Taşıtın durağan halde iken sahip olduğu statik dış yükü

2.2. Düz yol yanal tekerlek-ray temas kuvvetinin belirlenmesi

Demiryolu taşıtının hareketi sonucunda tekerlek seti üzerinde meydana gelen yanal kuvvetin belirlenmesi için, Şekil 4'deki tekerlek seti üzerinde Newton'un ikinci yasasına göre kuvvet-denge denklemi Denklem 9'daki kurulmuştur ve yapılan düzenlemeler sonucunda, düz yolda tekerlek setine etki eden toplam yanal tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 12'deki gibi elde edilmiştir.

$$m_w \ddot{y}_{wi} + F_{sy_{iç}} + F_{sy_{dış}} - F_{y_{iç}} + F_{y_{dış}} = 0 \quad (9)$$

Denklem 9'da yer alan kuvvet denklemi parametrelerinin açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir. Burada, F_{syi} , toplam yanal birincil süspansiyon kuvveti ve H , toplam yanal tekerlek temas kuvvetidir ve Denklem 10 ve 11'deki gibi ifade edilebilir;

$$F_{syi} = F_{sy_{iç}} + F_{sy_{dış}} \quad (10)$$

$$H = F_{y_{iç}} - F_{y_{dış}} \quad (11)$$

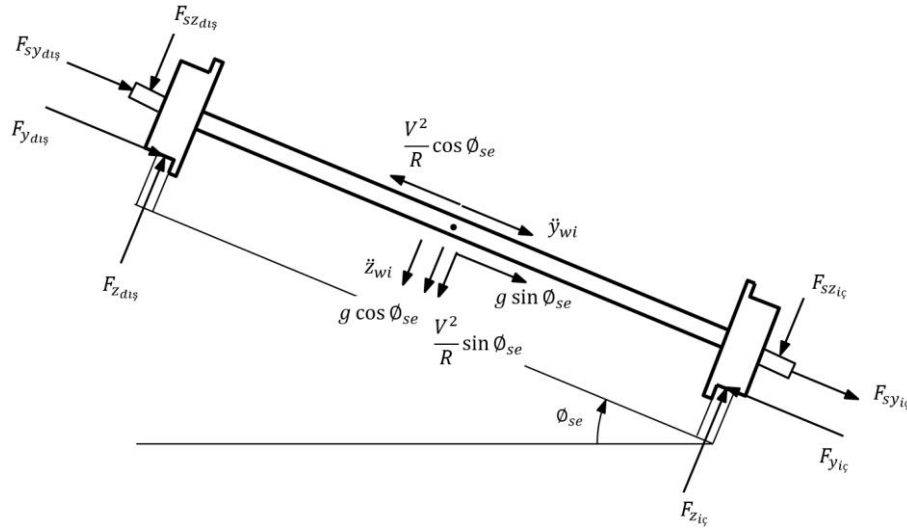
Denklem 9, Denklem 10 ve 11 içerisindeki parametrelere göre düzenlenirse, düz yolda tekerlek setine etki eden toplam yanal tekerlek temas kuvveti Denklem 12'deki gibi elde edilir.

$$H = m_w \ddot{y}_{wi} + F_{syi} \quad (12)$$

2.3. Kurpta düşey tekerlek-ray temas kuvvetlerinin belirlenmesi

Demiryolu taşıtı düz yolda hareket halinde iken kurpa geçiş yaptığında üzerine ek kuvvet olarak merkezkaç kuvveti etki etmektedir. Etki eden merkezkaç kuvveti nedeniyle yanal yönde tekerlek seti üzerinde ek kuvvet olan kılavuz kuvveti meydana gelmekte ve tekerlek seti üzerinde yanal yönde yanal kuvvetlerin artmasına ve düşey yöndeki düşey kuvvetlerin ise düşmesine neden olmaktadır.

Demiryolu taşıtının kurpta hareketi nedeniyle oluşan düşey tekerlek-ray temas kuvvetlerinin belirlenmesi için, Newton'un ikinci yasasına göre Şekil 5'de verilmiş olan tekerlek seti üzerinde dış ve iç tekerlek-ray temas noktalarına göre dinamik denklem kurulmuş ve Denklem 14 ve 16'daki gibi, kurpta meydana gelen dış ve iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Kurp üzerinde tekerlek seti serbest cisim diyagramı

- Kurpta dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti:

$$\begin{aligned} & \frac{m_w \ddot{z}_{wi} L_c}{2} + \frac{m_w V^2 \sin \phi_{se} L_c}{2R} + \frac{m_w g \cos \phi_{se} L_c}{2} - m_w \dot{y}_{wi} r_0 - F_{Sy_{iç}} r_0 - F_{Sy_{dış}} r_0 \\ & + \frac{m_w V^2 \cos \phi_{se}}{R} r_0 - m_w g \sin \phi_{se} r_0 + F_{Sz_{dış}} \frac{(L_s + L_c)}{2} - F_{Sz_{iç}} \frac{(L_s - L_c)}{2} - F_{Z_{dış}} L_c = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

İç tekerlek-ray temas noktasına göre kurulan moment denklemi sonucunda kurpta meydana gelen dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti Denklem 13'teki gibi elde edilmiştir. Elde edilen denklem içerisinde gerekli düzenlemeler yapılarak, kurpta meydana gelen dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 14'deki gibi elde edilmiştir.

$$F_{Z_{dış}} = \left(\left(m_w \ddot{z}_{wi} + \frac{m_w V^2 \sin \phi_{se}}{R} + m_w g \cos \phi_{se} \right) \frac{L_c}{2} - (m_w \dot{y}_{wi} + F_{Sy_{iç}} + F_{Sy_{dış}}) r_0 \right) / L_c \quad (14)$$

$$+ \left(\frac{m_w V^2 \cos \phi_{se}}{R} - m_w g \sin \phi_{se} \right) r_0 + F_{Sz_{dış}} \frac{(L_s + L_c)}{2} - F_{Sz_{iç}} \frac{(L_s - L_c)}{2}$$

- Kurpta iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti:

$$\begin{aligned} & - \frac{m_w \ddot{z}_{wi} L_c}{2} - \frac{m_w V^2 \sin \phi_{se} L_c}{2R} - \frac{m_w g \cos \phi_{se} L_c}{2} - m_w \dot{y}_{wi} r_0 - F_{Sy_{iç}} r_0 - F_{Sy_{dış}} r_0 \\ & + \frac{m_w V^2 \cos \phi_{se}}{R} r_0 - m_w g \sin \phi_{se} r_0 + F_{Sz_{dış}} \frac{(L_s - L_c)}{2} - F_{Sz_{iç}} \frac{(L_s + L_c)}{2} + F_{Z_{iç}} L_c = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Dış tekerlek-ray temas noktasına göre kurulan moment denklemi sonucunda kurpta meydana gelen iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvveti Denklem 15'deki gibi elde edilmiştir. Elde edilen denklem içerisinde gerekli düzenlemeler yapılarak, kurpta meydana gelen iç tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 16'daki gibi elde edilmiştir.

$$F_{Z_{iç}} = \left(\left(m_w \ddot{z}_{wi} + \frac{m_w V^2 \sin \phi_{se}}{R} + m_w g \cos \phi_{se} \right) \frac{L_c}{2} + (m_w \dot{y}_{wi} + F_{Sy_{iç}} + F_{Sy_{dış}}) r_0 \right) / L_c \quad (16)$$

$$- \left(\frac{m_w V^2 \cos \phi_{se}}{R} - m_w g \sin \phi_{se} \right) r_0 - F_{Sz_{dış}} \frac{(L_s - L_c)}{2} + F_{Sz_{iç}} \frac{(L_s + L_c)}{2}$$

Denklem 14 ve 16 içerisinde yer alan kuvvet parametrelerinin açıklamaları Tablo 4’te verilmiştir. Demiryolu taşıtının kurpta hareketi nedeniyle tekerlek setine etki eden düşey ve yanıl süspansiyon kuvvet denklemleri, Denklem 7 ve 8’deki gibi elde edilmektedir.

2.4. Kurpta yanıl tekerlek-ray temas kuvvetinin belirlenmesi

Demiryolu taşıtının kurpta hareket etmesi nedeniyle tekerlek seti üzerinde meydana gelen yanıl kuvvetin belirlenmesi için, Şekil 5’de verilmiş olan tekerlek seti üzerinde Newton’un ikinci yasasına göre dinamik denklem kurulmuş ve Denklem 17’deki gibi elde edilmiştir. Elde edilen denklem üzerinde yapılan düzenlemeler sonucunda, kurpta meydana gelen tekerlek setine etki eden toplam yanıl tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 20’deki gibi elde edilmiştir.

$$m_w \left(\ddot{y}_{wi} - \frac{V^2}{R} \cos \phi_{se} + g \sin \phi_{se} \right) + F_{sy_{iç}} + F_{sy_{dış}} - F_{y_{iç}} + F_{y_{dış}} = 0 \quad (17)$$

Denklem 17’de yer alan kuvvet denklemleri parametrelerinin açıklamaları Tablo 4’te verilmiştir. Burada, F_{syt} , toplam yanıl birincil süspansiyon kuvveti ve H , toplam yanıl tekerlek temas kuvvetidir ve Denklem 18 ve 19’daki gibi ifade edilebilir;

$$F_{syt} = F_{sy_{iç}} + F_{sy_{dış}} \quad (18)$$

$$H = F_{y_{iç}} - F_{y_{dış}} \quad (19)$$

Denklem 17, Denklem 18 ve 19 içerisindeki parametrelere göre düzenlenirse, kurpta meydana gelen tekerlek setine etki eden toplam yanıl tekerlek temas kuvvetinin nihai hali Denklem 20’deki gibi elde edilir.

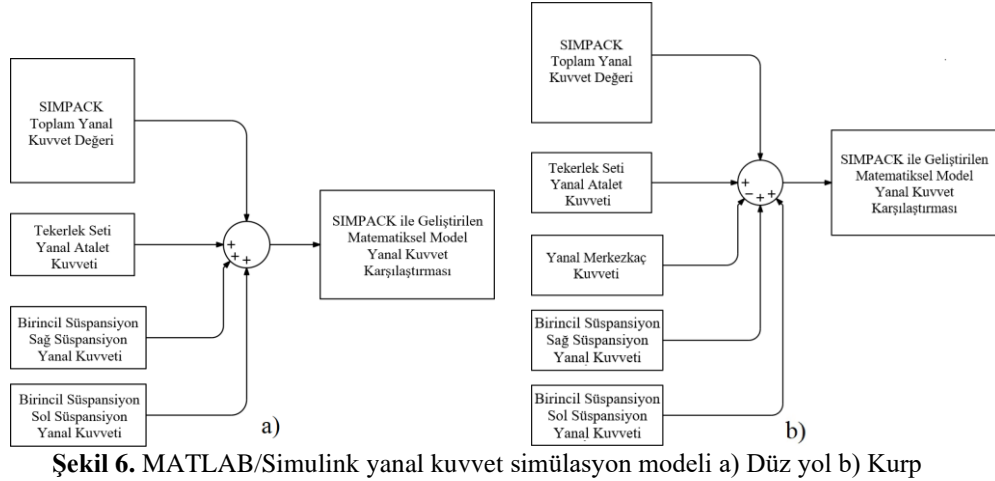
$$H = m_w \left(\ddot{y}_{wi} - \frac{V^2}{R} \cos \phi_{se} + g \sin \phi_{se} \right) + F_{syt} \quad (20)$$

Demiryolu taşıtının kurpta hareketi sonucunda tekerlek setine etki eden toplam yanıl süspansiyon kuvveti Denklem 8’deki gibi elde edilmektedir.

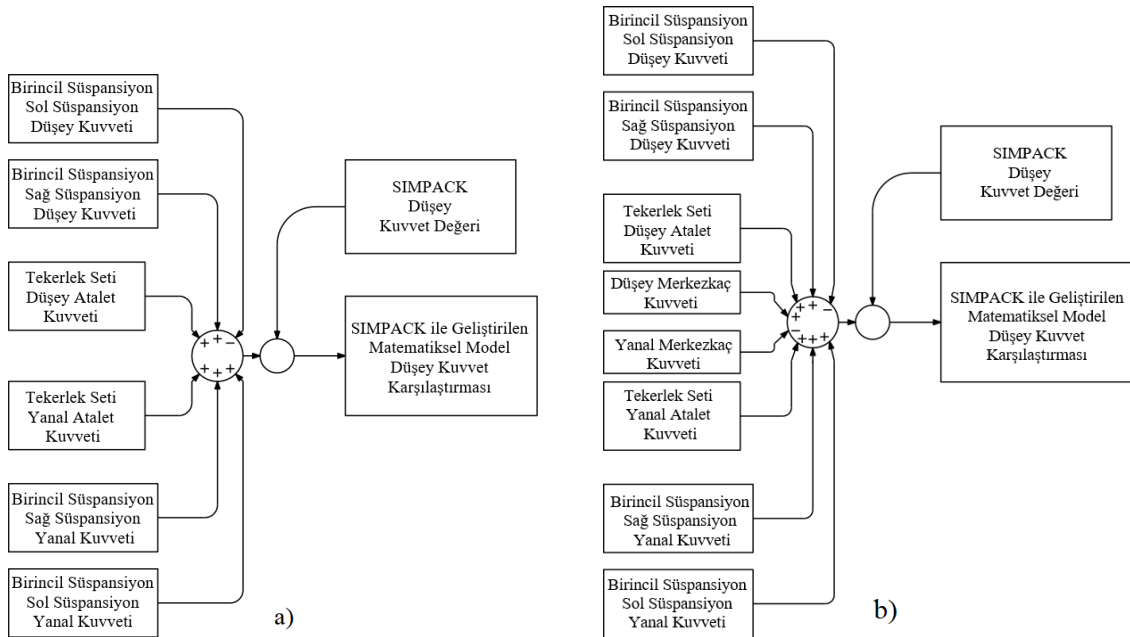
Geliştirilen matematiksel metodun analizi için oluşturulan MATLAB/Simulink simülasyon modelleri şematik olarak Şekil 6 ve 7’de verilmiştir.

Şekil 6.a’da düz yolda hareket eden demiryolu taşıtının toplam yanıl tekerlek temas kuvvetinin belirlenmesi için geliştirilen matematiksel metoda göre modellenmiş MATLAB/Simulink modeli görülmektedir. Şekil 6.b’de ise kurpta hareket eden demiryolu taşıtının toplam yanıl tekerlek temas kuvvetinin belirlenmesi için geliştirilen matematiksel metoda göre modellenmiş MATLAB/Simulink modeli görülmektedir.

Şekil 7.a ve 7.b’de düz yolda ve kurpta hareket eden demiryolu taşıtının iç tekerlek düşey kuvvetinin belirlenmesi için geliştirilen matematiksel metoda göre modellenmiş MATLAB/Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 6. MATLAB/Simulink yanal kuvvet simülasyon modeli a) Düz yol b) Kurp



Şekil 7. MATLAB/Simulink düşey kuvvet simülasyon modeli a) Düz yol b) Kurp

3. Bulgular

Bu bölümde geliştirilen matematiksel metoda göre Tablo 2’de verilen senaryo için analizler yapılmış, analitik metot sonuçlarından ve SIMPACK yazılımı simülasyonlarından elde edilen toplam yanal tekerlek temas kuvveti (Şekil 8) ve sırasıyla iç ve dış tekerlek düşey tekerlek temas kuvvetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 9, 10). Şekil 11’de ise toplam düşey tekerlek kuvvet karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 8-11’de görülen eğriler hem düz yol hem de kurp dinamiğine ait sonuçları kapsamaktadır.

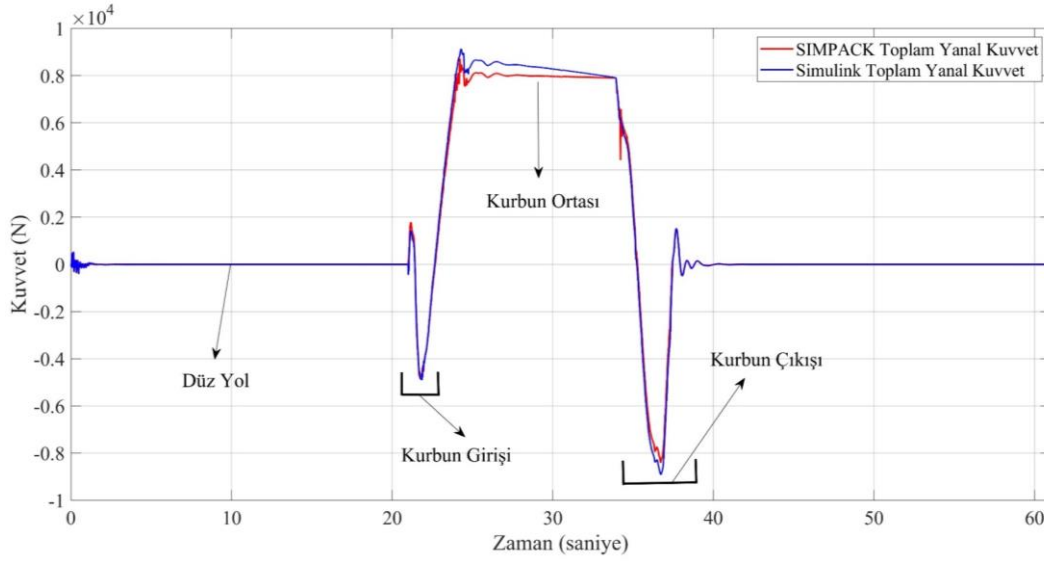
Karşılaştırma yapılırken, yapılan karşılaştırmanın yaklaşım oran yüzdesi Denklem 21’de verilen ifadeye göre bulunmuştur.

$$\text{Yaklaşım Oran Yüzdesi (\%)} = \frac{\text{Mutlak Farklar (Simpack Verisi – Simulink Verisi)}}{\text{Simpack Senaryo Verisinin Mutlak Maksimum Değeri}} \quad (21)$$

Yapılan karşılaştırmanın sonuçları ve yaklaşım oranları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Toplam yanar temas kuvvet simülasyon karşılaştırması

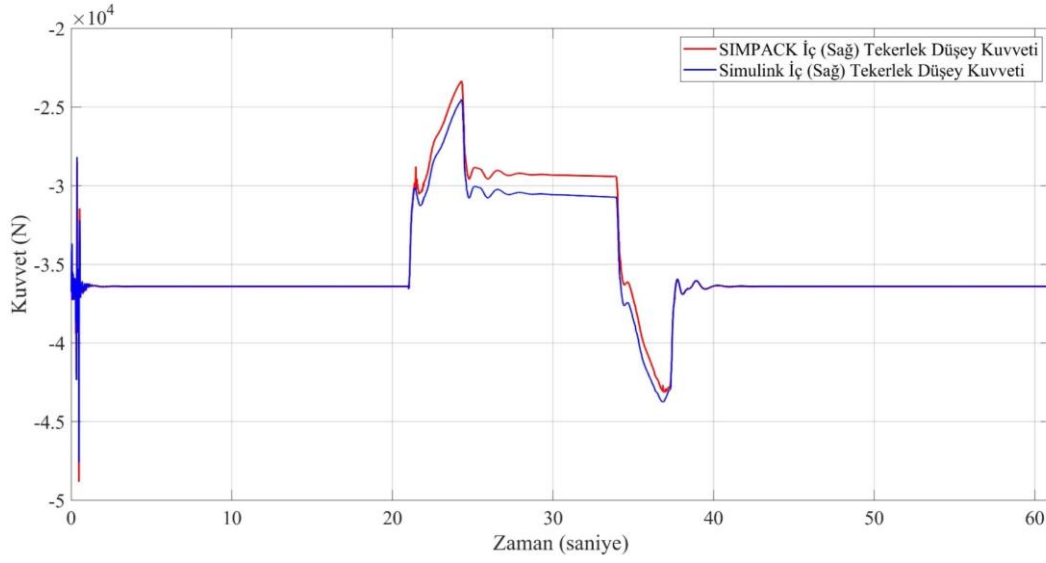
Durum	SIMPACK (N)	MATLAB Simülasyon (N)	Tutarlılık Oranı (%)
Düz yol	-1,8	-9,5	99,91
Kurp Girişi	8725	9115	95,53
Kurp Orta	7991	8365	95,71
Kurp Çıkış	-8411	-8892	94,48

**Şekil 8.** 60 km/sa ve 200 m kurp yarıçapında toplam yanar temas kuvvetleri karşılaştırılması

Şekil 9-11'de SIMPACK yazılımından alınan sol, sağ ve toplam düşey temas kuvvet değeri ile geliştirilen matematiksel modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, SIMPACK ile geliştirilen matematiksel modelin sonuçlarının yaklaşım oranları Tablo 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 7. İç tekerlek düşey temas kuvvet simülasyon karşılaştırması

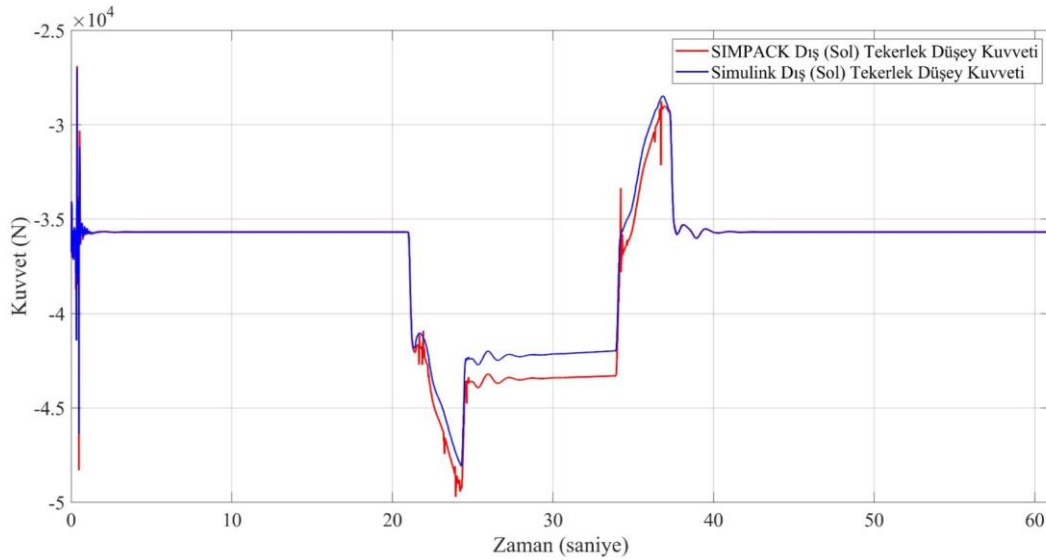
Durum	SIMPACK (N)	MATLAB Simülasyon (N)	Tutarlılık Oranı (%)
Düz yol	-36410	-36380	99,93
Kurp Girişi	-23530	-24520	97,70
Kurp Orta	-29320	-30570	97,09
Kurp Çıkış	-42980	-43720	98,28



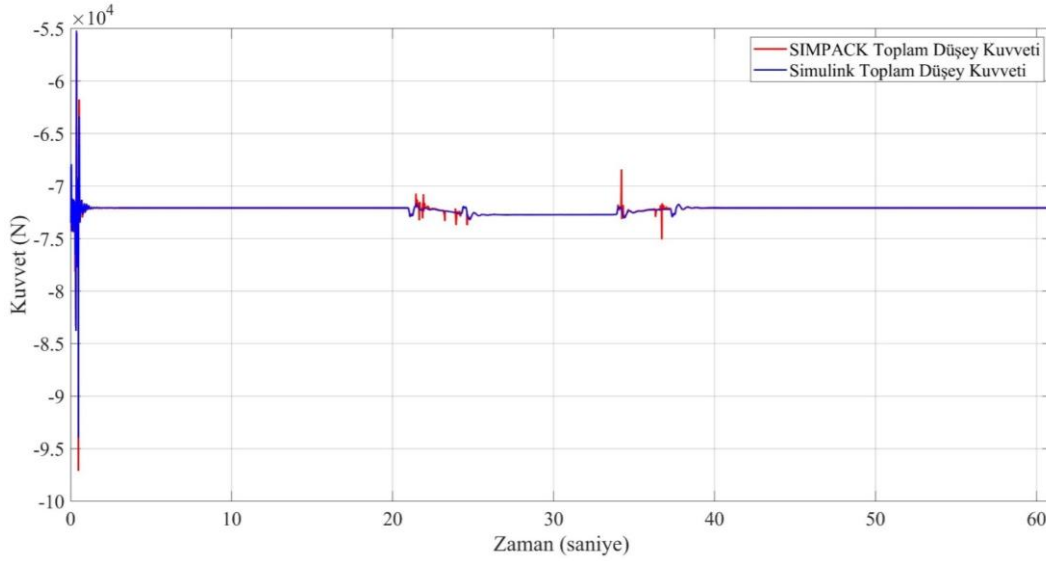
Şekil 9. 60 km/sa ve 200 m karp yarıçapında iç (sağ) tekerlek düşey temas kuvvet karşılaştırılması

Tablo 8. Dış tekerlek düşey temas kuvvet simülasyon karşılaştırması

Durum	SIMPACK (N)	MATLAB Simülasyon (N)	Tutarlılık Oranı (%)
Düz yol	-35690	-35670	99,96
Karp Girişi	-49290	-48070	97,52
Karp Orta	-43400	-42150	97,46
Karp Çıkış	-29050	-28690	99,27



Şekil 10. 60 km/sa ve 200 m karp yarıçapında dış (sol) tekerlek düşey temas kuvvet karşılaştırılması



Şekil 11. 60 km/sa ve 200 m kurp yarıçapında toplam düşey temas kuvvet karşılaştırılması

Şekil 11’de görüldüğü gibi geliştirilen matematiksel model ile demiryolu taşıtının kurp üzerinde hareket etmesi sonucunda oluşan toplam düşey temas kuvveti %99,96 oranında tutarlı görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, demiryolu taşıtlarından tekerlekler vasıtasıyla raylara iletilen düşey ve yanal kuvvetlerin belirlenebilmesi için ölçüme dayalı hesaplamalı bir metot geliştirilmiştir. Bu amaçla, demiryolunun hem düz yol hem de kurp bölgeleri için Newton’un ikinci yasası kullanılarak kurulan denklemler vasıtasıyla düşey ve yanal tekerlek temas kuvvetleri elde edilmiştir. Ayrıca, bu alanda özellikle tekerlek-ray temas algoritmalarının güvenilirliği kabul görmüş ve bu nedenle yaygın olarak kullanılan çoklu gövdeli dinamik simülasyon yazılımı olan SIMPACK yazılımında 2014 yılında Metro İstanbul A.Ş. tarafından üretilmiş Yerli İstanbul Tramvayı (İTA) modellenerek düz yol ve kurp simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, analitik kuvvet denklemi ifadeleri MATLAB/Simulink aracılığıyla modellenmiş olup, oluşturulan düz yol ve kurp senaryosu için yapılan analizler ile elde edilen düşey ve yanal kuvvet çıktıları ile SIMPACK yazılımı simülasyonlarından elde edilen düşey ve yanal kuvvet çıktıları karşılaştırılarak geliştirilen analitik modelin tutarlılığını araştırılmıştır.

MATLAB/Simulink’te geliştirilen model ve SIMPCAK modeli simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, düz yolda toplam yanal tekerlek ve düşey tekerlek temas kuvvetlerinin %99’un üzerinde tutarlılık gösterdiği görülmüştür. Kurp analizinde elde edilen verilerde ise toplam yanal tekerlek kuvvetinin, kurbun girişinde %95,53, kurbun ortasında %95,71 ve kurbun çıkışında %94,48 oranında yaklaştığı görülmüştür. Düşey tekerlek temas kuvvetleri analiz edildiğinde, iç ve dış tekerlek düşey temas kuvvetlerinin sırasıyla, kurbun girişinde %97,70 ve %97,52 oranında, kurbun ortasında %97,09 ve %97,46 oranında ve kurbun çıkışında ise %98,28 ve %99,27 oranında tutarlı olduğu görülmüştür. Böylece geliştirilen metotta kullanılan matematiksel ifadelerin gerçek testlerde kullanılabilir doğrulukta sonuç ürettiği ön sonucuna varılmıştır.

Geliştirilen metodun saha testlerinde pratik olarak kullanılabilmesi için kullanılacak olan araç-yol dinamik denklemlerinin süspansiyon yer değiştirmesi, boji ve tekerlek seti ivmeleri, araç hızı gibi ölçülebilir parametrelere bağlı olması gerekmektedir. Tekerlek-ray temas bölgesinde oluşan sürünme kuvvetleri ya da bu kuvvetleri oluşturan temas geometrisi, anlık sürtünme katsayısı,

sürünme faktörleri ve sabitleri gibi verilerin ise pratikte ölçülmesi mümkün değildir. SIMPACK gibi çoklu gövde dinamiği simülasyon yazılımları ise test verileri ile etkileşimli çalışmadığı için arka plana gömülen FASTSIM, KALKER lineer temas algoritması gibi algoritmaları çevrim dışı çalıştırarak çözüme ulaşmaktadır. Ayrıca, bu yazılımlarda kullanılan bütün parametreler daha önceden ölçülmüş ya da varsayımsal parametreler olmak durumundadır. Bu nedenle, MATLAB’te saha testlerinde kullanılmak üzere geliştirilen analitik model ile SIMPACK yazılımı simülasyonlarından elde edilen sonuçlar arasında maksimum %4’e yakın bir farklılığın çıkması olağan görülmektedir.

Geliştirilen metodun simülasyon ortamında SIMPACK yazılımdan elde edilen sonuçlara daha fazla yakınlaştırılabilmesi için, oluşturulan analitik kuvvet denklemleri temas dinamiğinde ihmal edilen ve ölçülmesi mümkün olmayan sürünme etkileri gibi faktörlerin yerine ikame edilecek bir vekil fonksiyonun eklenmesi ve kuvvet denklemlerine entegre edilmesi gelecek çalışmalar için amaçlanmaktadır. Entegre edilecek bu vekil fonksiyonun farklı araç hızı, kurp yarıçapı, tekerlek çapı, araç yükü gibi değişken faktörlere uyum sağlaması ve doğru sonuç üretecek formda olması gerekmektedir. Bunun için, pratikte elde edilmiş istatistiksel verilerin analiz edilerek işlenmesi, parametrik simülasyon çalışmalarının yapılması ve değişken parametrelerin raya etkileyen düşey ve yanal yükler üzerindeki etkilerinin ortaya konması gerekmektedir. Tüm bu veriler ışığında yapılacak regresyon analizleri ile doğru vekil fonksiyon geliştirilebilir. Ayrıca, veri havuzunun genişletilmesi ve sistem üzerinde mümkün olduğunca çok giriş-çıkış ilişkisi oluşturulması ile regresyon analizlerinin bir yapay zekâ algoritması yardımıyla yapılması ve uygun vekil fonksiyonun belirlenmesi de mümkün olabilecek çalışmalar arasındadır. Ayrıca bu çalışmaların iki farklı simülasyon tekniği arasında değil de yapılacak saha testleri ile geliştirilen denklemlerin sınanması ve gerçek sonuçları üretecek şekilde uyarlanmasını sağlayacak vekil fonksiyonların geliştirilmesi gelecekteki çalışmalar arasında planlanmaktadır. Burada temel zorluk, araçtan raya etkileyen kuvvetlerin geliştirilen ölçüme dayalı hesaplamalı metodun dışında kesin olarak ölçülmesi ve metodun ürettiği sonuçların kesin ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanması olacaktır. Bu zorluğu aşmak için raya etkileyen yüklerin ölçülmesinde kullanılan sensör tekerlek gibi diğer metotlara baş vurulabilir. Ya da rayların bazı bölgelerine yerleştirilecek ve tekil noktalardan ölçüm alabilecek kuvvet ölçer veya gerinim ölçer gibi sensörlerle alınacak direkt veriler, hattın bazı noktalarını kullanarak bir karşılaştırma yapma imkânı sunabilir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olacak sonraki çalışmalarda, hattın düz yol ve kurp bölgelerinin bazı noktalarına yerleştirilecek gerinim ölçerlerle verilerin araç bu noktalardan geçerken toplanması ve işlenmesi sonucu raya etkileyen yanal ve düşey yüklerin kesin olarak belirlenmesi sağlanacaktır. Böylelikle, geliştirilen metodun doğruluğunu araştırmak için, gerinim ölçerlerin bulunduğu noktalarda direkt elde edilen kuvvet verileri ile ölçüme dayalı hesaplamalı metodun bu noktalar için ürettiği verilerin karşılaştırılması mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, geliştirilen ölçüme dayalı hesaplamalı metod ile demiryolu araçlarının düz yolda ve kuplarda raylara uyguladığı yanal ve düşey yüklerin anlık olarak araç üzerinden belirlenmesine imkân sunmaktadır. Bu metod, gerek hizmete alınacak yeni demiryolu hatlarının ilgili regülasyonlara uygunluğunun test edilmesinde, gerekse yolun hizmete alınmasından sonra yolda ortaya çıkabilecek bozulmaların tespit edilmesinde ve böylece gerçekleştirilecek bakım çalışmalarının organize edilmesinde kullanılabilir bir yöntemdir. Geliştirilen yöntem, günümüzde kullanılan sensör tekerlek uygulamalarına alternatif bir yöntem olup, sensör tekerlek uygulamasına nazaran çok daha pratik ve ekonomik bir uygulamaya sahiptir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında 222M001 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

- [1] A. Uğur, "Investigation of the world railway sector development prospects and Turkey's status," *Alphanumeric Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 369-398, Dec. 2019, doi: 10.17093/alphanumeric.582290
- [2] A. Bracciali, and P. Folgarait, "New sensor for lateral & vertical wheel-rail forces measurements," 2008
- [3] D. Cortis, S. Giulianelli, G. Malavasi, and S. Rossi, "Self-diagnosis method for checking the wayside systems for wheel-rail vertical load measurement," *Transport Problems*, vol. 12, no. 4, pp. 91-100, Dec. 2017, doi: 10.20858/tp.2017.12.4.9
- [4] P. Zhang, J. Moraal, and Z. Li, "Design, calibration and validation of a wheel-rail contact force measurement system in v-track," *Measurement*, vol. 175, Apr. 2021, 109105, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109105
- [5] P. Antunes, H. Magalhães, J. A. C. Ambrósio, J. Pombo, and J. N. Costa, "A co-simulation approach to the wheel-rail contact with flexible railway track," *Multibody System Dynamics*, vol. 45, no. 4, pp. 245-272, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11044-018-09646-0
- [6] Y. Ren, and J. Chen, "A new method for wheel-rail contact force continuous measurement using instrumented wheelset," *Vehicle System Dynamics*, vol. 57, no. 2, pp. 269-285, Apr. 2017, doi: 10.1080/00423114.2018.1460853
- [7] D. Younesian, F. Javid, and E. Esmailzadeh, "On-track measurement of lateral/vertical wheel loads of running railway vehicles based on the neural network," *Proceedings of the ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 17, no. 6, pp. 467-471, Jan. 2008, doi: 10.1115/IMECE2008-68201
- [8] M. B. Bižić, D. Z. Petrović, M. C. Tomić, and Z. V. Djinović, "Development of method for experimental determination of wheel-rail contact forces and contact point position by using instrumented wheelset," *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 7, Jun. 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa666f
- [9] P. Gullers, L. Andersson, and R. Lunden, "High-frequency vertical wheel-rail contact forces-field measurements and influence of track irregularities," *Wear*, vol. 265, no. 9-10, pp. 1472-1478, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2008.02.035
- [10] R. Gupta, and P. K. Bharti, "Evaluation of wheel load & lateral forces, using lateral & vertical force measurement wheel in dynamic condition at rail wheel contact point," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 894-902, Apr. 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS041168
- [11] T. Hondo, S. Kuniyuki, T. Tanaka, M. Suzuki, and H. Doi, "Measurement of wheel-rail lateral force using shear strain of wheel web in railway vehicle (Comparison with a conventional bending based method under wheel rotating condition)," *Transactions of the JSME*, vol. 87, no. 903, pp. 1-12, Nov. 2021, doi: 10.1299/transjsme.21-00253
- [12] V. R. Bagheri, P. H. Tehrani and D. Younesian, "Optimal strain gauge placement in instrumented wheelset for measuring wheel-rail contact forces," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 18, pp. 1519-1527, Nov. 2017, doi: 10.1007/s12541-017-0180-7
- [13] V. R. Bagheri, D. Younesian and P. H. Tehrani, "A new methodology for the estimation of wheel-rail contact forces at a high-frequency range," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232, no. 10, pp. 2353-2370, Apr. 2018, doi: 10.1177/0954409718771746
- [14] P. Urda, S. Muñoz, J. F. Aceituno, and J. L. Escalona, "Wheel-rail contact force measurement using strain gauges and distance lasers on a scaled railway vehicle," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 138, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.106555
- [15] T. Hondo, S. Kuniyuki, T. Tanaka, and M. Suzuki, "Method for measuring lateral force utilizing shear strains inside wheel load measuring holes of instrumented wheelset," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 63, no. 2, pp. 139-144, May. 2022, doi: 10.2219/rtriqr.63.2_139
- [16] M. Bižić, and D. Petrović, "Design of instrumented wheelset for measuring wheel-rail interaction forces," *Metrology and Measurement Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 563-579, 2023, doi: 10.24425/mms.2023.146424
- [17] J. Kalivoda, and P. Bauer, "Measurement of wheel-rail contact forces at the experimental roller rig," *EAN 2019, Jun. 2019*.
- [18] L. Wei, J. Zeng, P. Wu, and C. Song, "Safety analysis of high speed trains under cross winds using indirect wheel-rail force measuring method," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 183, pp. 55-67, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.10.018

- [19] T. Zhu, X. Wang, Y. Fan, M. Wang, J. Zhang, S. Xiao, G. Yang, and B. Yang, "A time domain method for wheel-rail force identification of rail vehicles," *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 60, no. 3, pp. 790-809, Sep. 2022, doi: 10.1080/00423114.2020.1838562
- [20] F. Xia, C. Cole, and P. Wolfs, "An inverse railway wagon model and its applications," *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, no. 6, pp. 583-605, May. 2007, doi: 10.1080/00423110601079151
- [21] T. Zhu, S. N. Xiao, Y. Guangwu, W. Ma, and Z. Zhang, "The inverse identification theory and application to high-speed trains," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 19, no. 6, pp. 1582-1586, Jun. 2013, doi: 10.1166/asl.2013.4572
- [22] T. Zhu, S. N. Xiao, Y. Guangwu, W. Ma, and Z. Zhang, "An inverse dynamics method for railway vehicle systems," *Transport*, vol. 29, no. 1, pp. 107-114, Mar. 2014, doi: 10.3846/16484142.2013.789979
- [23] C. Li, W. Liu, and R. Liang, "Identification of vertical wheel-rail contact force based on an analytical model and measurement and its application in predicting ground-borne vibration," *Measurement*, vol. 186, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110182
- [24] K. Mal, I. Hussain, K. Shaikh, T. Memon, B. S. Chowdhry, K. Nisar, and M. Gupta, "A new estimation of nonlinear contact forces of railway vehicle," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 28, no. 3, pp. 823-841, Apr. 2021, doi: 10.32604/iasc.2021.016990
- [25] A. Zhao, J. Huang, and J. Sun, "Estimation of wheel-rail structural interactions from motion signals of high-speed train bogie," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 11, pp. 1609-1620, Nov. 2022, doi: 10.1007/s40435-022-01085-2
- [26] X. Xu, S. Sun, L. Niu, Z. Ke, F. Yang, and X. Xiong, "An approach for the estimation of vertical wheel/rail force using dynamic signals," *Vehicle System Dynamics*, vol. 62, no. 6, pp. 1-15, May. 2023, doi: 10.1080/00423114.2023.2214256
- [27] A. C. Pires, G. R. Mendes, G. F. M. Santos, A. P. C. Dias, and A. A. Santos, "Indirect identification of wheel rail contact forces of an instrumented heavy haul railway vehicle using machine learning," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 160, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.107806
- [28] A. Matsumoto vd., "A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations," *Wear*, vol. 265, no. 9-10, pp. 1518-1525, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2008.02.031
- [29] A. Matsumoto vd., "Actual states of wheel/rail contact forces and friction on sharp curves - continuous monitoring from in-service trains and numerical simulations," *Wear*, vol. 314, no. 1-2, pp. 189-197, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.wear.2013.11.046
- [30] A. Kataori, K. Doi, H. Iijima, S. Momosaki, and K. Horioka, "Development of continuous measurement equipment for angle of attack and results of measurements," East Japan Railway Culture Foundation, no. 19, pp. 46-49, May. 2012
- [31] N. Bosso, and N. Zampieri, "A novel analytical method to calculate wheel-rail tangential forces and validation on a scaled roller-rig," *Advances in Tribology*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-11, Aug. 2018, doi: 10.1155/2018/7298236
- [32] Y. C. Cheng, S. Y. Lee, and H. H. Chen, "Modeling and nonlinear hunting stability analysis of high-speed railway vehicle moving on curved tracks," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 324, no. 1-2, pp. 139-160, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.jsv.2009.01.053
- [33] J. Zeng, L. Wei, and P. Wu, "Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel-rail forces," *Journal of Modern Transportation*, vol. 24, pp. 114-123, May. 2016, doi: 10.1007/s40534-016-0107-5
- [34] L. Wei, J. Zeng, P. Wu, and H. Gao, "Indirect method for wheel-rail force measurement and derailment evaluation," *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 52, no. 12, pp. 1622-1641, Sep. 2014, doi: 10.1080/00423114.2014.953180
- [35] V.K. Garg, and R.V. Dukkipati, *Dynamics of railway vehicle systems*. Orlando, Academic Press, 1984
- [36] M. Metin, "Hafif raylı sistemlerin titreşimleri ve kontrolü," Doktora Tezi, Makine Mühendisliği ABD, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013

Özgeçmiş**Nihat BULDUK**

Lisans eğitimini Karabük Üniversitesinde, yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Doktora eğitimi Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. 2020 yılında İstanbul Beykent Üniversitesinde Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak başlamıştır. Çalışma alanları, demiryolu taşıt dinamiği, sistem dinamiği ve kontrolü, mekanik titreşimler üzerine olmaktadır.

E-Posta: nihatbulduk@hotmail.com

**Muzaffer METİN**

Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 2018 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde doktor öğretim üyesi olarak çalışmaya başlamış ve 2020 yılından itibaren doçent olarak öğretim üyeliğine devam etmektedir. Çalışma alanları, demiryolu mühendisliği, mekanik titreşimler, taşıt dinamiği ve sistem dinamiği ve kontrolü üzerine olmaktadır.

E-Posta: mmetin@yildiz.edu.tr

**Deren MARABAOĞLU**

Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Yüksek Lisans eğitimi Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. 2023 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Çalışma alanları, demiryolu taşıt dinamiği, sistem dinamiği ve kontrolü, mekanik titreşimler üzerine olmaktadır.

E-Posta: deren.marabaoglu@yildiz.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Nihat BULDUK: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Doğrulama, Kaynaklar, Görselleştirme, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Muzaffer METİN: Metodoloji, Gözden geçirme ve düzenleme, kontrol. Deren MARABAOĞLU: Simpack Modelleme, simülasyon ve analizleri.



Tren Setlerinin Fren Disklerinde Meydana Gelen Aşınma Problemine Karşı Kompozit Balata Kompozisyonlarında Nitril Kauçuk Kullanımının Etkilerinin Araştırılması

Abdülkadir ÜNAL^{*1}, Ozan DEMİRDALMIŞ²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

*unalabdul@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 21.08.2024, Kabul/Accepted: 16.09.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Fren balataları ve fren diskleri belirli bir ömrü olan ve sürekli değiştirilmesi gereken sarf malzemelerdir. Bu nedenle tren setlerinin fren sistemlerinde kullanılan sürtünme çiftlerinin birbirleriyle uyumlu çalışmasının yanı sıra az aşınmaları ve böylece servis ömürlerinin uzaması arzu edilmektedir. Bu çalışmada dinamometre testleri sırasında fren disklerinde çatlamaya neden olan bir fren balatası kompozisyonuna nitril kauçuk ilavesi yapılmıştır. Daha sonra nitril kauçuk içeren ve içermeyen balataların karakteristiğinin belirlenmesi için balatalar fiziksel ve mekanik olarak bir dizi teste tabi tutulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar balata kompozisyonuna kauçuk ilavesiyle birlikte balatada sertlik oranının düştüğünü, böylece balatanın fren diskine ilk alışma sürecinin kısaldığı ve disklerde meydana gelen aşınma miktarının azaldığını göstermiştir. Mekanik test sonuçları ise kauçuk içeren fren balatalarının sürtünme katsayılarının daha stabil hale gelerek seyir güvenliğini artırdığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nitril Kauçuk, Fren Balatası, Fren Diski, Sürtünme Katsayısı

Investigation of the Effects of Using Nitrile Rubber in Composite Brake Pad Compositions Against the Wear Problem Occurring in Brake Discs of Train Sets

Abstract: Brake pads and brake discs are consumables that have a limited lifespan and need to be replaced continuously. For this reason, it is desirable that the friction pairs used in the brake systems of train sets work in harmony with each other and wear less, thus extending their service life. In this study, nitrile rubber was added to a brake pad composition that caused cracking in brake discs during dynamometer tests. The pads were then subjected to a series of physical and mechanical tests to determine the characteristics of the pads with and without nitrile rubber. The experimental results obtained showed that the hardness of the pad decreased with the addition of rubber to the pad composition and thus the bedding period of the pads to the brake disc is shortened and amount of wear on the discs decreased. The mechanical test results showed that the friction coefficients of the rubber-containing brake pads became more stable and increased the safety of driving.

Keywords: Nitrile Rubber, Brake Pad, Brake Disc, Coefficient of Friction

1. Giriş

Demiryolu araçlarında fren sistemi trafik güvenliği açısından son derece önemlidir. Bu nedenle fren sistemini oluşturan komponentlerin birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışmaları ve bunun yanı sıra ekonomik olmaları gerekmektedir. Fren sisteminin en önemli parçalarından olan fren diski ve balatalar aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürür ve ısı enerjisi atmosfere atılır. Sürtünme sırasındaki fiziksel etkilerden ve termal şoklardan dolayı sürtünme çiftleri aşınır ve zamanla değiştirilmesi gerekir. Ancak bu etkileşim süresince sürtünme çiftlerinde kırılma, çatlama ve benzeri durumların meydana gelmemesi ve sürtünme çiftlerinin servis ömürlerinin uzaması fren balata tasarımcıları için öncelikli konulardan birisidir.

Atıf için/Cite as: A. Ünal, O. Demirdalması, "Tren setlerinin fren disklerinde meydana gelen aşınma problemine karşı kompozit balata kompozisyonlarında nitril kauçuk kullanımının etkilerinin araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 61-71, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1536926

Demiryolu araçlarında frenleme süreci çok karmaşıktır. Bu karmaşıklık, frenleme sırasında; mekanik, termal, pnömatik, elektriksel vb. birçok farklı olayın meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır [1]. Demiryolu araçlarında talep edilen hızın artmasıyla birlikte var olan karmaşıklık her geçen gün daha da artmaktadır [2]. Bu talebin doğal bir sonucu olarak fren balatalarının daha verimli ve daha dayanıklı olması gerekmiş ve tren setlerinde kompozit fren balataları kullanılmaya başlanılmıştır [3]. Demiryolu araçlarının güvenliğini sağlamak için fren balatalarının uygun ve sabit sürtünme katsayısına, mükemmel aşınma direncine, yüksek ısıl dirence, yeterli mekanik mukavemete ve fren diskiyle iyi uyuma sahip olması zorunludur [4]

Demiryolu sektöründe balatalar üzerine yapılan araştırmalar kompozit malzemelerden yapılmış fren balatalarının, dökme demir muadillerine kıyasla sürtünme katsayısı için daha yüksek bir değer ve iyileştirilmiş aşınma direnci sağlayabileceğini göstermiştir [5]. Ancak, daha iyi performans sunan yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi halen devam eden bir araştırma alanıdır [6]. Fren balataları geleneksel olarak diğer bazı bileşiklerle birlikte bir polimer matris içine gömülü asbest liflerinden oluşmaktaydı ancak asbest, kanserojen doğası nedeniyle yasaklandı [7]. Araştırmalar, özellikle asbestin zararlı etkilerinin ortaya çıkması ve kullanımının yasaklanmasının ardından insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen alternatif sürtünme malzemelerine olan ilginin arttığını göstermektedir [8].

Kompozit fren balatasını oluşturan malzemelerin hangi oranda veya hangi miktarda karıştırılarak en uygun sürtünme karakterizasyonunu sağlayacağını bulmak genellikle deneysel yöntemlere dayanmaktadır [9]. Deneysel yöntemler arasında dinamometre testleri en güvenilir ve verimli deney yöntemi olarak kabul edilmektedir [10].

Fren balata kompozisyonları bağlayıcılar, takviye malzemeleri, katı yağlayıcılar, aşındırıcılar ve dolgu malzemeleri olmak üzere beş ana malzemedan oluşmaktadır [11]. Takviye malzemeleri balatanın mekanik mukavemetini artırmak için kullanılır. Takviye malzemeleri arasında mineral elyaf, karbon elyaf, cam elyaf, çelik elyaf ve seramik elyaflar bulunur [12].

Katı yağlayıcılar, özellikle yüksek sıcaklıklarda kararlı sürtünme ve aşınma özelliklerini kontrol etmek için kullanılan grafit ve metal sülfürler gibi malzemelerdir. Fren balatası için alternatif malzemeler kullanmanın amaçları, sürtünme özelliklerini korurken ve balata aşınma oranını azaltırken fren balatası malzeme formülasyonunda potansiyel olarak tahrip edici bileşenlerin kullanımını azaltmaktır [13].

Aşındırıcılar, disk-balata arayüzünde yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı sağlamak için kullanılırlar [14]. Bakır, fren balatalarının temel aşındırıcılarından birisidir ve fren balatalarının tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri, bakır içeriği ile güçlü bir şekilde ilişkilidir [15]. Ancak fren balatası formüllerinde bakır kullanımı son zamanlarda önemli tartışmaların konusu haline gelmiştir; bunun başlıca nedeni bakır ve diğer ağır metallerin potansiyel olarak toksik etkileridir [16]. Amerika Birleşik Devletleri aşınma döküntülerindeki bakır toksisitesi nedeniyle sürtünme malzemelerindeki bakır içeriğini azaltmak için bir mevzuat çıkarmıştır. Bu nedenle, istenen triboloji performansına da sahip olan bakır içermeyen sürtünme malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [17].

Dolgu malzemeleri esas olarak fren balatası üretiminde fren üretilebilirliğini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için ve fonksiyonel değiştiriciler olarak kullanılır. Fren balatası malzemesinin performansını iyileştirmek veya optimize etmek için genellikle az miktarda dolgu maddesi eklenir [18].

Bağlayıcılar tüm malzemeleri bir arada tutar [19]. Bağlayıcı olarak genellikle reçineler kullanılır [20]. Çok az reçine balatanın dayanıklılığını azaltırken, çok fazla reçine yüksek sıcaklıklarda

sürtünme katsayısını düşürebilir ve sertliği önemli ölçüde artırabilir [21]. Kauçuk parçacıklarının balata kompozisyonuna dahil edilmesi, reçine bazlı sürtünme malzemelerinin esnekliğini ve sönümleme özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir [22].

Doğal veya yapay kauçuk bazlı otomotiv balataları üzerine yapılan araştırmalar farklı kauçuk türlerinin farklı balata malzemeleriyle farklı özellikler ortaya koyduğunu göstermektedir. Saffar ve Sucai [23] yaptıkları çalışmada, stiren-bütadien kauçuk (SBR) içeren balataların mekanik özelliklerinde ve sürtünme katsayılarında iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Chang vd. [24] kauçuk parçacıklarının boyutlarının sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri üzerinde etkisini incelemiş ve küçük kauçuk parçacıkların aşınma oranını artırırken sürtünme dengesizliğini daha da kötüleştirdiği sonucuna varmışlardır. Liu vd. [25] nano toz kauçuklar üzerine yaptığı çalışmada balata kompozisyonuna nano-toz kauçuk ilavesinin balatanın sürtünme karakterizasyonu üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Tamayo vd. [26] geri dönüştürülmüş lastik kauçuk parçacıkları ile sürdürülebilir fren balataları üzerinde çalışmalar yapmış ve kauçuğun fren balatalarının ömrünü artırdığı sonucuna varmıştır.

Bu çalışmada Uluslararası Demiryolu Birliğinin (UIC) 541-3 numaralı ve Fren Balatalarının Sertifikalandırılması için Genel Şartlar isimli standardına uygun olarak kauçuk içermeyen bir balata imal edilmiş ve balata gerçek boyutlu bir dinamometre cihazında test edilmiştir. Kauçuk içermeyen balata testi tamamlayamadan parçalanmış ve diske zarar vermiştir. Daha sonra balata kompozisyonuna nitril kauçuk eklenmiş ve dinamometre testleri tekrar edilmiştir. Testler sonrasında yapılan incelemede hem balata hem de diskte hasar meydana gelmediği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma demiryolu disk fren balataları arasında yapılan az sayıdaki çalışmalardan biri olması yanı sıra hem balatanın hem de diskin aşınmasına odaklanması açısından önemlidir.

2. Metot

2.1. Disk balataların prototiplerinin üretilmesi

Disk balatalar UIC 541-3'te tanımlanan UIC 200 boyutlarında imal edilmiştir. Balataların imalat prosesi Şekil 1'de verilmiştir. İlk önce karışımı oluşturan malzemeler Şekil 1-a'da verilen laboratuvar tipi bir mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra karışım Şekil 1-b'de verilen hassas bir terazide tartılmış ve Şekil 1-c'de verilen pres gözlerine belirli ağırlıklarda konulmuştur. Pres 600 ton kapasiteye sahip olup kalıp göz sayısı 4 adettir. Her bir balata parçasının yüzey alanı 100 cm²'dir. Presleme basıncı 300 kgf/cm²'dir. Disk balatalar için Denklem 1 kullanılarak pres basıncı (P) 100 bar olarak hesaplanmıştır.

$$P = \frac{\text{Kalıp göz sayısı} * \text{Balata yüzey alanı} * \text{Presleme basıncı}}{\text{Pres silindir kesit alanı}} \quad (1)$$

Presleme işlemi sıcak pres olarak 150 °C'de yapılmıştır. Presleme işleminden sonra balatalar Şekil 1-d'de verilen fırında 4 saat fırınlanmıştır.



Şekil 1. Disk balataların imalat prosesi a) Laboratuvar tipi mikser b) Laboratuvar tipi hassas terazi c) Sıcak pres d) Fırın

2.2. Fiziksel davranış analizi

Sıcak presleme yöntemi ile elde edilen ve Şekil 2’de verilen balatalara proses akışı içerisinde yer alan taşlama operasyonu uygulanmıştır. Taşlama işlemi balatanın kalınlık değerini tolerans değeri içerisinde yer alması ve yüzey paralellliğini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Üretilen balataların fiziksel davranışını öğrenebilmek için sertlik testi, termogravimetrik analiz, yoğunluk testi gibi testler yapılmıştır. Sertlik testi Qness markasının Q750M modeli kullanılarak ölçülmüştür. Beş farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Ölçümler SAE J2654 standardına göre HRB (Rockwell) cinsinden ölçülmüştür.

Numunelerin yoğunluğu, AND GF-600 marka hassas teraziye bir yoğunluk kiti eklenerek ölçülmüştür. Ölçümler, ASTM D792 standardına uygun olarak Arşimet prensibi kapsamında gerçekleştirilmiştir.



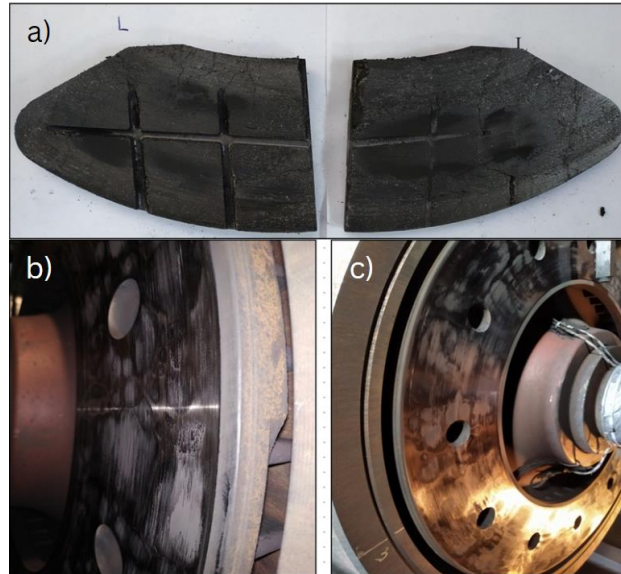
Şekil 2. Prototip imalatı yapılan fren diski

2.3. Mekanik davranış analizi

Balataların mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla gerçek boyutlu bir dinamometre cihazı kullanılarak balatalar UIC 541-3 standardının B2 ve C2 Enerji Klası Test Programına göre test edilmiştir. Bu test programı toplamda 173 frenden oluşmaktadır. Test programına başlamadan önce balataların disklere alışması için yapılan ve yataklama freni adı verilen fren uygulaması yapılmaktadır. Yataklama işleminin tamamlanabilmesi için balata temas yüzeyinin en az %85'inin diske alışması gerekmektedir. Bu amaçla fren diski sprey boya ile boyanır ve boyanın en az %85'inin silinmesi durumunda yataklama frenlerine son verilir. Bu enerji sınıfı test prosedüründe aynı zamanda ıslak ve kuru koşullar için ayrı ayrı fren prosedürü bulunmaktadır. Farklı sıcaklıklarda farklı kuvvetlerde 50 km/h, 80 km/h, 120 km/h, 140 km/h ve 200 km/h hızlarda frenleme yapılarak sürtünme katsayısı değerleri ve sıcaklık değerleri ölçülmektedir.

3. Bulgular

Kauçuk içermeyen karışım toplamda 173 frenden oluşan testin 106. fren uygulamasında Şekil 3'te gösterildiği gibi çatlamıştır. Test sonrası, karışım üzerinde çalışılarak formülasyonda yer alan demir oksit'in belirli bölgelerde disk yüzeyinde sıvanmalara yol açtığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayısında değişimlere ve vibrasyona sebep olduğu görülmüştür. Bu sürtünme katsayısı değişimi neticesinde balatada kılcak çatlaklar oluşmuş ve ıslak test sonrası bu çatlakların derinleştiği düşünülmektedir.



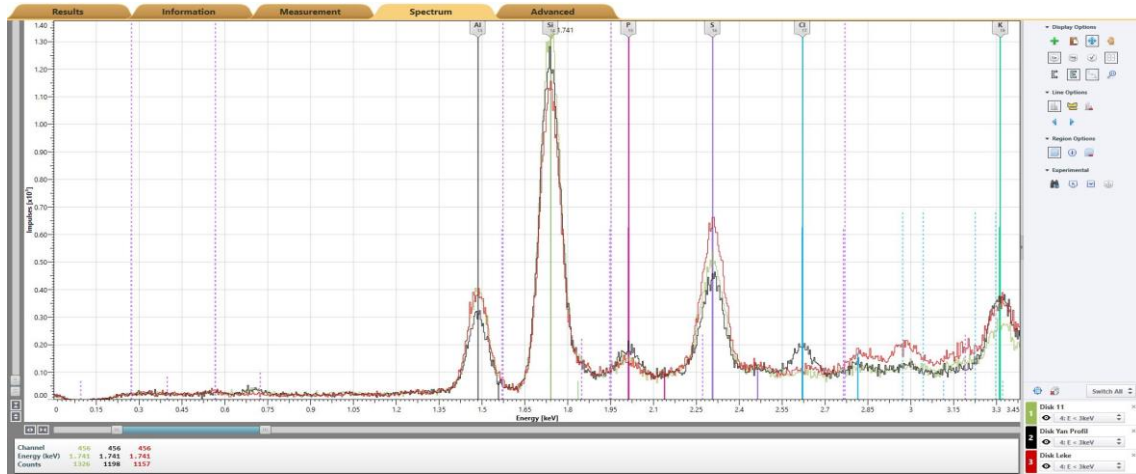
Şekil 3. 106. fren sonrası disk ve balata a) balatada meydana gelen çatlak b) disk'in yakın görüntüsü c) disk'in uzak görüntüsü

Test sonrası yüzeyinde ağır lekelenme görülen disklerin birinden Şekil 4'te verilen parçalar kesilmiştir. Kesilen disk parçalarının balata ile temas edilen yüzeylerindeki lekelenme görülen ve görülmeyen kısımlara XRF analizleri yapılmıştır. Ayrıca diskin yan kesit yüzeyi de XRF cihazının dedektör ve tüpü arasındaki kartezyen geometriyi tamamlayacak şekilde yerleştirilerek, hiç kullanılmamış disk ve test yapılmamış disk arasındaki farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle XRF analizleri, daha sonra parçanın lekelenme görülen ve lekelenme görülmeyen kısmından 1*2 cm numuneler çıkarılarak SEM-EDS analizleri yapılarak sürtünme yüzeyinde diske malzeme geçişleri incelenmiş ve sürtünme katsayısında kararsızlığa sebep olduğu görülen lekelenmelerin nedeni anlaşılmasına çalışılmıştır.



Şekil 4. Dinamometre testleri sonrası lekeli diskten alınan numuneler

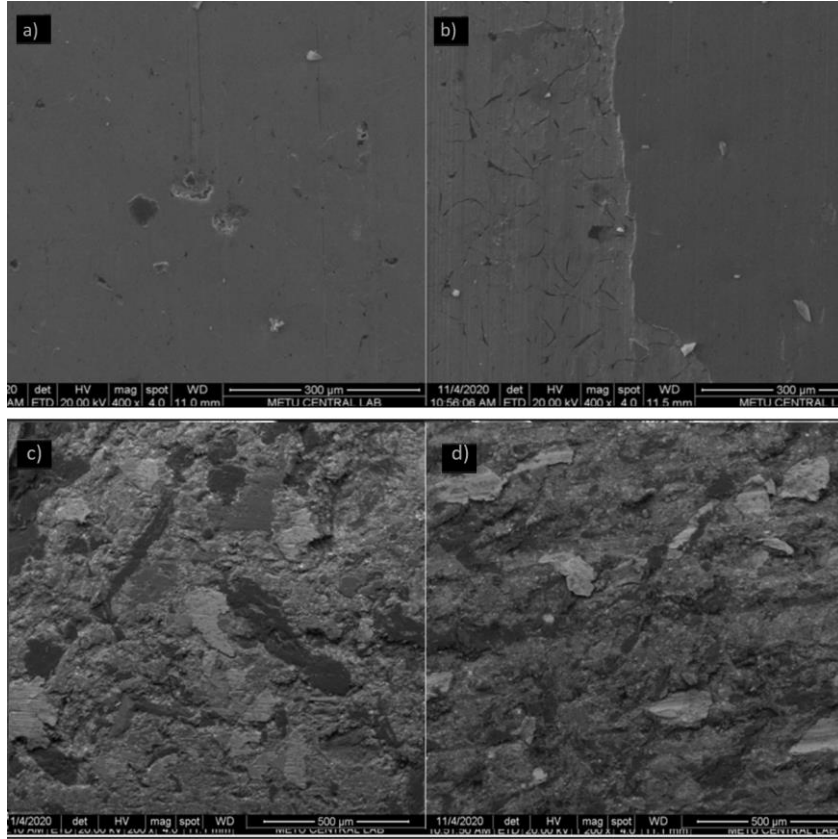
Şekil 5'te verilen XRF spektrum karşılaştırmalarına göre; Al, Si, S, K, Ca, Ti, Zn ve Sb içerikli malzemelerin disk yüzeyine geçiş göstererek sürtünme filmi oluşumunda aktif rol oynadığı görülmüştür. Bu malzemelerden Ca, Zn ve S sayımlarının lekelenmiş yüzeylerde daha fazla olduğu görülmüştür. Fe, Cr ve Mn test sonrası yüzeylerdeki sayımlarında; yan profile göre azalma görülmüştür.



Şekil 5. Test sonrası disk yüzeyi-lekeli kısım-yan profil XRF spektrumları karşılaştırmaları-3-6 keV

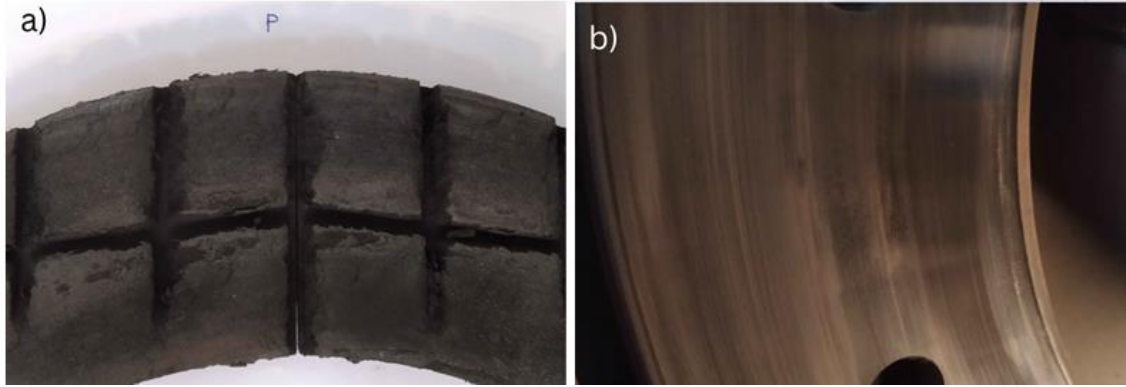
Balata arasında oluşan sürtünme filminin, test sırasında sıcaklıkların da yükselmesi nedeniyle disk yüzeyinde laminar faz değişimlerine neden olduğu; bu nedenle disk yüzeyinde mikro düzeyde oluşan sertlik farklılıklarının sürtünme katsayısındaki değişimleri tetiklediği değerlendirilmiştir.

Balata ve diske ait SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Disk yüzeyine yapılan SEM-EDS analizleri ile; sürtünme filmi oluşumunda, aşındırıcı ve yağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin özellikle etkin olduğu tespit edilmiştir. Disk ve balata arasında oluşan sürtünme filminin, test sırasında sıcaklıkların da yükselmesi nedeniyle disk yüzeyinde laminar faz değişimlerine neden olduğu; bu nedenle disk yüzeyinde mikro düzeyde oluşan sertlik farklılıklarının sürtünme katsayısındaki değişimleri tetiklediği değerlendirilmiştir. SEM görüntülerinde, daha önce XRF spektrumlarıyla tespit edildiği üzere malzemelerin normal proses şartlarında homojen dağılımı ile ilgili bir sorun olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 6. SEM-EDS analizleri a) 300 µm disk yüzeyi lekesiz kısım b) 300 µm disk yüzeyi lekeli kısım c) 500 µm test öncesi balata yüzeyi d) 500 µm test sonrası balata yüzeyi

Kauçuk içeren balatalar toplamda 173 frenden oluşan dinamometre testini Şekil 7'de gösterildiği şekilde sorunsuz bir şekilde tamamlamıştır. Disk ve balata yüzeyinde herhangi bir çatlak veya kırık oluşmamıştır.



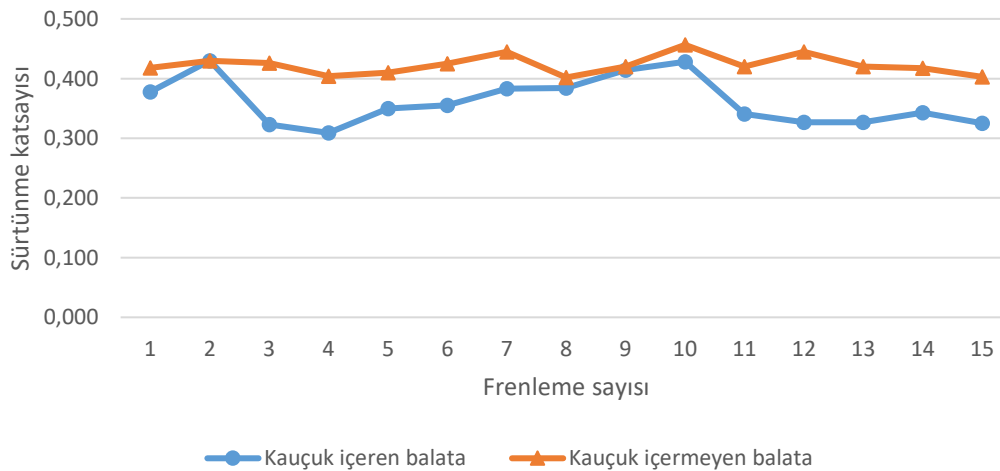
Şekil 7. Kauçuk içeren balata ile yapılan dinamometre sonrası alınan görüntü a) balata b) disk

Kauçuk içeren ve kauçuk içermeyen balataların fiziksel, mekanik aşınma ve dinamometre test sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Aşınma değerleri her iki balata için de 106. Frenlemeye kadar alınmıştır.

Tablo 1. Kauçuk içeren ve kauçuk içermeyen balataların fiziksel ve mekanik değerleri

	Sertlik	Yoğunluk (gr/cm ³)	μ /min.	μ /maksimum	Aşınma (gr)
Kauçuk İçermeyen Balata	44 (HRR)	1,979	0,418	0,537	0,400
Kauçuk İçeren Balata	80 shore D	1,90	0,303	0,431	0,520

Tablo 1 incelendiğinde kauçuk ilavesiyle birlikte sertlik değerinin düştüğünü ve ancak shore değeri ile ölçülebildiği gözlemlenmektedir. Sertlik sürtünme katsayısını etkileyen bir faktördür. Sertliğin düşmesiyle birlikte sürtünme katsayısının da düşmesi beklenmektedir. Karışımlara kauçuk ilavesiyle birlikte sertliğin düştüğü ve bunun bir sonucu olarak da yine sürtünme katsayısında bir düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Yine sertlik değerindeki azalmanın bir sonucu olarak balatalarda meydana gelen aşınma miktarı artmaktadır. Ancak sertliğin azalmasının olumlu bir sonucu olarak balatanın karşı malzemeye yani diske verdiği aşınma miktarı azalmaktadır. 140 km/h hızda yapılan frenlemeler sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları değerleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. 140 km/h hızda yapılan frenlemeler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 8’de verilen grafik incelendiğinde kauçuk içermeyen balatanın daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu ve daha stabil değerler verdiği görülmesine karşı disk ve balatada

meydana getirdiği aşınma ve hasar miktarı seyrüsefer güvenliği açısından kabul edilemez düzeydedir.

Balatalarda sertlik değerinin yanı sıra balataların yoğunluğu da önemli parametrelerden biridir. Balataya kauçuk ilavesiyle birlikte balatanın yoğunluğu bir miktar azalmıştır. Yoğunluğun azalmasıyla birlikte balatanın aşınma oranı artmıştır.

4. Sonuç

Kauçuk içermeyen, yüksek sürtünme katsayısına sahip bir demiryolu balatası gerçek boyutlu imal edilerek dinamometre testine tabi tutulmuştur. 173 fren den oluşan test prosedürünün 106. freninde balata kırılmış ve test sonlandırılmıştır. Disk gözle muayene edildiğinde diskte lekelenmeler ve çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Aynı karışıma fenolik reçine azaltılarak kauçuk ilavesi yapılmıştır. Kauçuk ilavesiyle birlikte sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Sertliğin azalmasıyla birlikte balatanın sürtünme katsayısı bir miktar düşmüş ve demiryolu balataları için arzu edilen değerlere gelmiştir. Kauçuk aynı zamanda fenolik reçine ile birlikte bağlayıcı görevi görse de balatalarda aşınma miktarı artmıştır. Fren balatalarında aşınma arzu edilen bir durum olmasa da balatanın diske karşı agresif olmaması ve diskte kırılmaya veya çatlama yolu açmaması trafik güvenliği açısından son derece önemlidir. Sonuç olarak demiryolu fren balatalarına kauçuk ilavesi balatanın ömrünü azaltmaktadır. Ancak kauçuk ilavesi aynı zamanda balatanın daha yumuşak olmasına neden olmakta ve balatanın çatlamasını önlemektedir. Aynı zamanda balata kompozisyonuna kauçuk ilavesi diskin ömrünü artırmakta ve sürtünme katsayısını daha stabil hale getirmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı 118G031 numaralı 1007 KAMAG projesi kapsamında destekleyen TÜBİTAK, TÜRASAF ve KALE Balata AŞ'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] C. Cruceanu, C. Camil "Aspects Regarding the Braking Capacity of Composite Brake Shoes for Railway Vehicles," *Mater. Plast.*, vol. 56, pp. 29-75, 2019, doi: 10.5772/37552
- [2] R. Sharma, M. Dhingra, R. Pathak, "Braking System in Railway Vehicles," *IJERT*, vol. 4, no. 1, pp. 206-211, 2015.
- [3] A. Unal, "Investigation of braking system and composite brake pads in train sets based on thermo-mechanical finite element analysis," Doctoral Thesis, Marmara University, 2022.
- [4] J. Xiao, S. Xiao, J. Chen, and C. Zhang, "Wear mechanism of Cu- based brake pad for high-speed train braking at speed of 380 km/h," *Trib. Int.*, vol. 150, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106357
- [5] M. Muflikhun *et al.*, Sentanuhady, S. Raghu, "Comprehensive analysis and economic study of railway brake failure from metal-based and composites-based materials," *Forces in Mechanics*, vol. 12, 2023, doi: 10.1016/j.finmec.2023.100223
- [6] M. Khadif, F. Putera, and R. Yotenka, "A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al₂O₃ and Fe₂O₃," *AE*, vol.6, no. 2, 2023, doi: 10.31603/ae.9121
- [7] J. Agunsoye, S. Bello, and A. Bamigabiye, "Recycled ceramic composite for automobile brake pad application," *J. Phys. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 35-46, 2018, doi: 10.2478/jrp-2018-0004
- [8] A. Unal, O. Demirdalmis, "The effects of using apricot kernel shell, an environmentally friendly material, in composite brake pads on friction performance," *Trib. Int.*, vol. 197, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109734
- [9] A. Unal, N. Akkus, S. T. Kandil, "Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 134-144, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1027982

- [10] A. Unal, and N. Akkus, "Analytical and experimental investigation of composite pads created by using coke dust against the fading problem in railway vehicles," *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. F J. Rail Rapid Transit*, vol. 237, no. 2, 2022, doi: 10.1177/09544097221100920
- [11] S. Savetlana, A. Lubis, and L. Aditaya, "Fly ash/phenolic resin composite for brake pad application fabrication, materials and thermal properties," *Composites Theory and Practice*, vol. 20, 2020.
- [12] P. Menezes, P. Rohatgi, and M. Lovell, "Studies on the tribological behaviour of natural fiber reinforced polymer composite," *Green Tribology*, pp. 329-345, 2012
- [13] E. Oluwafemi *et all.*, "Biomass-based composites for brake pads: A review," *IJMET*, vol. 10, no. 3, pp. 920-943, 2019.
- [14] M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, "On the nature of tribological contact in gutomotive brakes," *Wear*, vol. 256, pp. 26-36, 2002.
- [15] M. Kumar, J. Bijwe, "Role of different metallic fillers in non-asbestos organic friction composites for controlling sensitivy of coefficient of friction to load and speed," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 6, pp. 965-974, 2010.
- [16] G. Straffelini *et all.*, "Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment," *Environmental Pollution*, vol. 207, pp. 211-219, 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2015.09.024
- [17] L. Wei, Y. Chay, C. Cheung, and D. Jin, "Tribology performance, airborne particle emissions and brake squeal noise of copper-free friction materials," *Wear*, vol. 448, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203215
- [18] I. Ezekile, F. Inambao, and G. Adewumi, "Effects of fibre, fillers and binders on automobile brake pad performance: A review," *IJMET*, vol. 10, no. 6, pp. 135-150, 2019.
- [19] A. Borawski, "Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads-review," *Sci Eng Compos Mater*, vol. 27, pp. 374-396, 2020, doi: 10.1515/secm-2020-0041
- [20] G. Mieczkowski, "Stress fields at the tip of a sharp inclusion on the interface of a biomaterial," *Mech Compos Mater*, vol. 52, no. 5, pp. 601-610, 2016.
- [21] N. Dureja, N. Bijwe, P. Gurunath, "Role of type and amount of resin on performance behaviour of non-asbestos organic friction materials," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 4, pp. 489-497, 2009.
- [22] M. Eriksson and S. Jacobson, "Tribological surfaces of organic brake pads," *Tribol. Int.* vol. 33, pp. 817-827, 2000.
- [23] A. Saffar, A. Shojaei, "Effect of rubber component on the performance of brake friction materials," *Wear*, vol. 274, pp. 286-297, 2012, doi: 10.1016/j.wear.2011.09.012
- [24] Y. Chang *et all.*, "Size effect of tire rubber particles on tribological properties of brake friction materials," *Wear*, vol. 394, pp. 80-86, 2018, doi: 10.1016/j.wear.2017.10.004
- [25] Y. Liu *et all.*, "Application of nano powdered rubber in friction materials," *Wear*, vol. 261, pp. 225-229.
- [26] A. Tamayao *et all.*, "Preparation and properties of sustainable brake pads with recycled end of life tire rubber particles," *Polymers*, vol. 13, no. 19, doi: 10.3390/polym13193371

Özgeçmiş



Abdulkadir ÜNAL

İstanbul Teknik Üniversitesinde öğretim görevlisi doktor olarak çalışmaktadır. Doktora derecesini Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Araştırma alanları biyo-kompozit malzemeler, fren sürtünme malzemeleri ve demiryolu araçlarıdır.

E-posta: unalabdul@itu.edu.tr

**Ozan DEMİRDALMIŞ**

Kale Balata AŞ'de Ar-Ge Müdürü olarak görev yapmaktadır. Yüksek lisans derecesini Sakarya Üniversitesi'nden, lisans derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi'nden almıştır. Araştırma alanları arasında otomotiv fren balataları, demiryolu fren balataları ve kompozit malzemeler bulunmaktadır.

E-posta: ozand@kalebalata.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Abdülkadir ÜNAL: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Ozan DEMİRDALMIŞ: Görselleştirme, İnceleme, gözden geçirme ve düzenleme.

**Metro Hattı Cer Gücü Elektrifikasyonunun Güvenilirlik ve Hata Ağacı Analizi**Turan ÖLMEZ^{*1}, Büşra ÖLMEZ²¹ Siemens Mobility Ulaşım Sistemleri A.Ş., Mühendislik Birimi, İstanbul, Türkiye² Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*tur.olmez@siemens.com

(Alınış/Received: 12.11.2024, Kabul/Accepted: 25.12.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Demiryolu sisteminin en önemli bileşenlerinden biri, tren hareketi için gerekli enerjiyi sağlamaktan sorumlu olan cer gücü sistemidir. DC cer güç kaynağı sisteminin güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışması, tüm kentsel demiryolu ulaşım sisteminin temelini oluşturur. DC cer güç kaynağı sistemi arıza analizi, koruması ve güç sistemi güvenilirlik değerlendirmesi hakkında araştırma yapmak çok önemlidir. Raylı sistemlerin sürekliliği, güç tedarikinin performansından önemli ölçüde etkilenmektedir. Demiryolu cer gücü elektrifikasyon sisteminin gelişmesiyle ve raylı sistemler yolcu sayısının artmasıyla birlikte RAMS kavramı, Güvenilirlik (R), Kullanılabilirlik (A), Bakım yapılabilirlik (M) ve Emniyet (S) önemi artmıştır. Bundan dolayı, cer gücü elektrifikasyon sisteminin yüksek güvenilirliğini analiz etmek ve iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu makalede, Metro İstanbul A.Ş. cer gücü sistemi güvenilirliği ile ilgili endeks sunulmaktadır ve Hata Ağacı Analizi (FTA) yaklaşımını kullanarak güvenilirliği değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu makale sistem güvenilirliğini artırmanın ve cer gücü elektrifikasyonunun güvenilirlik endeksini artırmak için öneriler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: RAMS, Hata Ağacı Analizi, Cer Gücü Sistemi, Raylı Sistemler, Güvenilirlik Analizi**Reliability and Fault Tree Analysis of Metro Line Traction Power Electrification**

Abstract: One of the most important components of the railway system is the traction power system, which is responsible for providing the necessary energy for train movement. Safe and reliable operation of the DC traction power supply system is the basis of the entire urban railway transportation system. It is very important to conduct research on DC traction power supply system fault analysis, protection and power system reliability assessment. The continuity of railway systems is significantly affected by the performance of power supply. With the development of railway traction power electrification system and the increase in the number of passengers in railway systems, the importance of RAMS concept, Reliability (R), Availability (A), Maintainability (M) and Safety (S) has increased. Therefore, it is necessary to analyze the high reliability of the traction power electrification system and carry out improvement studies. In this article, the index related to the traction power system reliability of Metro İstanbul Inc. is presented and the reliability is evaluated using the Fault Tree Analysis (FTA) approach. In addition, this article provides suggestions for improving the system reliability and increasing the reliability index of traction power electrification.

Keywords: RAMS, Fault Tree Analysis, Traction Power System, Rail Systems, Reliability Analysis**1. Giriş**

Son yıllardaki, ekonomik gelişme ve şehir nüfusunun artmasıyla birlikte, birçok metropolde şehir içi raylı sistem ulaşımın toplam uzunluğu da arz ve talep dengesini sağlayacak şekilde artış gösterdi. Cer gücü sistemi (TPS), elektrikli demiryollarının en önemli sistemlerinden birisidir ve emniyet sorunları giderek daha belirgin hale gelmektedir. Tren işletmesi esnasında yaşanacak bir elektrik kesintisi yalnızca ulaşımı felce uğratmakla kalmayacak, aynı zamanda ciddi ekonomik kayıplara da neden olacaktır. DC cer gücü sisteminin güvenli ve güvenilir çalışması, tüm şehir içi demiryolu ulaşım sisteminin temelini oluşturmaktadır. DC cer gücü sistemlerinin

Atıf için/Cite as: T. Ölmez, B. Ölmez, "Metro hattı cer gücü elektrifikasyonunun güvenilirlik ve hata ağacı analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 72-82, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1583509

arıza analizi, koruma mekanizmaları ve güvenilirlik değerlendirmeleri üzerine araştırmalar yapılması ve bu sistemlerin geliştirilmesi gerekliliği giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, metro hattındaki cer gücü trafo merkezlerinin güvenilirlik analizi yapılmıştır. Cer gücü sistemindeki arızaların temel sebeplerini belirlemek ve bu sebeplerin sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla hata ağacı analizi yöntemi kullanılmıştır. Demiryolu ulaşımında, verimlilik ve hizmet kalitesini sağlamak için, cer gücü sistemlerinde yüksek emre amade oranı elde edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bakım planlanmaları ve güvenilirlik açısından sistemlerin güvenilirlik seviyesinin hesaplanmasının kritik bir bileşen olduğu ele alınmıştır. S.K. Chen, T.K. Ho ve B.H. Mao çalışmada, sistemdeki bileşenlerin güvenilirliğini bütünsel bir şekilde değerlendirmiş, önemli bileşenleri belirlemiş, raylı sistemdeki cer gücü sisteminin güvenilirliğini hata ağacı analizi ile hesaplamış ve bakımın sistemin güvenilirliği üzerindeki etkilerini analiz etmiştir [1]. Ku & Cha, makalelerinde demiryolu trafo merkezinin güvenilirliğini değerlendirmek için minimal kesim kümeleri algoritmasını kullanmıştır [2]. Feng güvenilirlik teorisini kullanarak demir yolu katener sistemlerini değerlendirmek için analitik bir simülasyon yöntemi geliştirdiler [3]. Hayashiya, Japonya'daki on yıllık metro işletme verilerine dayanarak bir DC güç kaynağı sistemindeki her bir bileşenin güvenilirliğini değerlendirdiler ve yedekli bir sistem konfigürasyonu üzerinde niceliksel analiz gerçekleştirdiler [4]. J. Liu, yüksek hızlı trenler için cer gücü sisteminin yapı parametresi ve çalışma prensibine dayalı cer gücü sisteminin güvenilirlik blok diyagramı (RBD) modellerini oluşturmuştur [5]. Doğu Japonya Demiryolu Şirketi'ndeki DC cer gücü sistemi için, cer trafo merkezinin güvenilirliği ile yedekli DC besleme sistemi arasındaki ilişki verilmiştir [6].

2. Cer Gücü Elektrifikasyonu Sistem Tanıtımı

Güvenilirlik ve hata ağacı analizi yapılacak olan raylı sistem hattı Üsküdar - Samandıra M5 Metro hattıdır. İstanbul Anadolu yakasının ikinci, Türkiye'nin ise ilk sürücüsüz metro hattıdır. Üsküdar'dan Samandıra'ya kadar toplam 20 istasyondan oluşmaktadır. M5 metro hattı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi çalışmaları kapsamında Sultanbeyli bölgesine kadar uzatılacaktır. M5 Üsküdar – Samandıra metro hattının istasyon bilgileri aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Şekil 1. M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı istasyonları

Üsküdar – Samandıra hattında toplam uzunluk yaklaşık 26,5 km olduğundan DC tipi gerilim tercih edilmiştir. DC gerilim kullanımı, DC motorun tork hızını kontrol etme ve DC gerilimini kısa mesafe için daha ince iletkenler üzerinden iletme ve daha düşük güç kaybı gibi avantajlarıyla karşımıza çıkmaktadır. Raylı sistemlerde AC ve DC olmak üzere iki tip akım kullanılmaktadır. AC gerilim, enerji dağıtım sürecinin yüksek gerilim tarafında kullanılır. DC gerilim, sadece cer gücü temininde kullanılır [7].

Tablo 1. M5 metro hattı teknik verileri

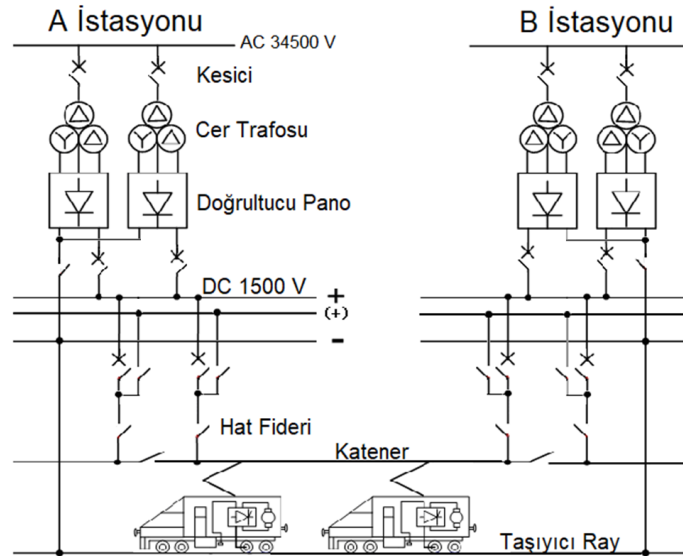
İşletme bilgileri	Değer
Hat uzunluğu:	26,5 km
Hat açıklığı:	Standart (1,435 mm)
Sefer süresi:	43 dk / Tek yön
Sefer sıklığı:	4 dakika (Pik saatlerde)
İstasyon sayısı:	20
Araç seti ve vagon sayısı:	126 adet
Günlük sefer sayısı:	520 sefer
Günlük yolcu sayısı:	311.349 (kişi/gün)

Depo sahası/Kumanda merkezi:	Dudullu
İşletme saatleri:	06:00 - 00:00

Türkiye'nin DC elektrikli demiryolu sisteminde, Ulusal Dağıtım İşletmesi önce TEİAŞ merkezine AC 154kV sağlar, ardından 34,5kV'luk gerilim seviyesine düşürülür ve bu gerilim seviyesine orta gerilim denir. TEİAŞ merkezlerinden metro girişine kadar gelen 34,5kV AC gerilim düşürülür ve trene güç sağlamak için cer trafo merkezi aracılığıyla 1500V DC'ye doğrultulur. Tren, katener üzerinden güç alır ve son olarak akım, taşıyıcı ray üzerinden, dönüş hattıyla cer trafo merkezinde devresini tamamlar [8]. M5 metro istasyonlarının tamamı, TEİAŞ'a ait 3 ana besleme noktasından beslenmekte ve trenlerin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi katener hattı aracılığıyla, cer gücü trafo merkezi (TM) ile sağlanmaktadır. Ulusal şebekeden 3 ana merkezden sağlanan besleme konfigürasyonu aşağıdaki tablo 2'de gösterilmiştir:

Bağlarbaşı TEİAŞ Merkezi	Ümraniye TEİAŞ Merkezi	Dudullu TEİAŞ Merkezi
Üsküdar TM	Çarşı TM	Dudullu TM
Fıstıkağacı TM	Çakmak TM	Çekmeköy TM
Altunizade TM	Altınşehir TM	Sarıgazi TM
Bulgurlu TM		Samandıra TM

Hat boyunca 11 adet cer trafo merkezi bulunmaktadır. Her trafo merkezinde iki adet cer trafosu ve iki adet yardımcı servis trafosu, iki adet AC/DC konvertör, DC şalt sistemi ve katener sistemi bulunmaktadır. Aşağıdaki standart bir cer gücü trafo merkezinin elektriksel tek hat şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Cer trafo merkezi tek hat şeması

Bir demiryolu güç kaynağı sistemi genellikle transformatörler, doğrultucu üniteler, kesiciler, ayırıcı ve katener /3.ray gibi çok sayıda ana bileşen içerir [9]. Metro hatları için gerekli olan güç, doğru akım (DC) formunda sağlanmakta olup, trafo merkezlerinde uygun bir gerilim seviyesine düşürülerek trenlerin hareketi için gereken enerji katener üzerinden iletilmektedir. Bu makalede, analiz edilecek gerçek demiryolu sistemi DC güç kaynağı tarafından beslendiğinden ve tek hat diyagramı Şekil 2'de gösterildiğinden yalnızca DC trafo merkezi yapılandırması ele alınmıştır. Demiryolu sisteminin güç gereksinimine bağlı olarak, güç 154/34,5 kV dönüş oranına sahip bir veya birkaç step-down trafo tarafından sağlanır. Bu nokta, demiryolu güç

sistemine ana besleme noktaları olarak kabul edilir. Orta gerilim (O.G.) seviyesindeki bara, hat güvenilirliğini sağlamak ve ayrıca bir ring bağlantısı sağlamak için bir sonraki trafoya bağlanmak üzere şalt cihazları, devre kesici, röle vb. ile donatılmış olup, bu baradan cer trafosuna ve yardımcı servis trafosuna güç verilir [10]. Demiryolu elektrifikasyonu beş farklı fonksiyonel kısımda görülebilir, bunlar; Orta gerilim seviyesinde bir ana besleme trafosu, orta gerilim kesicileri, 34,5/1,2 kV AC dönüş oranına sahip cer trafosu, 1,2 kV AC/1,5 kV DC oranına sahip AC/DC konvertör ve katener sistemidir.

3. Güvenilirlik Analizi Yöntemi ve Metro Cer Gücü Sistemi

Güvenilirlik değerlendirme yöntemi genellikle ürünün güvenilirliğini matematiksel istatistik veya olasılık teorisiyle analiz etme yöntemini ifade eder [11]. Genellikle nitel analiz ve nicel analiz içerir. Sistem güvenilirlik analizi için analitik yöntemler ve simülasyon yöntemleri olarak ayrılabilen birçok yöntem vardır. Bu makalede, cer gücü elektrifikasyon sisteminin güvenilirliğini incelemek için güvenilirlikle ilgili Hata Ağacı Analizi yöntemi tanıtılmış ve demiryolu sistemine uygulanmıştır. 1962'de H. A. Watson, bir kontrol sistemini değerlendirmek için ilk olarak Hata Ağacı Analizi (FTA) kavramını geliştirmiştir [12]. FTA o zamandan beri çok çeşitli konu ve uygulamalara sahip kapsamlı bir değerlendirme yöntemi haline gelmiştir. Sistemin arıza nedenlerinin çeşitli kombinasyonlarını ve bunların oluşma olasılığını belirlemek için bir hata ağacı diyagramı çizilmektedir. FTA kullanım amacı, güvenilirlikle ilgili teoriler ve endeksler aracılığıyla sistemdeki çeşitli ekipmanların kullanımını tam olarak iyileştirmektir, böylece demiryolu cer gücü kaynağı sistemi daha kararlı bir şekilde çalışabilir. Bu makalede, arıza teşhisi ve bakımı için cer trafo merkezleri gücü kaynağı sisteminin güvenilirliğini etkileyen faktörleri belirlemek için hata ağacı analizi kullanılmıştır [13]. Mevcut literatüre dayanarak, FTA'yı hata ilişkisini resmeden bir yöntem olarak kullanan bu makale, Metro İstanbul'un M5 Üsküdar – Samandıra metro hattının elektrikli demiryolu cer gücü sisteminin güvenilirliğini, sistem arızalarının nedenlerini analiz etmekte ve sistem güvenilirliğini iyileştirmek için yenilikçi önlemler önermektedir.

3.1. Güvenilirlik endeksi

Güvenilirlik endeksi, güvenilirlik teorisinin önemli bir parçasıdır. Güvenilirlik hesaplamalarında faydalanılması gereken matematik altyapısı bulunmaktadır. Güç sisteminin güvenilirliğini nicel olarak değerlendirmek için bu bölümde güvenilirlik endeksleri tanıtılmıştır. Güvenilirlik sistemin belirtilen koşullar altında ve belirtilen zaman t içinde belirtilen işlevi yerine getirme olasılığına sistemin güvenilirliği denir. Güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$ ile ifade edilir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Paralel bağlı sistemlerde güvenilirlik hesabı, sistemin herhangi bir bileşenin çalışmaması durumunda diğer bileşenlerin devreyi tamamlayabilme yeteneğine dayanır. Bu durumda sistemin güvenilirliği, bileşenlerin güvenilirlik değerlerine bağlıdır. Bir paralel sistemde, n sayıda bileşen varsa ve her bir bileşenin güvenilirlik katsayısı R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ise, sistemin toplam güvenilirliği R_s şu formülle hesaplanır:

$$R_s = 1 - \prod_{k=1}^x (1 - R_k) \quad (2)$$

Bu formülde “x” bileşen sayısını, R_k k. bileşenin güvenilirlik değerini ve R_s sistemin güvenilirlik endeksini göstermektedir.

3.2. Arıza oranı

Birim zamanda arızalanan bileşen sayısının toplam bileşen sayısına oranına arıza oranı denir ve zamanın bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon, güvenilirlikle ilgili kritik fonksiyonlar olan güvenilirlik fonksiyonu, arıza oranı (λ : arıza/saat) ve ortalama yaşam süresi gibi kavramlar için bir temel oluşturmaktadır [14].

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (3)$$

3.3. MTTF

MTTF (mean time to fail), bir sistem veya bileşenin ilk arızasına kadar geçen ortalama süreyi ifade eder. Genellikle, onarılamayan (non-repairable) sistemler için kullanılır. MTTF, bir ürünün veya sistemin güvenilirliğini değerlendirmek için önemli bir ölçüttür; daha yüksek bir MTTF, ürünün daha güvenilir olduğunu gösterir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4)$$

Sabit arıza oranına sahip bir seri sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$MTTF = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (5)$$

3.4. MTBF

MTBF (mean time between failure) bir sistemin veya cihazın arızalar arasındaki ortalama çalışma süresini gösteren bir güvenilirlik ölçüsüdür. Genellikle onarılabilen mekanik, elektronik ve yazılım sistemlerinde kullanılmaktadır ve bir ürünün ne kadar süre boyunca sorunsuz çalışabileceğini tahmin etmek amacıyla hesaplanır. MTBF, güvenilirlik analizinde önemli bir rol oynar. Ancak, bu kavram arızaların onarılabildiği sistemlerde kullanılır [15].

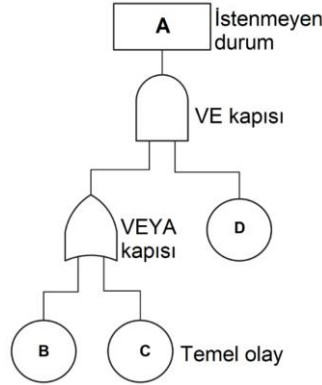
$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (6)$$

$$MTBF = \frac{\text{Toplam Çalışma Süresi}}{\text{Toplam Arıza Sayısı}} \quad (7)$$

3.5. FTA hata ağacı analizi

Hata ağacı analizi, istenmeyen bir olay olan en üstteki olayı yada durumu açıkça tanımlamakla başlar. Daha sonra en üstteki istenmeyen olayın oluşumuna yol açabilecek çeşitli olay kombinasyonları belirlenir. Hata ağacındaki çeşitli seviyeler, daha düşük seviyedeki olayların yayılmasının en üstteki olayın oluşumuna nasıl yol açtığını gösterir. En üstteki olaylar genellikle istenmeyen sistem arızalarını veya sistemi tehlikeye atan olayları ifade eder. En alttaki olaylar genellikle bir bileşen arızasını veya bir insanın hatalı çalışmasını ifade eder. Şekil 3'te, hata ağacında kullanılan temel olay sembollerini ve mantık kapısı sembollerini ve bir hata ağacı

örneğini gösterir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, A en üstteki olaydır ve B, C, D en alttaki temel olaylardır. Kapılar olarak bilinen mantık operatörleri olayların nasıl oluşturulacağını belirler. Temel olay, AND (ve) kapıları ve OR (veya) kapıları gibi mantıksal semboller aracılığıyla bir veya daha fazla üst olaya bağlanır. AND ve OR lojik kapıları, dijital elektronik devrelerinde temel bileşenlerdir ve binari lojiği kullanarak çeşitli hesaplamalar yaparlar. Her iki kapı da belirli girişlere dayanarak bir çıkış üretir, ancak çıkışların hesaplanma mantığı farklıdır. AND kapısı, yalnızca tüm girişler 1 (doğru) olduğunda çıkışı 1 yapar. Eğer girişlerden biri bile 0 (yanlış) olursa, çıkış 0 olur. OR kapısı, girişlerden en az birisi 1 (doğru) olduğunda çıkışı 1 yapar. Yalnızca tüm girişler 0 olduğunda çıkış 0 olur [16].



Şekil 3. Hata ağacı analizi örneği

FTA hata ağacı analizini oluştururken izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki şekil 4'te gösterilmiştir.

- ▼ İstenmeyen durum ve alt olayların belirlenmesi.
- ▼ Alt olayların belirlenmesi.
- ▼ Lojik fonksiyonları kullanarak istenmeyen durum ile alt olayların bağlantısının yapılması.
- ▼ Hata olayının sıklığını ve olay ağacındaki dalların olasılıklarının belirlenmesi.
- ▼ Belirlenen sonuçlar için olasılıkları hesaplanması.

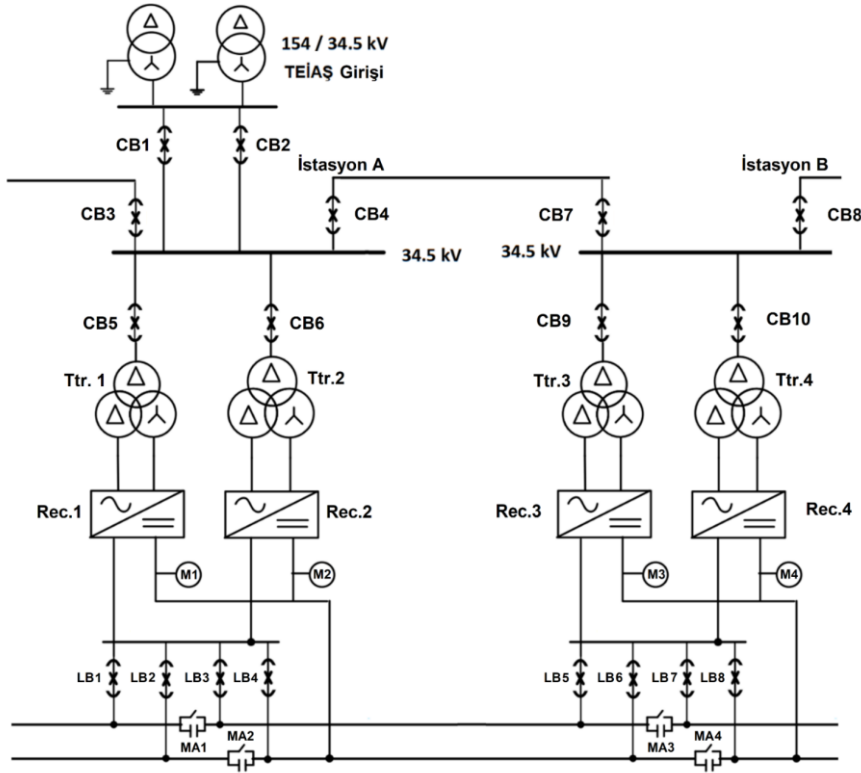
Şekil 4. Hata ağacı analizi adımları

3.6. Minimum kesim kümesi analizi (MCS)

Minimum kesim kümesi (MCS), bir arada meydana geldiklerinde en üst olayın meydana gelmesine neden olan en küçük olay grubudur. Kesim kümesi analizi, kapı mantığına dayalı olarak gerçekleştirilen nitel bir analizdir. Arıza ağacındaki olaylar için ayrıntılı sayısal bilgi mevcutsa, en üst olayın meydana gelme olasılığını sayısal olarak sağlamak için nicel bir analiz yapılabilir. Minimum kesim kümesindeki olasılıkların hepsi meydana gelirse en üst olayın meydana gelmesine neden olacak en küçük bileşen ve insan hatası kombinasyonu gerçekleşmiş olur. Arızaların hepsi temel veya gelişmemiş olaylara karşılık gelir. Bir üst olay birçok minimal kesme kümesine sahip olabilir ve her minimal kesme kümesi farklı sayıda temel veya gelişmemiş olaylara sahip olabilir. Minimal kesme kümesindeki her olay, üst olayın gerçekleşmesi için gereklidir ve minimal kesme kümesindeki tüm olaylar üst olayın gerçekleşmesi için yeterlidir.

4. Cer Gücü Sisteminin Güvenilirlik Analizi ve FTA Modeli

M5 metro hattının FTA modeli hattın besleme senaryosu dikkate alınarak yapılmıştır. FTA modeli oluşturulurken 20 istasyondaki trafo merkezi alt bileşenlere ayrılarak ve bu bileşenlerin arızalanması durumu ayrı ayrı ele alınmıştır. Cer gücü sistemi onarılabilir bir sistem olmasına rağmen, tek bileşen ölçeğinde onarılamaz bileşenleri de içermektedir. Öte yandan, güvenilirlik olasılık dağılımları kullanılarak hesaplanabilen zamana bağlı bir niceliktir. Şekil 5, birbirine komşu 1500V DC cer trafo merkezi besleme düzenlemelerini ve temel bileşenlerini göstermektedir. Sistemde 6 ana bileşen vardır: kesiciler (CB), cer transformatörleri (Ttr), doğrultucular (Rec) negatif geri dönüş motorlu ayırıcısı (M), istasyonları katener bağlantısını kuple etmek için kullanılan motorlu ayırıcılar (MA) ve yük ayırıcılar (LB). Her bileşen, FTA'daki alt olay olarak tanımlanır ve etiketlenir ve buna karşılık gelen olay kodu aşağıdaki şekil 5'te gösterilmiştir [17].



Şekil 5. Birbirine komşu cer gücü trafo merkezlerinin tek hat şeması

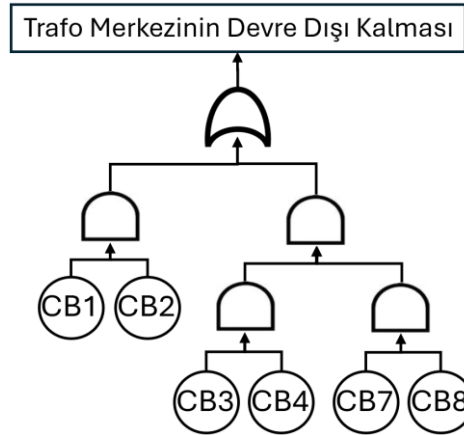
Her trafo merkezi için güvenilirlik endeksleri hesaplanmıştır, mevcut metro elektrifikasyon sisteminde cer gücü trafo merkezleri aynı donanımlara sahip olduğundan dolayı TEİAŞ girişinin de olduğu bir trafo merkezinin sonuçları paylaşılmıştır. Tablo 3'te trafo merkezinin, MTBF, arıza oranı (λ) ve yıllık bazda güvenilirlik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3. TEİAŞ merkezlerinden besleme konfigürasyonu

Arızalanan Ünite	Arıza Tipi	MTBF (Yıl)	Arıza Oranı	Güvenilirlik
TEİAŞ Giriş Hücreleri	Hücre Arızası	24,7	$4,621 \times 10^{-6}$	0,960405
	OG Kablo Arızası	8,32	$1,372 \times 10^{-5}$	0,886751
OG Hücreler	Kesici Arızası	15,26	$1,38 \times 10^{-5}$	0,936570
	Sıcaklık Rölesi Arızası	23,41	$4,876 \times 10^{-6}$	0,958182
	OG Kablo Arızası	4,74	$3,972 \times 10^{-6}$	0,809799
CER Trafoları	Cer Trafosu Arızası	47,21	$2,418 \times 10^{-6}$	0,979040
	Diyot Arızası	19,52	$5,847 \times 10^{-6}$	0,950060
	OG Kablo Arızası	4,74	$3,972 \times 10^{-6}$	0,809799

Negatif Hücresi	Motorlu Ayırıcı Arızası	57,36	$1,991 \times 10^{-6}$	0,982718
	DC Kablo Arızası	15,14	$2,071 \times 10^{-6}$	0,936084
Doğrultucu Hücreler	Diyot Arızası	9,63	$3,852 \times 10^{-6}$	0,901367
	Ters Akım Arızası	52,19	$2,187 \times 10^{-6}$	0,981021
DC Giriş Hücresi	DC Giriş Hücresi Arızası	28,06	$4,068 \times 10^{-6}$	0,964989
Kuplaj Ayırıcısı	Ayırıcı Arızası	17,82	$6,406 \times 10^{-6}$	0,945424
DC Yük Ayırıcı	DC Kablo Arızası	11,4	$1,859 \times 10^{-6}$	0,916019
	Ayırıcı Arızası	42,18	$2,706 \times 10^{-6}$	0,976570
Katener Hattı	Kontak Telinin Erimesi	17,82	$6,406 \times 10^{-6}$	0,945424
	Kontak Telinin Bükülmesi	21,93	$5,205 \times 10^{-6}$	0,955425

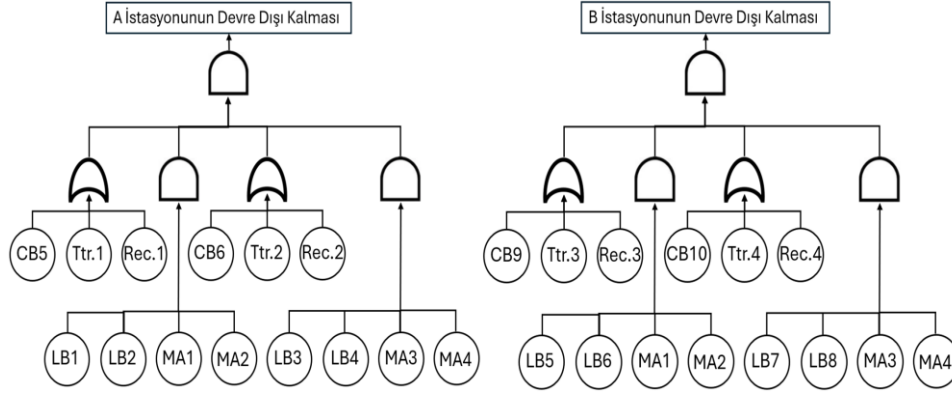
M5 hattının FTA modeli metro hattında kullanılan tüm bileşenleri içererek tasarlanmıştır. FTA modelinde komşu trafo merkezleri birbirini şekil 5’te gösterildiği gibi motorlu ayırıcılar aracılığıyla kuple edebildiğinden dolayı istasyonların enerjisiz kalması durumu ayrı ayrı analiz edilmiştir. Metro hatlarının dizayn aşamasında yapılan, DC röle koruma – koordinasyon çalışmasında komşu iki trafo merkezinin kaybedilmesi durumunda tren işletmesi yapılamamaktadır. FTA analizinde trafo merkezinin devre dışı kalması için komşu iki trafo merkezinin yada TEİAŞ girişinin kaybedilmesi gerekmektedir. Bu senaryonun FTA diyagramı aşağıdaki şekil 6’da paylaşılmıştır.



Şekil 6. Trafo merkezinin devre dışı kalması için hata ağacı

Trafo merkezinin devre dışı kalması için minimum kesim kümesi olan CB1 ve CB2 orta gerilim kesicilerinin devre dışı kalması ihtimalinin gerçekleşmesi yeterlidir. Oluşturulan FTA modeli ve buna bağlı olarak yapılan güvenilirlik hesaplamaları sonucunda FTA birimleri ve ele alınan tüm sistem için elde edilen güvenilirlik değeri 0,977108 olarak hesaplanmıştır. CB3, CB4, CB7 ve CB8 hücrelerinin devre dışı kalması ile trafo merkezini devre dışı bırakacak diğer senaryodur. Tasarlanan FTA modeline göre trafo merkezinin güvenilirlik hesabı yapılmıştır. Orta gerilim kesicileri yedekli olduklarından dolayı güvenilirlik değeri denklem 2’de paylaşılan formüle göre 0,94361’dir.

FTA modelinde, istasyon bazlı güvenilirlik analizi yapıldığında, M5 metro hattı cer gücü sistemini oluşturan trafo merkezlerinde, orta gerilim kısmından, trenin enerjisini pantograf aracılığıyla aldığı katener arasında oluşabilecek bir arıza, ilgili istasyonun devre dışı kalmasına sebep olmaktadır. FTA modeli tasarlanırken DC yük ayırıcılar trafo merkezinin yedekliliğini sağladığından dolayı “ve” lojik kapısı kullanılmıştır. Bu arızaya yönelik olarak geliştirilmiş hata ağacı, şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. A ve B istasyonunun devre dışı kalması için hata ağacı

Şekil 7’de gösterildiği gibi cer trafosunu enerjilendiren orta gerilim hücresi, cer trafosu, doğrultucu ünite, hat fiderleri, negatif dönüş panosu ve dc yük ayırıcı gibi unsurların arıza olasılıkları dikkate alınarak bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Birbirine komşu olan A ve B istasyonlarının her ikisi de devre dışı kaldığında yani aynı anda iki trafo merkezinin kaybedildiği (N-2) senaryoda istasyonların katener etaplarını kuple ederek enerjilendirilmesini sağlayan motorlu ayırıcılar da devre dışı kalırsa işletme durmaktadır [18].

Tablo 4. Komşu istasyonların güvenilirlik analizi

Arızalanan Birim	Güvenilirlik
A İstasyonu	0,987163
B İstasyonu	0,987163
İşletmenin Durması	0.999836

5. Sonuç

Bu çalışmada, metro hattı cer gücü trafo merkezlerinin güvenilirlik değerlendirmesi sunulmaktadır. Cer gücü sistemindeki hataların kök nedenlerini tanımlamak ve bu nedenlerin sistem üzerindeki etkilerini incelemek için hata ağacı analizi kullanılmıştır. Tren çekiş gücünü sağlayan trafo merkezlerinin tamamı aynı elektrik sistemine sahip olduğundan dolayı aynı katener etabını besleyen komşu trafo merkezlerinin güvenilirlik değerleri paylaşılmıştır. Metro sistemi'nin pratik bir sistemi için temel bileşenlerin MTBF (Mean Time Between Failure) ve hata ağacı analizine göre minimal kesim kümesinin güvenilirlik indekslerinin hesaplanması sunulmuştur.

Güvenilirlik indeksleri istasyonlarda bulunan her alt bileşen için hesaplanmıştır ve sonuçları tablo 4’te verilmiştir. Tablo 3’te paylaşılan MTBF değerleri, gerçek arıza sayılarına göre hesaplanmıştır. Bu çalışma, komşu trafo merkezlerinin beslediği katener bölgesinin tamamen enerjisiz kalarak işletmeyi durdurma olasılığının son derece düşük olduğu hesaplanmıştır. Güvenilirlik hesaplamasının doğruluğu, geçmiş deneyimleri yansıtan mevcut verilere bağlıdır. Metro elektrifikasyonu yedekli tasarlandığından dolayı güvenilirlik değerleri oldukça yüksektir fakat tablo 3’de paylaşıldığı gibi sistemde güvenilirlik değeri en düşük olan ve en çok arıza yaşanan orta gerilim hücrelerine bağlanan XLPE orta gerilim kablolarında yaşanmaktadır. Orta gerilim kablolarının MTBF değerlerinin düşük olması ilgili orta gerilim hücrelerinin de güvenilirlik değerlerini azaltmaktadır. Orta gerilim hücreleri bir ring kaybedildiğinde diğer ring istasyon enerjisini sağlamada yeterli olduğundan ve arızalarının giderilmesi kısa sürede tamamlandığından dolayı yedekliliğe gerek duyulmamaktadır. Fakat OG kabloların güvenilirliğinin artırılması için her ek noktasının yıllık olarak hi-pot ve izolasyon testine tabi tutulması gerekmektedir.

Metro elektrifikasyon sisteminde güvenilirliği artırmak için en etkili yöntemler yedekliliği artırmak ve kestirimci bakımlar yapmaktır. Raylı sistemlerin cer gücü sistemler alt bileşenleri hassastır ve sürekli olarak pantograf kömürü tozuna maruz kalmaktadır. Bu nedenle sistemde oluşabilecek arızanın önceden tespiti ve proaktif bir yaklaşım için kestirimci bakımların her bakım döneminde yapılması gerekmektedir. Bu yöntemle işletmenin ve sistemin güvenilirliği artacaktır.

Teşekkür

Bu makalenin hazırlanmasına izin ve destek veren Metro İstanbul A.Ş. yetkililerine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] S.K. Chen, T.K. Ho ve B.H. Mao, "Reliability evaluations of railway power supplies by fault tree analysis" *IET Electric Power Applications*, vol 1, pp. 161–172, April 2007.
- [2] B.H. Ku and J.M. Cha, "Reliability assessment of electric railway substation by using minimal cut sets algorithm," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 135-139, April 2011
- [3] D. Feng, S. Lin, Q. Yang, X. Lin, Z. He, and W. Li, "Reliability evaluation for traction power supply system of high-speed railway considering relay protection," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 5, no. 1, pp. 285–298, Mar. 2019
- [4] H. Hayashiya, M. Masuda, Y. Noda, K. Suzuki, and T. Suzuki, "Reliability analysis of DC traction power supply system for electric railway," in Proc. *19th Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE, ECCE Europe)*, Sep. 2017, pp. 1–6.
- [5] P. P.D. Meyer, *The Reliability of the Electric Transmission Infrastructure in the 21st Century*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006, p. 1.
- [6] E. Zio, "Reliability engineering: Old problems and new challenges," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 94, no. 2, pp. 125–141, Feb. 2009.
- [7] T. Ölmez, "Energy distribution modelling in railway systems" M.Sc. thesis, Marmara University, Dept. Elect. and Elec. Eng., İstanbul, 2020
- [8] Metro İstanbul A.Ş., "M5 Üsküdar-Samandıra Metro Hattı," 2018. [Online]. Available: <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/HatDetay?hat=M5> [Accessed: Oct. 13, 2024].
- [9] Hu, J. et al., "The research of DC traction power supply system and the DDL protection algorithm based on MATLAB/Simulink," in *CICED 2010 Proceedings* vol. 12, Nanjing, China, 2010, pp. 1-6
- [10] *Railway Applications – Supply Voltages of Traction Systems*, EN 50163, European Committee for Standardization (CEN), 2004.
- [11] C. R. Avery, "Power electronics reliability in rail traction," in *IEE Colloquium on Power Electronics Reliability - Promise and Practice. Does it Deliver?*, vol. 202, no. 6, pp. 1-7, May 1998.
- [12] S. Sagareli, "Traction power systems reliability concepts," in *ASME/IEEE Joint Rail Conference, Proceedings of the 2004*, Baltimore, USA, 2004, pp. 35-39
- [13] *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*, EN 50126, European Committee for Standardization (CEN), 2017.
- [14] Jun-Min Cha and Bun-Hui Ku, "Reliability Assessment of Railway Power System by using Tree Architecture," *KIEE*, vol. 59, no.9, p.9-15, Jan 2010.
- [15] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", *Plenum Press*, vol. 16, no. 7, pp. 322-354, Feb 1996.
- [16] Sang-Log Kwak, Jong-Bae Wang, Bong-Seob Lee and Chan-Woo Park, "Construction of Event Tree & Fault Tree for Train Fire Risk Assessment", *JKSR* Vol. 11, P.530-535, Dec 2008.
- [17] E. Ruijters and M. Stoelinga, "Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools," *Comput. Sci. Rev.*, vols. 15–16, pp. 29–62, Feb. 2015.
- [18] P. P. D. Meyer, "The Reliability of the Electric Transmission Infrastructure in the 21st Century," *IEEE*, vol. 28, pp. 1-10, Nov. 2006

Özgeçmiş**Turan ÖLMEZ**

1990 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İstanbul Aydın Üniversitesinde, Yüksek lisans Eğitimini Marmara Üniversitesinde tamamlamıştır. Doktora eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. Siemens Mobility A.Ş.'de Sistem mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları raylı sistemlerdir.
E-Posta: turan.olmez@siemens.com

**Büşra ÖLMEZ**

1993 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesinde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimine Yıldız teknik üniversitesinde devam etmektedir. Metro İstanbul A.Ş.'de elektrik bakım mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları raylı sistemlerdir.
E-Posta: busra.olmez@metro.istanbul

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Turan ÖLMEZ: Kavramsallaştırma, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Büşra ÖLMEZ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol ve Düzenleme.



Ray Bağlantı Elemanlarının Deneysel ve Yapay Zekâ Destekli Korozyon Direncinin İncelenmesi

Mustafa DURSUNLAR^{*1}, Zakir TAŞ²

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr

(Alınış/Received: 10.11.2024, Kabul/Accepted: 17.12.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Gezegimizdeki küresel iklim değişikliği son yıllarda olumsuz etkilerini iyice hissettirmeye başlamıştır. Bu durum atmosfer koşullarını değiştirmekte ve mühendislik yapıları için tehdit oluşturmaktadır. Ağır iklim ve atmosfer koşulları altında işletilen demiryolları için özellikle ray bağlantı elemanlarının mekanik özellikleri yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada HM tipi ray-travers bağlantısındaki 38Si7 kimyasal bileşime sahip SKL14 gergi kısıkaçının EN ISO 9227 standardında deneysel olarak yapay atmosferde tuz püskürtme korozyon testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında ilk pas 0,5 saat ve tamamen pas 1 saatte gözlemlenmiştir. 1 saat sonundaki ağırlık kaybı 0,0137 g olarak ölçülmüştür. Korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 µm/yıl) olarak hesaplanmıştır. Deneysel korozyon verileriyle yapay zekâ destekli makine öğrenmesi yardımıyla tahmin modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak kaplamasız gergi kısıkaçlarının korozyon performansının demiryolu standartları ve kullanımı için uygun olup olmadığı hem deneysel hem de yapay zekâ destekli olarak açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, 38Si7, SKL, Gergi Kısıkaçı, Korozyon, Yapay Zekâ

Experimental and Artificial Intelligence Supported Investigation of Corrosion Resistance of Rail Fasteners

Abstract: Global climate change on our planet has started to make its negative effects felt in recent years. This situation changes atmospheric conditions and poses a threat to engineering structures. For railways operated under severe climatic and atmospheric conditions, especially the mechanical properties of rail fasteners are insufficient. In this study, experimental artificial atmosphere salt spray corrosion tests of SKL14 tension clamp with 38Si7 chemical composition in HM type rail-traverse connection were carried out in accordance with EN ISO 9227 standard. In the test results, the first rust was observed in 0.5 hours and the complete rust was observed in 1 hour. Weight loss at the end of 1 hour was measured as 0.0137 g. The corrosion rate was calculated as 0.000749 mm/y (0.749 µm/y). With experimental corrosion data, predictive models were created with the help of artificial intelligence supported machine learning. As a result, the corrosion performance of uncoated tension clamps is explained both experimentally and with artificial intelligence support whether they are suitable for railway standards and use.

Keywords: Railway System, 38Si7, SKL, Tension Clip, Corrosion, Artificial Intelligence

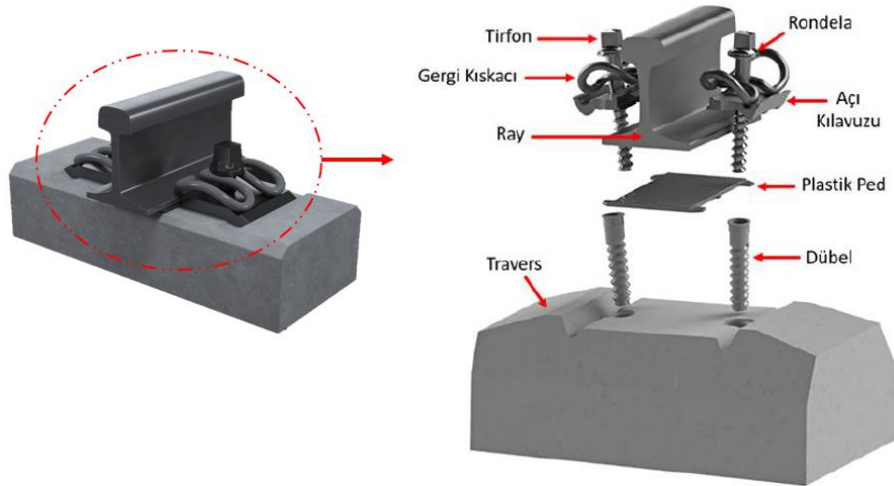
1. Giriş

Son yıllarda nötr karbon, küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik stratejileri önemli bir hale gelmektedir. Bu amaçla karbon salınımlarının nötr veya en aza indirilmesi istenmektedir. Bu sayede küresel ısınmayla mücadele etkin ve verimli bir şekilde kararlılıkla sürdürülecektir [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Raylı sistemler endüstrisinde bu prensipler doğrultusunda önemli adımlar atılmaktadır. Özellikle son yıllarda ray bağlantı elemanlarından gergi kısıkaçlarının düşük karbon içeriğine sahip olması istenmektedir. Bu sayede demiryollarında kısmi olarak karbon tüketimi ve salınımı sınırlandırılacak olup, küresel ısınma ve küresel iklim değişikliğinde etkin rol

Atıf için/Cite as: M. Dursunlar, Z. Taş, "Ray bağlantı elemanlarının deneysel ve yapay zekâ destekli korozyon direncinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 83-95, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1582533

oynayacaktır [8], [9], [10], [11]. Gergi kısıkaçlarının düşük karbon oranına sahip olması hem Paris İklim Anlaşmasını desteklemekte hem de mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Gergi kısıkaçlarındaki düşük karbon oranı plastisitenin zayıflığını alarak tokluk ve yorulma ömrünü artırmaktadır. Bu sayede gergi kısıkaçlarının bakım, onarım, servis ve kullanım ömürleri artacaktır. Dolayısıyla raylı sistem işletmelerinin giderleri azalarak özellikle maddi açıdan katkı sağlayacaktır [12], [13], [14], [15].

Gergi kısıkaçları dünya üzerinde birçok kimyasal bileşime sahip olarak demir-çelik tesislerinde standart ve klasik kangal üretim prensipleri doğrultusunda imal edilmektedir [16]. Son yıllarda karbon salınımla mücadele kapsamında gergi kısıkaçlarının karbon içerikleri azaltılmaktadır. Bu kapsamda demiryollarında son yıllarda genellikle düşük karbon içeriğine sahip Alman standartlı 38Si7 kimyasal bileşime sahip gergi kısıkaçları imal edilerek kullanılmaktadır [17]. 38Si7 kimyasal bileşimli gergi kısıkaçları son yıllarda yüksek hızlı tren hatları, ağır taşımacılık, konvansiyonel ve kent içi raylı sistem hatlarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [18]. Esasen yay çeliği olan gergi kısıkaçlarına mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla imalat esnasında dekarbürizasyon, ısıl işlem ve kaplama işlemleri yapılmaktadır [19], [20]. 38Si7 kimyasal bileşime sahip gergi kısıkaçları, HM tipi ray-travers bağlantısının bir elemanı olarak endüstri ve literatürde SKL olarak adlandırılmaktadır [21]. HM tipi bağlantı ve elemanlarına ait görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. HM tipi bağlantı ve elemanları

Bu çalışmanın özgünlüğünü, literatürde gergi kısıkaçlarının korozyon performansı ile ilgili yetersiz çalışmanın olması desteklemektedir. Literatürdeki çalışmalar genellikle aşınma ve teorik yorulma üzerine yoğunlaşmaktadır. Dursunlar ve ark. [17] 38Si7 kimyasal bileşimli SKL14 gergi kısıkaçına akımsız Nikel-Bor kaplama yapmış ve aşınma direncini incelemiştir. Sonuç olarak yapılan kaplamanın altlık malzemenin aşınma direncini 15 kattan daha fazla artırdığını bildirmiştir. Dursunlar ve ark. [21] 38Si7 kimyasal bileşimli SKL14 gergi kısıkaçına akımsız Nikel-Bor kaplama yapmış ve ısıl işlem uygulamıştır. Sonuç olarak kaplamanın altlık malzemenin homojen kaplama kalınlığı eldesi, sertlik, aşınma ve korozyon direncini artırabileceğini rapor etmiştir. Yirmibeş ve ark. [22] 54SiCr6 ve 38Si7 yay çeliklerinin yorulma davranışına ısıl işlemin etkisini incelemiştir. Sonuç olarak 38Si7 kimyasal bileşimli yay çeliğinin yorulma dayanımının farklı ortam ve koşullar altında 54SiCr6 yay çeliğinden daha yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Liu ve ark. [23] 38Si7 kimyasal bileşimli yay çeliğinde sıcak haddeleme sırasında yüzey dekarbürizasyonunun gelişimi ve termomekanik kontrol süreci ile kontrolünü incelemiştir. Sonuç olarak uygun sıcaklık ve deformasyon parametreleri kullanılarak yüzey dekarbürizasyonunun etkin bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Bu sayede sertlik ve mukavemet kaybının önüne geçilebileceğini rapor etmiştir. Zhang ve ark. [24] yüksek hızlı demiryolu bağlantı

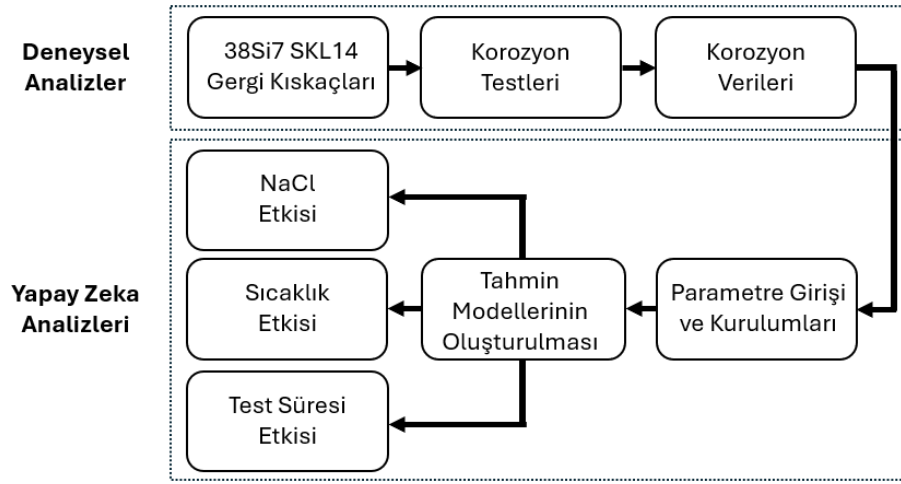
kısaçaları için dinamik titreşim sönümleyici tasarımı ve parametrelerin etkisini analiz etmiştir. Sonuç olarak uygun sönümleyici parametreleri kullanıldığında, bağlantı kısaçalarında oluşan titreşimlerin önemli ölçüde azaltılabileceğini kanıtlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, 38Si7 kimyasal bileşime sahip SKL14 tipi gergi kısıkaçının korozyon performansının deneysel olarak incelenip, yapay zekâ destekli tahmin modellemelerinin oluşturulmasıdır. Bu sayede gergi kısıkaçlarının kaplamasız olarak ağır iklim koşulları altında kullanılıp kullanılmayacağı açıklanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Metot

Bu çalışmadaki metodoloji iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki deneysel korozyon testleridir. İkincisi ise yapay zekâ testlerinden oluşmakta olup, birinci çalışmadan elde edilen verilerle makine öğrenmesi yardımıyla tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmadaki metodolojiyi özetleyen görsel Şekil 2’de sunulmuştur.



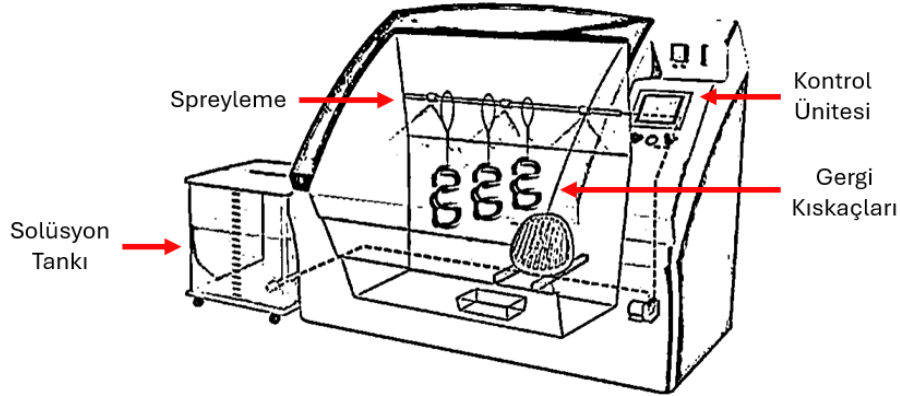
Şekil 2. Bu çalışmadaki metodoloji

2.2. Materyal

Bu çalışmada malzeme olarak Ø13mm çapında, 38Si7 kimyasal bileşime sahip, SKL14 tipi gergi kısıkaçı kullanılmıştır. Gergi kısıkaçları Gürmak Demiryolu’ndan temin edilmiş olup, aynı döküm ve imalat numarasına sahiptir. Korozyon testleri öncesinde gergi kısıkaçları 230µ ile kumlanmıştır. Gergi kısıkaçlarının kimyasal bileşiminde Karbon (C) %0,35-0,42, Silisyum (Si) %1,50-1,80, Mangan (Mn) %0,5-0,8, Fosfor (P) maksimum %0,025, Kükürt (S) maksimum %0,025 ve geri kalan kısmını Demir (Fe) içermektedir.

2.3. Korozyon testi ve karakterizasyon

Korozyon testleri, EN ISO 9227 standardında, %5 NaCl ortamı ve oda sıcaklığında, 720 saat test süresi ve demiryolu standartlarına uygun, yapay atmosferde tuz püskürtme testi olarak Gürmak Demiryolu’nda yapılmıştır. Korozyon test prosesi Şekil 3’te sunulmuştur. Korozyon testinin sonuçları ASTM D610-01 standardına göre yorumlanmıştır.



Şekil 3. Korozyon test prosesi

3. Bulgular

3.1. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı analizi

Tablo 1, numunelerin test süresi, pas durumu ve ağırlık kayıplarını göstermektedir. Korozyon hızı, ağırlık kaybı yöntemiyle literatürde ve endüstride kullanıldığı üzere Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır [25], [26]. Denklem (1) için verilenler, CR: Korozyon hızı (mm/yıl), k: Birim dönüştürme faktörü (sabit değer), W_L : Ağırlık kaybı ($W_L=W_0-W_1$ gram), ρ : Metal yoğunluğu (g/cm^3), A: Metal yüzey alanı (cm^2), t: Korozyon test süresini (saat) ifade etmektedir.

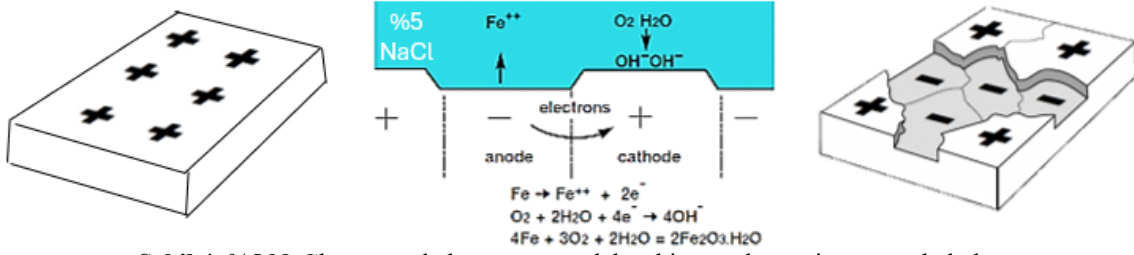
$$CR=(k \times W_L)/(\rho \times A \times t) \quad (1)$$

Tablo 1 incelendiğinde, hassas endüstriyel tartıda kaplamasız numunelerin test başlangıç ağırlığı 495,9 g, test sonrası ağırlığı 495,8813 g ve 1 saatlik testteki ağırlık kaybı ise 0,0137 g olarak ölçülmüştür. Denklem (1)'e göre korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 μm /yıl) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı

Numune	Test süresi (saat)	Pas durumu (%)	Başlangıç ağırlığı (W_0) (g)	Son ağırlık (W_1) (g)	Ağırlık kaybı (W_L) (g)	Korozyon hızı (mm/y), (μm /y)
38Si7 SKL14	1	100	495,9	495,8813	0,0137	0,000749 0,749

Korozyon testi sonucuna göre malzemenin ağırlık kaybı ve korozyon hızı çok fazladır. Literatürde bu durum genel olarak %5 NaCl ortamında korozyon süreci, malzemenin yüzeyinde oluşan oksit tabakaları ve bu tabakaların elektrokimyasal davranışları ile yakından ilişkilidir. Klorür iyonları (Cl^-), demirin pasifleşme tabakasını bozarak korozyonu daha da hızlandırmaktadır. Bu süreç, demirin yüzeyinde önce γ -FeOOH (gamma-demir oksit hidroksit) ve ardından Fe_3O_4 (demir oksit) tabakalarının ortaya çıkarmaktadır. Bu tabakalar, korozyon hücresinde katot olarak davranmaktadır. Katotlar, demirin normalden çok daha fazla ve hızlı bir şekilde çözünmesini artırmasıyla açıklanmaktadır [27], [28]. Korozyonun oldukça hızlı bir şekilde ilerleyip ağırlık kaybının fazla olması Şekil 4'te özetlenmiştir. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı sonuçları, uygun koruma yöntemlerinin seçilmesini gerektiğini ve gergi kısıkaçlarının kaplamasız kullanıma uygun olmadığını açıkça göstermektedir.



Şekil 4. %5 NaCl ortamında korozyonun elektrokimyasal süreci ve pas tabakaları

3.2. Pas yüzeyi analizi

Şekil 5, kaplamasız gergi kışkaçlarının başlangıç, ilk pas oluşumu ve tamamen pas oluşumuna ait 1 saatlik korozyon test sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde, 0 saat için başlangıç pas türünde henüz paslanma yoktur. Dolayısıyla metal yüzeyi parlak ve pasif durumda, tuz püskürtme testine henüz maruz kalmamıştır. 0,5 saat (30 dakika sonrası) için pas türünün homojen korozyon ve pas oranının %33-50 arasında yüzeyin yaklaşık yarısı pasla kaplanmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu aşamada oluşan pasın homojen bir şekilde yayıldığı ve genel korozyon türü gözlemlenmiştir. 1 saat içinde pas türünün ilerlemiş homojen korozyon olduğu ve çukur korozyonun başladığı, pas oranının ise %90'dan fazla olarak yüzeyin büyük kısmının pasla kaplanmış olduğu gözlemlenmiştir. 1 saatlik test sonunda, numunenin neredeyse tamamı yoğun bir pas tabakasıyla kaplanmıştır. Pasın hızlı yayılması, metalin koruyucu bir kaplamaya sahip olmadığı durumlarda çevresel koşullara karşı son derece hassas olduğuna işaret etmektedir. Yüzeydeki pas, agresif tuz püskürtme ortamında hızla oksitlenerek yaygın bir homojen korozyon oluşturmuştur. Ayrıca bu tür hızlı paslanma, metalin yapısal dayanıklılığını ciddi şekilde tehdit etmektedir. Ayrıca bu test sonuçları ve literatür, kaplamasız numunelerin zorlu çevresel koşullarda, özellikle klor iyonları gibi aşındırıcı maddelere maruz kaldığında hızla paslanmaya eğilimli olduğunu ve bu tür malzemelerin mutlaka daha etkin koruyucu bir kaplama ile kullanılmasını gerektiğini göstermektedir [29], [30].



Şekil 5. Gergi kıskacında yüzey korozyonunun saatlik gelişim aşamaları

3.3. Yapay zekâ analizleri

Yapay zekâ analizleri makine öğrenmesi yöntemiyle Python yardımıyla yapılmıştır. Deneysel korozyon verileri işlenerek veri setleri kurulmuş ve tahmin modelleri oluşturulmuştur. Tahmin modellerinde lineer ve polinomsal regresyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu sayede yapay zekâ destekli tahmin modelleriyle olası deney parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir.

Lineer ve polinomsal regresyon tahmin modelleri:

Lineer regresyon, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemeye yönelik bir istatistiksel yöntemdir. Bu model, bir bağımsız değişkendeki değişimin bağımlı değişken üzerindeki etkisini bir doğru ile ifade etmektedir. Yani, iki değişken arasındaki ilişki Denklem (2) formülü ile tanımlanmaktadır. Burada b_0 sabit terim ve b_1 eğim katsayısıdır. Lineer regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiyi öngörme, trend analizleri yapma ve veri setindeki doğrusal eğilimleri inceleme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Modelin varsayımlarına göre bağımsız değişkenlerdeki her bir birimlik artış, bağımlı değişkende sabit bir değişime yol açmaktadır [31], [32], [33].

$$y = b_0 + b_1x \quad (2)$$

Polinomsal regresyon, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılan bir regresyon türüdür. Bu model, veriyi en iyi şekilde açıklayan bir polinom (örneğin ikinci veya üçüncü dereceden) ile ilişkilendirmektedir. Genel formülü Denklem (3) olan polinomsal regresyon, daha karmaşık veri setlerinde doğrusal modelin yetersiz kaldığı durumlarda tercih edilmektedir. Özellikle eğri çizgisel eğilimler gösteren veri setlerinde, bağımlı değişkenin bağımsız değişkene bağlı olarak ivmelenen veya yavaşlayan etkilerini yakalamakta etkilidir. Bu nedenle, çevresel faktörlerin etkisiyle değişim gösteren süreçlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33], [34], [35].

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n \quad (3)$$

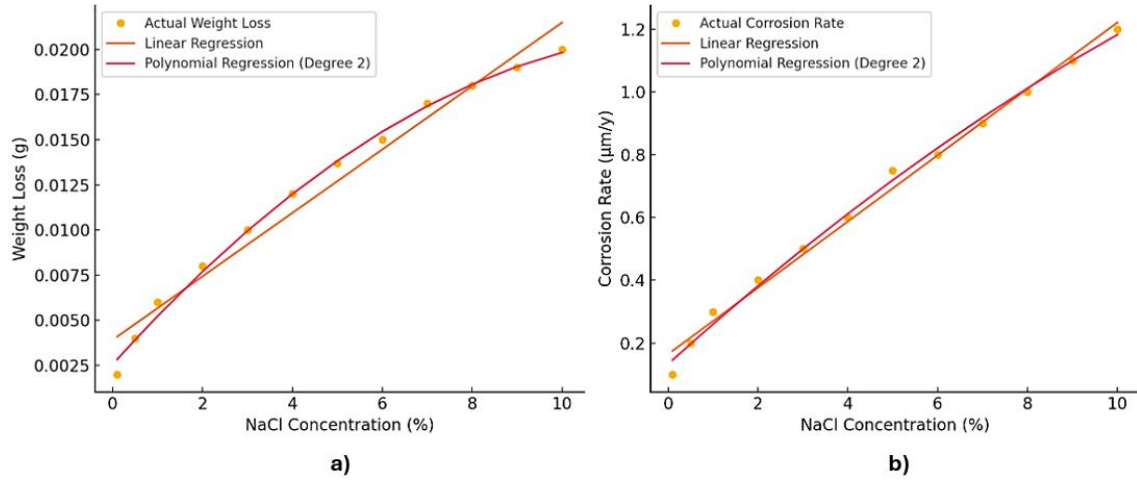
NaCl etkisi:

Şekil 6-a grafiğindeki lineer regresyon modeline göre, ağırlık kaybı ile NaCl konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmıştır. Bu model, NaCl konsantrasyonu arttıkça ağırlık kaybının aynı oranda artacağını öngörmektedir. Lineer model, düşük NaCl konsantrasyonlarında makul bir uyum sağlamaktadır. Bu durum, düşük tuz oranlarında korozyon sürecinin daha sabit bir hızda gerçekleşebileceğine işaret edebilir. Polinomsal regresyon modeli, NaCl konsantrasyonu ile ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi doğrusal olmayan bir çerçevede inceleyerek daha karmaşık bir ilişki önermektedir. Polinomsal model, yüksek NaCl oranlarında ağırlık kaybının ivmeli bir şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca NaCl konsantrasyonu arttıkça yüzey reaksiyonlarının hızlandığını ve dolayısıyla korozyon ürünlerinin oluşum hızında artış yaşandığını göstermektedir. Bu durum, NaCl'nin oksitlenme reaksiyonları üzerinde katalitik bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 6-b grafiğindeki lineer model, NaCl konsantrasyonunun korozyon hızı üzerindeki etkisini doğrusal bir ilişki olarak öngörmektedir. Bu model, korozyon hızının NaCl oranına bağlı olarak düzenli bir şekilde artacağını varsaymaktadır. Ancak bu basit ilişki, yüksek NaCl konsantrasyonlarında korozyon hızının tahmin edilmesi açısından sınırlı kalabilmektedir. Doğrusal modelin varsayımlarına göre, korozyon hızındaki artışın sabit bir oranda olacağı düşünülmektedir. Polinomsal regresyon modeli, NaCl konsantrasyonunun artmasıyla korozyon hızında ivmeli bir artış olduğunu öne sürmektedir. Bu eğilim, yüksek tuz konsantrasyonlarında daha yoğun bir korozyon sürecinin gerçekleşebileceğini düşündürmektedir. NaCl, elektrolitik

çözeltilerde iyonik iletkenliği artırarak korozyon hızını arttırabilir. Bu nedenle, polinomsal modelin sağladığı doğrusal olmayan yaklaşım, tuz konsantrasyonunun artışıyla korozyon hızındaki hızlanmayı daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır.

Sonuç olarak, NaCl konsantrasyonu arttıkça ağırlık kaybı ve korozyon hızında artış gözlemlenmektedir. Korozyon hızının artması, iyonik aktivitenin artışı ile ilişkilendirilmektedir. Bu gözlem, literatürdeki NaCl çözeltilerinin korozyon üzerindeki etkileri ile uyumludur. Abdul-Hamied ve ark. [36] tarafından yapılan çalışmada benzer şekilde NaCl konsantrasyonunun korozyon oranını arttırdığı belirtilmiştir. Ağırlık kaybı ile NaCl konsantrasyonu ilişkisinde, Polinomsal regresyon yüksek NaCl oranlarında eğrinin ivmelendiğini daha iyi yakalamakta ve doğrulamaktadır. Korozyon hızı ile NaCl konsantrasyonu ilişkisinde, NaCl konsantrasyonu arttıkça korozyon hızında da artış görülmektedir. Polinomsal model, özellikle yüksek konsantrasyonlarda korozyon hızının artışını daha iyi ifade etmektedir. Model tahminlerindeki NaCl konsantrasyonu artışıyla ağırlık kaybı ve korozyon hızındaki artış hem yapay zekâ hem de literatür açısından desteklenmektedir [37].



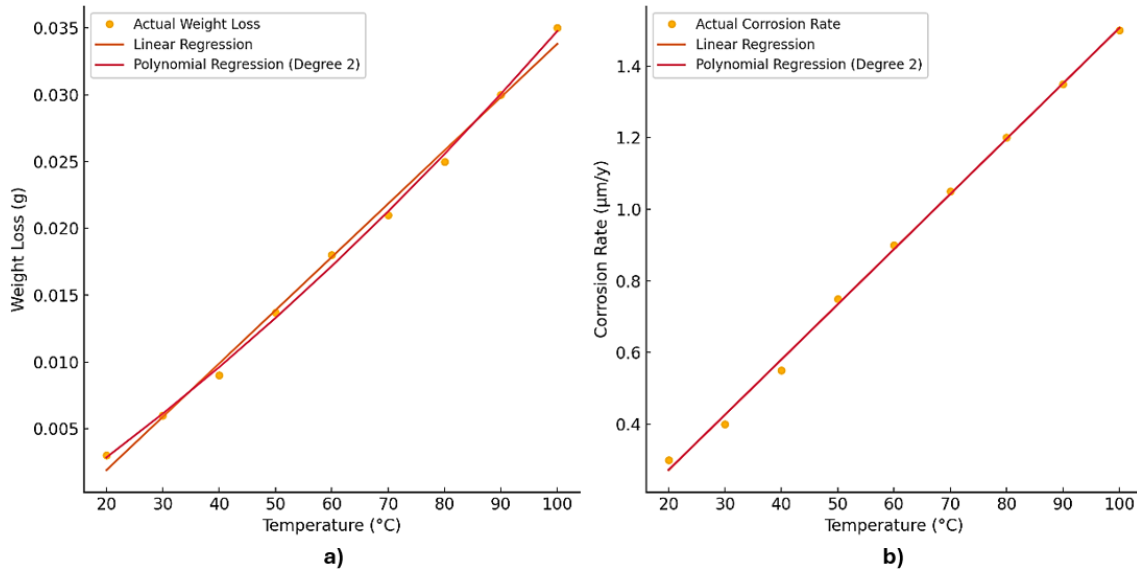
Şekil 6. NaCl etkisi a) ağırlık kaybına b) korozyon hızına

Şekil 6 grafiğindeki modeller karşılaştırıldığında, her iki modelin de birbirine karşı farklı avantajları vardır. Lineer model, basit ve anlaşılır bir ilişki öngörürken, yüksek tuz konsantrasyonlarındaki sapmaları göz ardı etmektedir. Polinomsal model, yüksek NaCl konsantrasyonlarındaki ağırlık kaybı ve korozyon hızındaki ivmeli artışı daha iyi yansıtarak, bu sürecin doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır. Model seçimi analizinde, veriler polinomsal modele daha iyi uyum sağlamaktadır. Bu durum korozyon sürecinin karmaşık bir kinetik yapıya sahip olduğunu ve yüksek NaCl oranlarında doğrusal olmayan bir hızlanma gösterdiğini işaret etmektedir. Polinomsal regresyonun daha iyi uyum sağlaması, korozyon sürecinin başlangıçta daha yavaş bir hızda başlayıp, NaCl konsantrasyonu arttıkça hızlandığını ve bu hızın sabit olmadığını göstermektedir. Bu analizler, NaCl'nin pasif tabakaların çözünmesine ve elektrokimyasal reaksiyon hızlarının artmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu durum, NaCl'nin malzeme yüzeyindeki korozyon hızını nasıl etkilediğini ve tuz konsantrasyonlarının malzeme ömrü üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak açısından oldukça önemlidir.

Sıcaklığın etkisi:

Şekil 7-a grafiği sıcaklığın ağırlık kaybındaki ve Şekil 7-b grafiği sıcaklığın korozyon hızındaki etkisini göstermektedir. Lineer regresyon, sıcaklık ile korozyon hızı ve ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi doğrusal bir model ile incelemekte ve sıcaklığın etkisini basitçe yansıtmaktadır. Model, sıcaklık arttıkça korozyon hızının ve ağırlık kaybının düzenli bir artış gösterdiğini öngörmektedir.

Ancak, korozyon gibi kimyasal süreçlerde sıcaklık artışının genellikle doğrusal olmayan bir ivmeyle hızlanması beklenmektedir. Polinomsal model, sıcaklık arttıkça korozyon hızında ve ağırlık kaybında hızlanan bir artış olduğunu öne sürmektedir. Bu model, kimyasal reaksiyonların hızının Arrhenius yasasına uygun olarak sıcaklıkla hızlandığını yansıtmaktadır. Sıcaklık arttıkça malzeme yüzeyindeki koruyucu pasif tabakaların çözünmesi ve korozyon reaksiyonlarının hızlanması beklenmektedir. Sonuç olarak bu çalışmadaki model tahminleri ve literatürdeki çalışmalar, sıcaklık artışıyla beraber hem ağırlık kaybı hem de korozyon hızında artış gözlemlendiğini desteklemektedir [38], [39]. Bu durum, Arrhenius yasasında kimyasal reaksiyonların sıcaklıkların hızlanmasıyla açıklanmaktadır [40]. Polinomsal model, sıcaklık yükseldikçe korozyon hızının ivmelendiğini yansıtırken, lineer model basit bir artış öngörmektedir. Sıcaklık artışının ağırlık kaybı ve korozyon hızını doğrusal olarak artırdığı bu çalışmada gözlenmiştir. Literatürde sıcaklık artışı ile korozyon arasındaki bu ilişki, termal aktivasyon enerjisinin azalması ile açıklanmıştır. Omomeji ve ark. [41] çalışmasında sıcaklık ile korozyon oranındaki bu artış açıkça rapor edilmiştir.



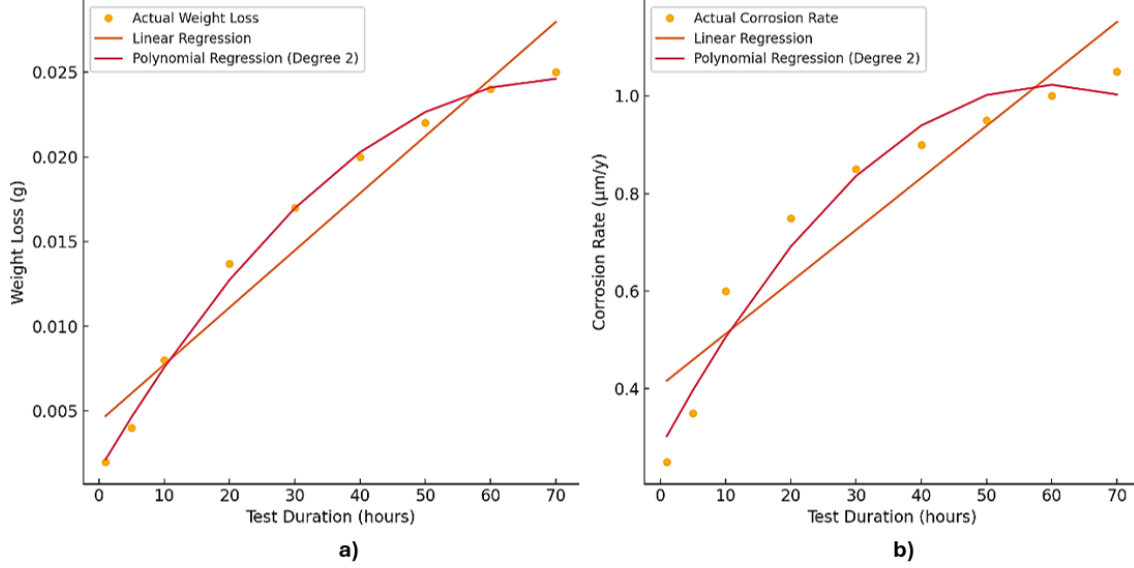
Şekil 7. Sıcaklığın etkisi a) ağırlık kaybına b) korozyon hızına

Şekil 7 grafiklerindeki modeller karşılaştırıldığında, sıcaklık ve süre değişimlerine verilen tepkinin doğrusal olmayan bir şekilde arttığını göz önünde bulunduran polinomsal model, korozyon sürecinin daha gerçekçi bir yansımısını sunmaktadır. Polinomsal model, sıcaklık ve süre arttıkça korozyonun hızlanacağını ancak belli bir süre sonra hızının azalabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, Polinomsal model sıcaklık yükseldikçe korozyon hızının ivmelendiğini yansıtırken, lineer model basit bir artış öngörmektedir.

Test süresinin etkisi:

Şekil 8-a grafiği test süresinin ağırlık kaybına ve Şekil 8-b grafiği test süresinin korozyon hızına etkisini göstermektedir. Lineer regresyon, test süresi ile ağırlık kaybı ve korozyon hızı arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak modellemek, her saat için eşit oranda korozyon ve ağırlık kaybı tahmininde bulunmaktadır. Ancak korozyonun başlangıçta hızlı olduğu, zamanla malzeme yüzeyinde oluşan koruyucu tabakalar nedeniyle hızının yavaşlayabileceği göz önüne alındığında, doğrusal model bu durumu yeterince yansıtmamaktadır. Polinomsal model, test süresine göre korozyon hızının ve ağırlık kaybının başlangıçta hızlı artarken, zamanla yavaşlayan bir eğilimde olduğunu göstermektedir. Bu model, korozyon sürecinde oluşan pasif tabakaların korozyon hızını yavaşlatabileceğini ve korozyonun zamanla stabil hale gelebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak tahmin modelleri ve literatürdeki çalışmalar, genel olarak test süresinin artmasıyla ağırlık

kaybının ve korozyon hızının artmasını beklemektedir [42], [43]. Ancak korozyon hızı belli bir süre sonunda sabitlenebilir veya yavaşlayabilmektedir. Test süresi uzadıkça korozyon hızının azalma eğilimi, korozyon ürünlerinin yüzeyde birikmesiyle açıklanmaktadır. Literatürde bu durum, Danyliak ve ark. [44] düşük karbonlu çeliklerde benzer davranışlar gözlediği çalışmasında desteklenmektedir.



Şekil 8. Test süresinin etkisi a) ağırlık kaybına b) korozyon hızına

Şekil 8 grafiklerindeki modeller karşılaştırıldığında, test süresi arttıkça korozyon hızı ve ağırlık kaybı başlangıçta hızlı bir artış gösterip, sonra yavaşlamaktadır. Polinomsal model bu değişimi daha iyi yakalayarak zamanla korozyon hızındaki yavaşlamayı gösterirken, lineer model süre boyunca sabit bir hız artışı varsaymaktadır. Polinomsal regresyon modelinin üstünlüğü ve yüksek doğruluğu, özellikle yüksek NaCl konsantrasyonlarında ve uzun test sürelerinde literatürdeki Pai ve ark. [45] deneysel çalışması tarafından desteklenmektedir. Sonuç olarak NaCl konsantrasyonu, sıcaklık ve test süresi gibi parametrelerin etkisi farklı modellerle analiz edilmiş, polinomsal regresyonun bu süreçleri daha doğru modelleyebildiği ortaya konulmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada HM tipi bağlantıdaki 38Si7 kimyasal bileşimine sahip SKL14 gergi kısılcasına EN ISO 9227 standardında korozyon testleri yapılmış ve sonrasında makine öğrenmesi yardımıyla yapay zekâ destekli tahmin modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak:

- Korozyon testlerindeki ilk pas 0,5 saatte ve tamamen pas ise 1 saat sonunda gözlemlenmiştir.
- Korozyon testi sonundaki ağırlık kaybı 0,0137 g olarak ölçülmüştür.
- Korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 µm/yıl) olarak hesaplanmıştır.
- Yapay zekâ destekli makine öğrenmesiyle tahmin modelleri başarıyla oluşturulmuş ve deneysel korozyon verileri desteklenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, kaplamasız gergi kısıkaçlarının korozyon direncinin oldukça düşük olduğu hem deneysel korozyon testleri hem de yapay zekâ destekli tahmin modellerindeki analiz sonuçlarında demiryolu standartları için kabul edilemez ve kullanılmaya elverişli olmadığı kanıtlanmıştır. Dolayısıyla kaplamasız gergi kısıkaçlarının mutlaka etkin kaplama yöntemleriyle kaplanarak ve korozyon direncinin artırılarak kullanılması gerektiği önerilmektedir. Gelecekteki

çalışmalar için farklı kaplamaların kapsamlı test parametreleriyle değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Mustafa DURSUNLAR'ın doktora tez çalışmalarından türetilmiş olup, malzeme temini ve testler için Gürmak Demiryolu'na teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] K. Ecer and O. Güner, "The European Union's Policies and Role in Tackling Climate Change in the Context of the European Green Deal," *The Social Consequences of Climate Change*, pp. 163–185, Nov. 2024, doi: 10.1108/978-1-83797-677-520241013
- [2] H. H. Sharaf-Addin, "Towards net-zero carbon emissions: A systematic review of carbon sustainability reporting based on GHG protocol framework," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 24, p. 100516, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.INDIC.2024.100516
- [3] K. Feng, Z. Yang, Y. Zhuo, L. Jiao, B. Wang, and Z. Liu, "Impact of Carbon Tax on Renewable Energy Development and Environmental–Economic Synergies," *Energies 2024, Vol. 17, Page 5347*, vol. 17, no. 21, p. 5347, Oct. 2024, doi: 10.3390/EN17215347
- [4] R. D. Piacentini and S. Garro, "Carbon neutral industries and compensation for greenhouse gas emissions," *Drying Technology*, vol. 40, no. 16, pp. 3371–3372, Dec. 2022, doi: 10.1080/07373937.2022.2149181
- [5] M. Hakovirta, "Impetus for Carbon Neutrality–Frames of Reference," *Springer Climate*, vol. Part F1826, pp. 11–29, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-45202-4_2
- [6] Q. Zhang, C. W. Y. Wong, and R. Klassen, "Carbon neutrality: Operations management research opportunities," *Journal of Operations Management*, vol. 70, no. 3, pp. 344–354, Apr. 2024, doi: 10.1002/JOOM.1303
- [7] Q. G. Rayer, "Ethical and Sustainable Investing and the Need for Carbon Neutrality," *Environmental Policy: An Economic Perspective*, pp. 213–232, Sep. 2020, doi: 10.1002/9781119402619.CH13
- [8] B. Indraratna, R. S. Malisetty, C. Arachchige, Y. Qi, and C. Rujikiatkamjorn, "Sustainable Performance of Recycled Rubber and Mining Waste Utilized for Efficient Rail Infrastructure," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 54, no. 5, pp. 1738–1750, Oct. 2024, doi: 10.1007/S40098-024-00941-6/FIGURES/15
- [9] R. Damián Oostrom and C. Zamorano Martín, "Greenhouse Gas Emissions from High-Speed Rail Maintenance: A Comparative Case Study for Five Major High-Speed Lines," 2024, doi: 10.2139/SSRN.4985657
- [10] Y. Wang, Y. Wang, and M. Xie, "Accelerating the penetration of clean electricity to promote the low carbonization of high-speed railways: A probabilistic framework," *Energy for Sustainable Development*, vol. 83, p. 101582, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.ESD.2024.101582
- [11] M. Braima, T. E. Butt, M. A. Maraqa, S. Goodhew, S. Sundaram, and M. M. A. Mohamed, "A perspective on solar railway potential for the UK," *Environ Prog Sustain Energy*, 2024, doi: 10.1002/EP.14488
- [12] W. Peng, J. Zhang, X. Yang, Z. Zhu, and S. Liu, "Failure analysis on the collapse of leaf spring steels during cold-punching," *Eng Fail Anal*, vol. 17, no. 4, pp. 971–978, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2009.11.008
- [13] C. Xu, Y. Liang, M. Yang, J. Yu, and X. Peng, "Effects of the Ultrasonic Assisted Surface Rolling Process on the Fatigue Crack Initiation Position Distribution and Fatigue Life of 51CrV4 Spring Steel," *Materials 2021, Vol. 14, Page 2565*, vol. 14, no. 10, p. 2565, May 2021, doi: 10.3390/MA14102565
- [14] C. L. Zhang, L. Y. Zhou, and Y. Z. Liu, "Surface decarburization characteristics and relation between decarburized types and heating temperature of spring steel 60Si2MnA," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 8, pp. 720–724, Aug. 2013, doi: 10.1007/S12613-013-0789-1/METRICS
- [15] Z. Li, H. Liu, W. Wang, and L. Xu, "The effect of fastener clip fatigue for high-speed railway on vehicle-track dynamic interaction: Numerical analysis and probabilistic evaluation," *Appl Math Model*, vol. 135, pp. 269–305, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.APM.2024.06.044

- [16] Y. Yuan *et al.*, “Status, challenges, and prospects of energy efficiency improvement methods in steel production: A multi-perspective review,” *Energy*, vol. 304, p. 132047, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.132047
- [17] M. Dursunlar, Z. Taş, B. Akgül, O. Güler, and M. Çelebi, “Comparative analysis of wear properties between electroless Ni-B coating and commercial ZnAl coating on 38Si7 steel used in railway system,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 58, p. 101843, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.JESTCH.2024.101843
- [18] S. Mohammadzadeh, S. Ahadi, and H. Keshavarzian, “Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type Vossloh SKL14,” <http://dx.doi.org/10.1177/1748006X14527926>, vol. 228, no. 5, pp. 460–468, Mar. 2014, doi: 10.1177/1748006X14527926
- [19] X. W. Wang *et al.*, “Optimization of Heat Treatment for 38Si7 Spring Steel with Excellent Mechanical Properties and Controlled Decarburization,” *Materials*, vol. 15, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15113763
- [20] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, “Evolution during Hot Rolling and Control by Thermomechanical Control Process of Surface Decarburization on 38Si7 Spring Steel,” *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, Nov. 2022, doi: 10.1007/S11665-022-06956-5/FIGURES/12
- [21] M. Dursunlar and Z. Taş, “Ray Bağlantı Elemanlarına Akımsız Ni-B Kaplama ve Isıl İşlem Uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 20, pp. 67–78, Jul. 2024, doi: 10.47072/demiryolu.1471045
- [22] N. Yirmibeş “54SiCr6-38Si7 Yay Çeliklerinin Yorulma Davranışına Uygulanan Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 2024.
- [23] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, “Evolution during Hot Rolling and Control by Thermomechanical Control Process of Surface Decarburization on 38Si7 Spring Steel,” *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11665-022-06956-5
- [24] Y. Zhang, X. Yang, and S. Liu, “Design and parameters influence analysis of dynamic vibration absorber for fastener clips in high-speed railway,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 30, no. 3–4, pp. 472–486, Feb. 2023, doi: 10.1177/10775463231154144
- [25] N. Ali and M. A. Fulazzaky, “The empirical prediction of weight change and corrosion rate of low-carbon steel,” *Heliyon*, vol. 6, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05050
- [26] F. Malaret and X.-S. Yang, “Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method,” *Exp Results*, vol. 3, p. e13, May 2022, doi: 10.1017/EXP.2022.5
- [27] L. Du, J. Chen, E. Hu, and F. Zeng, “A reactive molecular dynamics simulation study on corrosion behaviors of carbon steel in salt spray,” *Comput Mater Sci*, vol. 203, p. 111142, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2021.111142
- [28] J. Hu, S. A. Cao, and J. Xie, “EIS study on the corrosion behavior of rusted carbon steel in 3% NaCl solution,” *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 60, no. 2, pp. 100–105, Mar. 2013, doi: 10.1108/00035591311308074/FULL/PDF
- [29] F. Jiang and M. Hirohata, “A GAN-Augmented Corrosion Prediction Model for Uncoated Steel Plates,” *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 4706*, vol. 12, no. 9, p. 4706, May 2022, doi: 10.3390/APP12094706
- [30] D. J. McAdam, “Fatigue and Corrosion-Fatigue of Spring Material,” *J Fluids Eng*, vol. 51, no. 2, pp. 45–56, Jan. 1929, doi: 10.1115/1.4059013
- [31] M. Korkmaz, “A study over the general formula of regression sum of squares in multiple linear regression,” *Numer Methods Partial Differ Equ*, vol. 37, no. 1, pp. 406–421, Jan. 2021, doi: 10.1002/NUM.22533
- [32] G. Shen and Q. Liu, “Performance Analysis of Linear Regression Based on Python,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1227 CCIS, pp. 695–702, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-6113-9_80
- [33] “Regression Analysis with Python- Luca Massaron, Alberto Boschetti, 2016 - Google Books.” Accessed: Online, Nov. 03, 2024.
- [34] E. Ostertagová, “Modelling using Polynomial Regression,” *Procedia Eng*, vol. 48, pp. 500–506, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENG.2012.09.545
- [35] Y. Gong and P. Zhang, “Predictive Analysis and Research of Python Usage Rate Based on Polynomial Regression Model,” *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture, AIAM 2021*, pp. 266–270, 2021, doi: 10.1109/AIAM54119.2021.00061
- [36] A.-H. A. Abdul-Hamied and A. D. Assi, “Evaluation of the Effect of Static and Flowing Conditions on the Corrosion Behavior of the Hull of Marine Ships,” *Journal of Engineering*, vol. 30, no. 11, pp. 90–107, Nov. 2024, doi: 10.31026/j.eng.2024.11.06

- [37] A. Nurdin, S. M. Muhammad, Z. I. Vega, T. Sulaiman, and H. Iskandar, “A Comparative Study on Corrosion Rate of Carbon Steel in NaCl Solution with Continuous and Discontinuous Weight Loss Methods,” *Key Eng Mater*, vol. 930, pp. 35–41, 2022, doi: 10.4028/P-DQ46YD
- [38] M. Karthikraja, K. Ramanathan, K. T. Loganathan, and S. Selvaraj, “Corrosion behaviour of SiC and Al₂O₃ reinforced Al 7075 hybrid aluminium matrix composites by weight loss and electrochemical methods,” *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 100, no. 5, p. 101002, May 2023, doi: 10.1016/J.JICS.2023.101002
- [39] Y. Liu, M. Liu, X. Lu, and Z. Wang, “Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere,” *Mater Chem Phys*, vol. 277, p. 124962, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124962
- [40] V. Kumar, A. Pal, and O. Shpielberg, “Arrhenius law for interacting diffusive systems,” *Phys Rev E*, vol. 109, no. 3, p. L032101, Mar. 2024, doi: 10.1103/PHYSREVE.109.L032101/FIGURES/1/MEDIUM
- [41] L. Omomeji, M. K. Onifade, A. O. Onokwai, J. Atiba, E. Y. Salawu, and O. O. Joseph, “Inhibitory effect of expired glavox tablets on A36 carbon steel for optimized service life,” *Mater Res Express*, vol. 11, no. 11, p. 115507, Nov. 2024, doi: 10.1088/2053-1591/AD94D4
- [42] Y. Yue, N. Li, S. Gao, A. Li, and J. Sun, “Estimating corrosion induced thickness loss in Q690E high-strength steel using multimodal ultrasonic guided waves,” *Ultrasonics*, vol. 143, p. 107404, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ULTRAS.2024.107404
- [43] K. Asghar, S. Kim, M. Shabpiray, M. Faustine Ngulimi, B. Kyung Seo, and C. Roh, “Corrosion effect of Carbon steel SA106 Gr. B in oxalic acid,” *Mater Lett*, vol. 370, p. 136842, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.MATLET.2024.136842
- [44] M.-O. Danyliak, S. Lavrys, Y. Rizun, and S. Korniy, “Anticorrosion Protection of Low-Carbon Steel by the Eco-Friendly Composition Based on Gum Arabic,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2024, no. 1, p. 5528033, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/5528033
- [45] P. S. Pai et al., “Microstructural, electrochemical and immersion based corrosion analysis in milling induced magnesium alloy AZ91,” *Int. J. Corros. Scale Inhib*, vol. 13, no. 4, pp. 2388–2399, 2024, doi: 10.17675/2305-6894-2024-13-4-27

Özgeçmiş



Mustafa DURSUNLAR

Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini tamamlamış olup, aynı alanda doktora eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesinde devam etmektedir. Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun Meslek Yüksekokulu Ulaştırma Hizmetleri Bölümü Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr



Zakir TAŞ

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Almanya’da, doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Prof. Dr. olarak çalışmaktadır.

E-Posta: zakir.tas@bozok.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DURSUNLAR: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Zakir TAŞ: Kontrol, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Demiryollarında Gerilimsiz Ray Sıcaklığı Belirleme: Makine Öğrenmesi ve Güncel Meteorolojik Verilerle Türkiye İçin Geliştirilen Yeni Bir Yöntem

Ferhat ÇEÇEN^{ORCID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 26.11.2024, Kabul/Accepted: 24.12.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Çağımızda, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin artan etkileri, konvansiyonel Gerilimsiz Ray Sıcaklığı (SFT) belirleme yöntemlerinin revize edilmesini gündeme getirmiştir. Bu çalışma, Türkiye'nin iklim koşullarına uygun, yeni bir SFT belirleme metodu sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında, Türkiye'nin 81 iline ait güncel meteorolojik veriler, Scipy.optimize modülünde yer alan SLSQP (Sequential Least Squares Programming, Ardışık En Küçük Kareler Programlaması) algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Her il için optimum SFT değerleri hesaplanmış ve bu değerlerin olası en yüksek ray sıcaklıklarıyla ilişkisi, Sklearn kütüphanesinin LinearRegression sınıfı kullanılarak oluşturulan bir makine öğrenmesi modeliyle incelenmiştir. Bu şekilde, ülke genelinde uygulanabilecek yeni bir SFT bağıntısı geliştirilmiştir. Sonuçlar, mevcut (konvansiyonel) yöntemle SFT belirlenmesi yapıldığı takdirde, 81 ilin 43'ünde kritik ray sıcaklıklarının aşıldığını ve bu aşım miktarının (ΔT) 48 °C'ye kadar ulaştığını göstermektedir. Bu durum, işlem kapasitesinde düşümlere ve mali kayıplara yol açabilecektir. Önerilen yöntemle hesaplanan SFT değerleri ise yalnızca bir ilde hız kısıtlaması gerektirmekte ve diğer 80 ilde ΔT değerlerini 36 °C'nin altında tutmaktadır. Sonuç olarak, bu yeni SFT bağıntısının, rayların termal burkulması (flambaj) riskini daha verimli yönetmek adına sektöre katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Gerilimsiz Ray Sıcaklığı, Demiryolu Ray Termal Burkulması, Flambaj, İklim Değişikliği

Determining Stress-Free Temperature in Railways: A New Method Developed for Türkiye Using Machine Learning and Current Meteorological Data

Abstract: In our era, the increasing effects of global warming and climate change have highlighted the need to revise the conventional Stress-Free Temperature (SFT) determination methods. This study proposes a novel SFT determination method tailored to the climatic conditions of Türkiye. In this context, current meteorological data from the Türkiye's 81 provinces were analyzed using the Sequential Least Squares Programming (SLSQP) algorithm available in Python's Scipy.optimize module. Optimal SFT values were calculated for each province and the relationship between these values and potential maximum rail temperatures was investigated using linear regression and machine learning based models. As a result, a new nationally applicable SFT correlation was developed. The results indicate that when using the existing (conventional) method for SFT determination, critical rail temperatures are exceeded in 43 out of 81 provinces, with the magnitude of this exceedance (ΔT) reaching up to 48°C. Such conditions can lead to reduced operational capacity and financial losses. In contrast, the SFT values calculated using the proposed method require speed restrictions in only one province and maintain ΔT values below 36 °C in the remaining 80 provinces. In conclusion, this new SFT correlation is expected to contribute to the sector by enabling more efficient management of the risk of thermal buckling in rails.

Keywords: Stress-Free Temperature, Railway Rail Thermal Buckling, Sun Kink, Climate Change

1. Giriş

İklim değişikliğinin etkisini giderek artırdığı çağımızda, raylı ulaşım sistemleri, birçok ulusal ve uluslararası birlik ve kuruluşça desteklenen ve dünya genelinde yaygınlaşan çevreci bir ulaşım modu halindedir. Ancak raylı ulaşım sistemlerinin küresel ısınma ve iklim değişikliğine karşı bazı

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, "Demiryollarında gerilimsiz ray sıcaklığı belirleme: makine öğrenmesi ve güncel meteorolojik verilerle türkiye için geliştirilen yeni bir yöntem," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 96-110, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1591710

zayıf yönleri de bulunmaktadır. Son yıllarda küresel anlamda daha sık görülmeye başlayan Rayların Termal Burkulması (RTB) (İngilizce: Rail Thermal Buckling) veya diğer bir tabirle flambaj (Fransızca: Flambage des Rails) hadiseleri bu zayıflıkla ilgilidir. Bu çalışmada söz konusu geometrik bozulmaların kısaca RTB olarak tabir edilmesi tercih edilmiştir.

Demiryollarında meydana gelen RTB hadiselerinin teknik arka planı kısaca incelenecek olursa; konvansiyonel balastlı demiryolu hatlarında kullanılan en önemli üstyapı elemanlarından biri raylardır. Çeşitli kimyasal içeriklere sahip çelik hammaddelerden imal edilen bu rayların termal genleşme katsayıları (α) oldukça yüksektir (yaklaşık $11,5 \times 10^{-6} \text{ mm} / (\text{mm } ^\circ\text{C})$) [1]. Buna göre, örnek bir hesaplama yürütülecek olursa; Denklem 1'deki termal boyut değişim eşitliği [2] kullanılarak, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 12 metre uzunluğundaki bir rayın sıcaklığı, kış aylarında $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünde ($\Delta T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$) veya bunun tam tersi olarak yaz aylarında $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde ($\Delta T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$), $\pm 5,52 \text{ mm}$ 'lik bir termal boy değişimi oluşacağı hesaplanabilir. Yani yaz aylarında bu düzeyde genleşme ($+5,52 \text{ mm}$), kış aylarında bu miktarda kısılma ($-5,52 \text{ mm}$) isteği ortaya çıkacaktır.

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

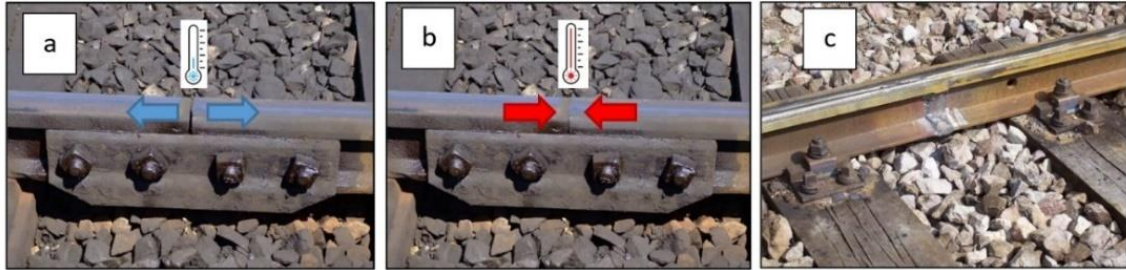
ΔL : Termal uzama/kısılma

L_0 : Referans sıcaklıktaki boy (mm)

α : Termal genleşme katsayısı ($\text{mm} / (\text{mm } ^\circ\text{C})$)

ΔT : Referans sıcaklık ile hesaplama yapılacak sıcaklık arasındaki fark ($^\circ\text{C}$)

Geçmişte, konvansiyonel cebire ve bulonlardan müteşekkil ray bağlantı sistemleri (Şekil 1.a-b) [3] yaygın iken, cebire delikleri bulon çaplarından bir miktar geniş tutularak bu termal boy değişimlerine kısmen veya tamamen müsaade edilmiş oluyordu. Ancak çağımızda bu bağlantı biçimi, birçok dezavantajı nedeniyle terk edilmektedir [4]. Günümüzde modern demiryollarında kullanılan en yaygın ray birleşim metodu, Şekil 1.c'de görülen kaynaklı ray birleşim metodudur. Ancak bu metod, termal uzama ve kısılma açısından herhangi bir esneklik sağlamamaktadır. Bu durum nedeniyle demiryolundaki o anki ray sıcaklığı, gerilimsiz ray sıcaklığı (Stress-Free Temperature, SFT) veya Nötr Ray Sıcaklığı (Rail Neutral Temperature, RNT) olarak tabir edilen spesifik bir ray sıcaklığı değerinin (örneğin geçmişte kaynak işlemi yapıldığı zamanda rayların sahip olduğu sıcaklığın) üzerine çıktığında, raylar genleşmek istemekte, ama uzayacağı bir alan bulunmadığından, basınç kuvvetleri meydana gelmektedir. Öte taraftan, SFT değerinin altına düştüğünde, raylar büzülme istemekte, ancak kaynaklı birleşimde böyle bir hareket kabiliyeti bulunmadığından, çekme kuvvetleri meydana gelmektedir [3].



Şekil 1. Ray bağlantı örnekleri: a) Termal büzülme için izin veren konvansiyonel cebireli ray bağlantı örneği, b) Termal genleşmeye izin veren aynı cebireli ray bağlantı örneği, c) Termal büzülme veya genleşmeye izin vermeyen kaynaklı ray bağlantı örneği [3]

Bu ön bilgiler akabinde, önceki hesaplamalar devam ettirilirse; Denklem 2 [5] kullanılarak, ilk durumda (SFT değerinde) örneğin $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve 12 metre uzunluğundaki bir rayın sıcaklığı $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünde ($\Delta T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$) veya bunun tam tersi olarak $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde ($\Delta T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$), raylarda yaklaşık $\pm 96,6 \text{ MPa}$ gerilme meydana geleceği hesaplanabilir.

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta T \quad (2)$$

- σ : Gerilme (MPa)
 E : Elastisite modülü (ray çeliği için yaklaşık 210 GPa)
 α : Termal genişleme katsayısı (mm / (mm °C))
 ΔT : Referans sıcaklık ile hesaplama yapılacak sıcaklık arasındaki fark (°C)

Söz konusu $\pm 96,6$ MPa gerilme, ülkemizde en yaygın kullanılan ray tipi olan UIC 60 E1/2 sınıfı rayların enkesit alanı olan 7670 mm^2 alan [6] ile çarpıldığında, yani Denklem 3'e [5] göre; $740,9 \text{ kN}$ 'luk (yaklaşık $75,5$ ton) bir kuvvete (basınç/çekme) denk gelmektedir.

$$F = \sigma \times A \quad (3)$$

- F : Kuvvet (kN)
 σ : Gerilme (MPa)
 A : Alan (mm^2)

Görüldüğü üzere demiryolu raylarında termal değişimler altında oldukça yüksek çekme/basınç kuvvetleri meydana gelebilmektedir. Hesaplanan gerilme, üretim kaynaklı artık gerilmeler (residual stresses) ve servis yükleriyle birleşip milyonlarca kez tekrar edince, rayların ve özellikle kaynak birleşim noktalarının yorulma limitlerini aşabilmektedir. Demiryolu kuruluşları, özellikle çekme gerilmelerinin arttığı kış aylarında, ray/kaynak kırılmaları ile karşı karşıya kalabilmektedir. Şekil 2.a'da, ülkemizde 27 Ocak 2008'de, Kütahya il sınırı içerisinde meydana gelen ve "ray birleşim bölgesinde kırılmayla" ilişkilendirilen bir kazaya ait fotoğraf sunulmaktadır [7]. Kış aylarında meydana gelen çekme gerilmeleri, yaz aylarında bu kez basınç gerilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Raylar enkesit alanlarına nispeten çok daha uzun bir boya sahip olduğundan, inşaat mühendisliğinde "narin" olarak nitelendirilen, yani boyuna istikamette kolayca "burkulabilecek" yapı elemanlarıdır. Özellikle bazı hat kesimlerinde, örneğin balast omuz desteğinin zayıfladığı bölgelerde ve/veya ahşap travers kullanılan kesimlerde ve/veya zayıf kaynak birleşimlerinde, bu narin raylar kolayca burkulabilmektedir. Bu bozulmalar, günümüzde, uzun/sonsuz kaynaklı ray birleşimleri ve iklim değişikliği nedeniyle geçmişe nazaran daha sık karşılaşılan bir sorun haline gelmiştir [4]. Bu risk nedeniyle özellikle sıcak yaz aylarında sıklıkla hız kısıtlamalarına (tekayyüdat) başvurulmaktadır. Şekil 2.b'de Kahramanmaraş'ta Ağustos 2018'de meydana gelen termal burkulma hadiselerine dair örnek bir görsel sunulmaktadır [8].



Şekil 2. a) Ray birleşim bölgesindeki kırılmayla ilişkilendirilen tren kazalarına dair örnek bir görsel [7]
b) Termal burkulma hadiselerine dair örnek bir görsel [8]

Sonuç olarak, kaynaklı raylı ulaşım sistemleri termal etkilere karşı hassastır ve SFT değerleri, hattın servis ömrü boyunca sergileyeceği davranış açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu kritik değer gerekenden düşük olursa, RTB riski, aksi durumda ise ray/kaynak kırılmaları artmaktadır. Bu yüzden demiryolu mühendisleri, değişen iklim koşullarına karşı daha iyi mücadele edebilmek için SFT değerini, optimum bir düzeyde belirlemeye çalışmaktadır. Yani raylar birbirine kaynatılırken, rayların sıcaklığının belirleyecekleri SFT değerinin belirli bir toleransla artırılıp azaltıldığı bir aralıkta (örneğin $\text{SFT} \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$) bulunmasına özenle dikkat edilmektedir. Demiryolu

hatlarının bu şekilde inşası sonrasında ise servis ömrü boyunca, ray sıcaklıkları sürekli takip edilmekte ve eğer bu SFT değerinin belirli bir miktar üzerine çıkmışsa, yani Demiryolu Mühendisliği literatüründe Kritik Ray Sıcaklığı (Critical Rail Temperature, CRT) adı verilen limitlere erişilmişse, aşım miktarına (ΔT) bağlı olarak çeşitli aksiyonlar uygulanmaktadır [4]. Söz konusu aşım miktarı ile ilgili olarak literatürde farklı kıstaslar verilmekte olup, örnek bir uygulama [9] Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Demiryolu hat kondisyonuna bağlı olarak aksiyon limitleri [9]

Demiryolu hat kondisyonu / Aksiyon türü ve limiti	İyi (ideal durumda)	Kötü (yetersiz balast omuz desteği vb.)
CRT _{alarm}	SFT+32 °C	SFT+10 °C
CRT _{50/100}	SFT+37 °C	SFT+13 °C
CRT ₃₀	SFT+42 °C	SFT+15 °C

Tablo 1’de örneği verilen bu uygulamada, ray sıcaklığı CRT_{alarm} seviyesine ulaştığında alarm verilerek ray sıcaklığı yakın takibe alınmakta, CRT_{50/100} seviyesinde hat işletim prosedürüne bağlı olarak 50 veya 100 km/sa’lik tekayyüdat uygulanmakta, CRT₃₀ limiti üzerinde ise zorunlu görülen seferler 30 km/sa’lik düşük bir hızla gerçekleştirilmektedir [9]. Tablo 1 incelendiğinde, CRT limitleri belirlenirken; hat durumunun ve SFT değerinin baz alındığı görülmektedir. Günümüzde gerek hat durumuna ilişkin bakım prosedürleri açısından gerekse SFT değerleri belirlenirken ülkelerin ve demiryolu kuruluşlarının farklı uygulamaları söz konusudur. Bu bağlamda iki farklı örnek verilecek olursa; ülkemizdeki (TCDD tarafından uygulanan) yaygın SFT hesaplama metodu Denklem 4’te [3, 10], Amerika’da AREMA doğrultusunda AMTRAK vb. kuruluşlarca izlenen SFT belirleme metodu ise Denklem 5’te [3, 11] verilmiştir.

$$SFT_{conv} = [(T_{railmax} + T_{railmin}) / 2] + 5 \quad (4)$$

$$SFT_{arema} = (2 \times T_{railmax} + T_{railmin}) / 3 \quad (5)$$

SFT_{conv} : Gerilimsiz ray sıcaklığı (°C) (ülkemizde yaygın kullanılan metotla hesaplanan)

SFT_{arema} : Gerilimsiz ray sıcaklığı (°C) (Amerika’da yaygın kullanılan metotla hesaplanan)

T_{railmax} : Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en yüksek ray sıcaklığı (°C)

T_{railmin} : Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en düşük ray sıcaklığı (°C)

Demiryolu sektörünün yukarıda kısaca özetlenen “RTB risk yönetimi” konusundaki ihtiyaçlarını karşılamak üzere, günümüze kadar birçok SFT hesaplama yöntemi ve CRT takip sistemi geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu bağlamda, yukarıda verilen örneklerdeki her iki yaklaşım da "geçmiş yıllarda" ve "ülkemiz dışında" geliştirilmiş ampirik bağıntılardır. Ancak, ülkeler veya bölgeler arasındaki farklılıklar ve değişen iklim koşulları nedeniyle, RTB risk yönetimi açısından, örneğin tekayyüdatların sayısının ve süresinin kısıtlanması ya da meydana gelen RTB hadiselerinin azaltılması gibi konularda "evrensel" bir çözüm sunmalarının mümkün olmadığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ülkemizde bu bağlamda erişilebilen literatürde herhangi bir akademik çalışma tespit edilememiştir. Bu önemli literatür boşluğunun doldurulmasına katkıda bulunmak amacıyla hazırlanan bu çalışmada, ülkemize özel optimum bir SFT belirleme metodu geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. Metot

Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki 81 ilde ölçülen en yüksek (T_{airmax}) ve en düşük (T_{airmin}) hava sıcaklığı değerlerinin belirlenmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün (MGM) güncel veri tabanı (1930-2023) kullanılmıştır [12]. Ülkemizde halihazırda “ray sıcaklıkları” ile ilgili bu denli geniş bir veri tabanı mevcut olmadığından, MGM’den elde edilen bu “hava sıcaklığı” değerleri kullanılarak, en yüksek (T_{railmax}) ve en düşük (T_{airmin}) ray sıcaklığı değerleri hesaplama yapılarak,

tahmini olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar yapılırken literatür doğrultusunda en düşük ray sıcaklığı, en düşük hava sıcaklığı ile eşit ($T_{\text{railmin}}=T_{\text{airmin}}$), en yüksek ray sıcaklığı ise en yüksek hava sıcaklığının 1,5 katı ($T_{\text{railmax}}=1,5 \times T_{\text{airmax}}$) olarak kabul edilmiştir [3]. Bu şekilde, 81 il için belirlenen olası en yüksek ve en düşük ray sıcaklıkları kullanılarak ve Denklem 4'teki ülkemizde yaygın kullanılan konvansiyonel hesap metodu doğrultusunda, her bir il için SFT_{conv} değerleri belirlenmiş ve Tablo 2-4'te sunulmuştur. Bu tablolarda ayrıca söz konusu SFT_{conv} değerleri ile T_{railmax} arasındaki mutlak fark da (ΔT_{conv}) hesaplanmış ve RTB riskinin seviyesini gösteren bir parametre olarak ayrı bir sütun halinde sunulmuştur. Nitekim giriş bölümünde sunulan Denklem 1-3 doğrultusunda işlem yapıldığında, söz konusu fark (ΔT) arttıkça meydana gelen termal gerilmeler (basınç kuvvetleri) artmakta ve RTB riski de yükselmektedir. Tablo 1'de geçen 81 ilin sıralaması, alfabetik metotla değil, söz konusu fark düzeyi (ΔT_{conv}) esas alınarak en yüksekten en düşüğe doğru uygulanmış, hat kondisyonunun tüm şehirlerde ideal ve eşdeğer durumda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca -il sınırları içerisinde demiryolu geçmese de- Türkiye'deki 81 ilin tamamı için hesaplama yapılmıştır. Nitekim ülkemiz demiryolu ağı giderek artmaktadır ve SFT değerlerinin ülke genelindeki dağılımının gözlemlenip analizi için herhangi bir ilimiz analiz dışında tutulmamıştır.

Tablo 2. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-1

Şehir	T_{airmax}	T_{airmin}	T_{railmax}	T_{railmin}	SFT_{conv}	ΔT_{conv}	SFT_{new}	ΔT_{new}
Ağrı	39,9	-45,6	59,9	-45,6	12,1	47,7	19,4	40,4
Batman	48,8	-24,0	73,2	-24,0	29,6	43,6	37,5	35,7
Muş	41,6	-34,4	62,4	-34,4	19,0	43,4	26,2	36,2
Bolu	42,8	-31,5	64,2	-31,5	21,4	42,9	28,7	35,5
Tunceli	43,5	-30,3	65,3	-30,3	22,5	42,8	29,9	35,4
Sivas	40,0	-34,4	60,0	-34,4	17,8	42,2	24,8	35,2
Kayseri	40,7	-32,5	61,1	-32,5	19,3	41,8	26,4	34,7
Diyarbakır	46,2	-24,2	69,3	-24,2	27,6	41,8	35,1	34,2
Iğdır	42,0	-30,3	63,0	-30,3	21,4	41,7	28,5	34,5
Kars	37,1	-37,0	55,7	-37,0	14,3	41,3	21,1	34,6
Ardahan	35,0	-39,8	52,5	-39,8	11,4	41,2	17,9	34,6
Erzincan	40,6	-31,2	60,9	-31,2	19,9	41,1	26,9	34,0
Erzurum	36,5	-37,2	54,8	-37,2	13,8	41,0	20,4	34,3
Çorum	42,6	-27,2	63,9	-27,2	23,4	40,6	30,5	33,4
Eskişehir	41,6	-28,6	62,4	-28,6	21,9	40,5	29,0	33,4
Tokat	45,0	-23,4	67,5	-23,4	27,1	40,5	34,5	33,0
Kastamonu	42,2	-26,9	63,3	-26,9	23,2	40,1	30,3	33,0
Aksaray	40,8	-29,0	61,2	-29,0	21,1	40,1	28,1	33,1
Kütahya	41,4	-28,1	62,1	-28,1	22,0	40,1	29,1	33,0
Karaman	41,4	-28,0	62,1	-28,0	22,1	40,1	29,1	33,0
Konya	40,9	-28,2	61,4	-28,2	21,6	39,8	28,6	32,8
Bayburt	38,4	-31,3	57,6	-31,3	18,2	39,5	24,9	32,7
Kırşehir	40,5	-28,0	60,8	-28,0	21,4	39,4	28,3	32,4
Çankırı	42,4	-25,0	63,6	-25,0	24,3	39,3	31,4	32,2
Amasya	45,0	-21,0	67,5	-21,0	28,3	39,3	35,6	31,9
Siirt	46,0	-19,3	69,0	-19,3	29,9	39,2	37,3	31,7
Bingöl	42,0	-25,1	63,0	-25,1	24,0	39,1	31,0	32,0
Gümüşhane	41,1	-25,7	61,7	-25,7	23,0	38,7	29,9	31,7
Afyonkarahisar	39,8	-27,0	59,7	-27,0	21,4	38,4	28,2	31,5
Ankara	41,0	-24,9	61,5	-24,9	23,3	38,2	30,2	31,3

Tablo 3. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-2

Şehir	T _{airmax}	T _{airmin}	T _{railmax}	T _{railmin}	SFT _{conv}	ΔT_{conv}	SFT _{new}	ΔT_{new}
Malatya	42,7	-22,2	64,1	-22,2	25,9	38,1	33,0	31,0
Bursa	43,8	-20,5	65,7	-20,5	27,6	38,1	34,8	30,9
Elâzığ	42,4	-22,6	63,6	-22,6	25,5	38,1	32,6	31,0
Manisa	45,5	-17,5	68,3	-17,5	30,4	37,9	37,7	30,5
Edirne	44,1	-19,5	66,2	-19,5	28,3	37,8	35,5	30,6
Kırıkkale	42,0	-22,4	63,0	-22,4	25,3	37,7	32,3	30,7
Niğde	39,7	-25,6	59,6	-25,6	22,0	37,6	28,8	30,8
Van	37,5	-28,7	56,3	-28,7	18,8	37,5	25,4	30,9
Kocaeli	44,1	-18,0	66,2	-18,0	29,1	37,1	36,2	29,9
Düzce	42,4	-20,5	63,6	-20,5	26,6	37,1	33,6	30,0
Balıkesir	43,2	-18,8	64,8	-18,8	28,0	36,8	35,1	29,7
Gaziantep	44,0	-17,5	66,0	-17,5	29,3	36,8	36,4	29,6
Kilis	47,6	-12,0	71,4	-12,0	34,7	36,7	42,2	29,2
Nevşehir	39,5	-23,6	59,3	-23,6	22,8	36,4	29,5	29,7
Bartın	42,8	-18,6	64,2	-18,6	27,8	36,4	34,8	29,4
Uşak	41,9	-19,9	62,9	-19,9	26,5	36,4	33,4	29,4
Şanlıurfa	46,8	-12,4	70,2	-12,4	33,9	36,3	41,3	28,9
Yozgat	38,8	-24,4	58,2	-24,4	21,9	36,3	28,5	29,7
Adıyaman	45,3	-14,4	68,0	-14,4	31,8	36,2	39,0	28,9
Hakkâri	38,8	-23,4	58,2	-23,4	22,4	35,8	29,0	29,2
Isparta	40,3	-21,0	60,5	-21,0	24,7	35,7	31,5	29,0
Artvin	43,0	-16,1	64,5	-16,1	29,2	35,3	36,2	28,3
Sakarya	44,0	-14,5	66,0	-14,5	30,8	35,3	37,8	28,2
Kahramanmaraş	47,2	-9,6	70,8	-9,6	35,6	35,2	43,0	27,8
Hatay	45,2	-11,8	67,8	-11,8	33,0	34,8	40,2	27,6
Kırklareli	42,5	-15,8	63,8	-15,8	29,0	34,8	35,9	27,9
Burdur	41,6	-16,7	62,4	-16,7	27,9	34,6	34,7	27,7
Aydın	45,1	-11,0	67,7	-11,0	33,3	34,3	40,5	27,2
Denizli	44,4	-11,4	66,6	-11,4	32,6	34,0	39,7	26,9
Mardin	42,5	-14,0	63,8	-14,0	29,9	33,9	36,8	27,0
Bilecik	41,0	-16,0	61,5	-16,0	27,8	33,8	34,5	27,0
Karabük	43,7	-11,8	65,6	-11,8	31,9	33,7	38,9	26,7
Osmaniye	45,6	-8,5	68,4	-8,5	35,0	33,5	42,1	26,3
Adana	45,7	-8,1	68,6	-8,1	35,2	33,3	42,4	26,2
Bitlis	34,6	-24,1	51,9	-24,1	18,9	33,0	25,0	26,9
Muğla	42,1	-12,6	63,2	-12,6	30,3	32,9	37,1	26,1
Şırnak	40,4	-14,5	60,6	-14,5	28,1	32,6	34,7	25,9
Yalova	42,1	-11,0	63,2	-11,0	31,1	32,1	37,8	25,3
Tekirdağ	40,2	-13,5	60,3	-13,5	28,4	31,9	35,0	25,3
İzmir	43,2	-8,2	64,8	-8,2	33,3	31,5	40,1	24,7
Antalya	45,0	-4,6	67,5	-4,6	36,5	31,1	43,4	24,1
Çanakkale	39,7	-11,5	59,6	-11,5	29,0	30,5	35,5	24,1
İstanbul	40,6	-9,0	60,9	-9,0	31,0	30,0	37,5	23,4
Mersin	41,5	-6,6	62,3	-6,6	32,8	29,4	39,4	22,8
Zonguldak	40,5	-8,0	60,8	-8,0	31,4	29,4	37,9	22,9

Tablo 4. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-3

Şehir	T_{airmax}	T_{airmin}	$T_{railmax}$	$T_{railmin}$	SFT_{conv}	ΔT_{conv}	SFT_{new}	ΔT_{new}
Samsun	39,0	-9,8	58,5	-9,8	29,4	29,2	35,7	22,8
Sinop	39,3	-8,4	59,0	-8,4	30,3	28,7	36,6	22,3
Giresun	37,3	-9,8	56,0	-9,8	28,1	27,9	34,2	21,8
Trabzon	38,2	-7,4	57,3	-7,4	30,0	27,4	36,1	21,2
Rize	38,2	-7,0	57,3	-7,0	30,2	27,2	36,3	21,0
Ordu	37,3	-7,2	56,0	-7,2	29,4	26,6	35,4	20,5

Bu çalışma kapsamında, güncel meteorolojik veriler ve modern teknolojik imkanlar da kullanılarak, ülkemizin iklimsel yapısına uygun yeni bir SFT belirleme metodu geliştirmek amacıyla Tablo 2-4'te yer alan ray sıcaklığı bilgileri 'veri seti' olarak kullanılmış ve Python programlama dili aracılığıyla Jupyter Notebook'ta analiz edilmiştir. Jupyter Notebook, veri analizi ve bilimsel hesaplamalar için kullanılan, Python gibi programlama dillerini destekleyen interaktif bir geliştirme ortamıdır. Bu kapsamda ilk olarak, her bir şehir için optimum SFT değerleri belirlenmiştir. Bu süreçte, SFT değeri ile en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkın (ΔT_{new}) en fazla 37 °C olmasına, en düşük ray sıcaklığı ile SFT değeri arasındaki farkın ise en fazla 52 °C olmasına özel dikkat gösterilmiş ve buna uygun ön koşullar tanımlanmıştır. Söz konusu 37 °C'lik fark belirlenirken Tablo 1'deki $CRT_{50/100}$ limiti esas alınmıştır. 52 °C'lik fark belirlenirken ise halihazırda TCDD tarafından Sivas ili için kullanılan SFT_{conv} değeri ile yıl içerisinde beklenen en düşük ray sıcaklığı arasındaki mutlak fark değeri baz alınmıştır. Her ne kadar Tunceli, Bolu, Muş, Batman ve Ağrı için yapılan hesaplamalarda 58 °C'ye varan daha yüksek farklılıklar söz konusu olsa da, RTB riski yönetilirken aşırı çekme gerilmelerini ve dolayısıyla kış aylarında ray/kaynak kırılmalarını önlemek adına Sivas ilindeki yıllardır süregelen tecrübeye dayalı 52 °C'lik değer kullanılmasının daha güvenilir tarafta kalacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu 52 °C'lik limit uygulandığında, RTB riskini kolayca yönetmek adına gerekli 37 °C'lik diğer limitin Türkiye'nin 81 ilinden 80'inde sağlandığı görülerek bu limit değerlerinin yeterli olduğu tahkik edilmiştir.

Söz konusu limit değerleri belirlendikten sonra, Pandas ile aktarılan veri seti, Scipy.optimize kütüphanesi kullanılarak SLSQP (Sequential Least Squares Programming, Ardışık En Küçük Kareler Programlaması) yöntemiyle analiz edilmiştir. Pandas, veri manipülasyonu ve analizi için kullanılan, özellikle tablo benzeri veri yapılarıyla çalışmayı kolaylaştıran güçlü bir Python kütüphanesidir. SLSQP, belirli kısıtlar altında bir fonksiyonun en düşük veya en yüksek değerini bulmakta (kısıtlı optimizasyon problemlerinde) yararlanılan yaygın bir yöntemdir. Bununla birlikte, SFT belirleme amacıyla literatürde ilk olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanım amacı özetlenecek olursa; daha önce belirtilen 37 ve 52 °C'lik kısıtlar ve SFT değeri ile en yüksek ray sıcaklığı değeri arasındaki farkın (ΔT_{new}) en düşük seviyede olması şartlarını sağlayan optimum SFT değerlerinin belirlenmesidir.

Analizlerin ikinci aşamasında, güncel meteorolojik veriler kullanılarak yıllık olarak güncellenebilecek bir ampirik bağıntı oluşturulması hedeflenmiştir. Bu bağıntı, programlama bilgisi gerektirmeden SFT belirleme yapmaya olanak tanıyacaktır ve bu amaçla ikinci bir Jupyter Notebook dosyası hazırlanmıştır. Bu dosyada, Tablo 2-4'teki ray sıcaklığı verileri ile optimum SFT değerleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Sklearn kütüphanesinin LinearRegression sınıfı kullanılarak bir lineer regresyon modeli oluşturulması ve veri setine ait matrisler arasındaki ilişkiyi öğrenmesi için tipik bir model oluşturulmuş ve eğitilmiştir (machine learning, makine öğrenmesi). Sklearn kütüphanesi, makine öğrenmesi algoritmalarının etkili ve esnek bir şekilde uygulanmasına olanak tanıyan, açık kaynaklı ve geniş bir kullanıcı topluluğuna sahip bir Python kütüphanesidir. LinearRegression sınıfı ise, doğrusal regresyon modelleri oluşturmak ve eğitmek için ideal bir araçtır. Bu nedenle hem güvenilirliği hem de kolay uygulanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu süreç, makine öğrenmesinin temel

prensiplerinden biri olan denetimli öğrenmenin (supervised learning) kapsamında değerlendirilmekte olup, model, geçmiş verilerle eğitilerek, bu verilerdeki örüntüleri öğrenmekte ve gelecekteki verileri tahminde kullanılabilir hale gelmektedir. Model eğitimi tamamlandıktan sonra ampirik denklemde kullanılacak katsayılar (coefficients) ve sabit terim (intercept) belirlenmiştir. Bu katsayılar ve sabit terim kullanılarak SFT_{new} değişkeninin, en yüksek ve en düşük ray sıcaklığı değişkenlerine göre bir lineer denklem formu oluşturulmuştur. Neticede, Denklem 6'da sunulan ampirik bağıntı elde edilmiş ve bu denklem kullanılarak hesaplanan SFT_{new} değerleri ve olası en yüksek ray sıcaklığı ile farklılıkları (ΔT_{new}) Tablo 2-4'te sunulmuştur.

$$SFT_{new} = 0,585 \times T_{railmax} + 0,4766 \times T_{railmin} + 6,1295 \quad (6)$$

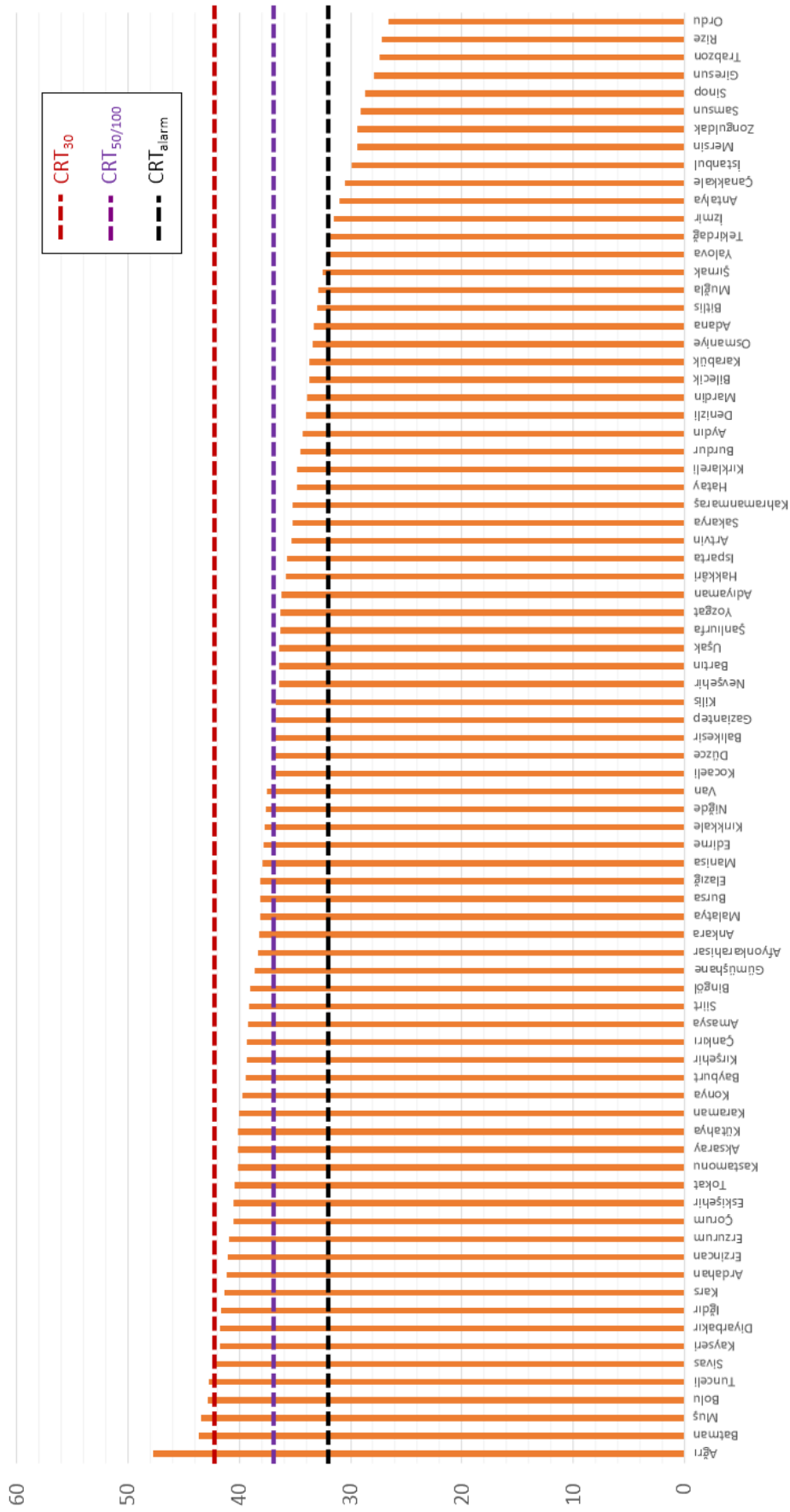
SFT_{new} : Çalışma kapsamında geliştirilen yeni gerilimsiz ray sıcaklığı değeri (°C)

$T_{railmax}$: Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en yüksek ray sıcaklığı (°C)

$T_{railmin}$: Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en düşük ray sıcaklığı (°C)

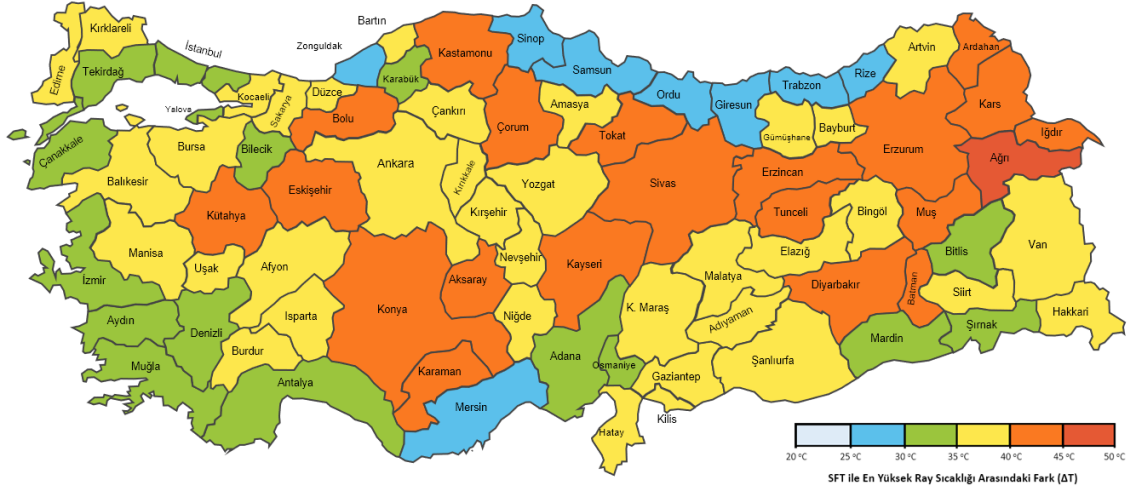
3. Bulgular

Önceki bölümde, bu çalışma hazırlanırken MGM tarafından yayımlanan en güncel veriler (1930-2023) kullanılarak, ülkemizdeki her bir şehir için konvansiyonel metotla ve ülkemiz iklimsel koşullarına uygun olarak yeni geliştirilen ampirik bağıntıyla SFT değerleri (SFT_{conv} ve SFT_{new}) hesaplanmıştır. Ayrıca, bu SFT değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklılıklar (ΔT_{conv} ve ΔT_{new}) da sunulmuştur. Bu bölümde ise konu daha detaylı analiz edilmiş ve öncelikle Şekil 3'te, ülkemizde halen yaygın olarak kullanılan konvansiyonel SFT belirleme metoduyla belirlenen SFT_{conv} değerleri ile güncel MGM verileri doğrultusunda hesaplanan en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklar (ΔT_{conv}), iller bazında sütun grafikler halinde sunulmuştur.

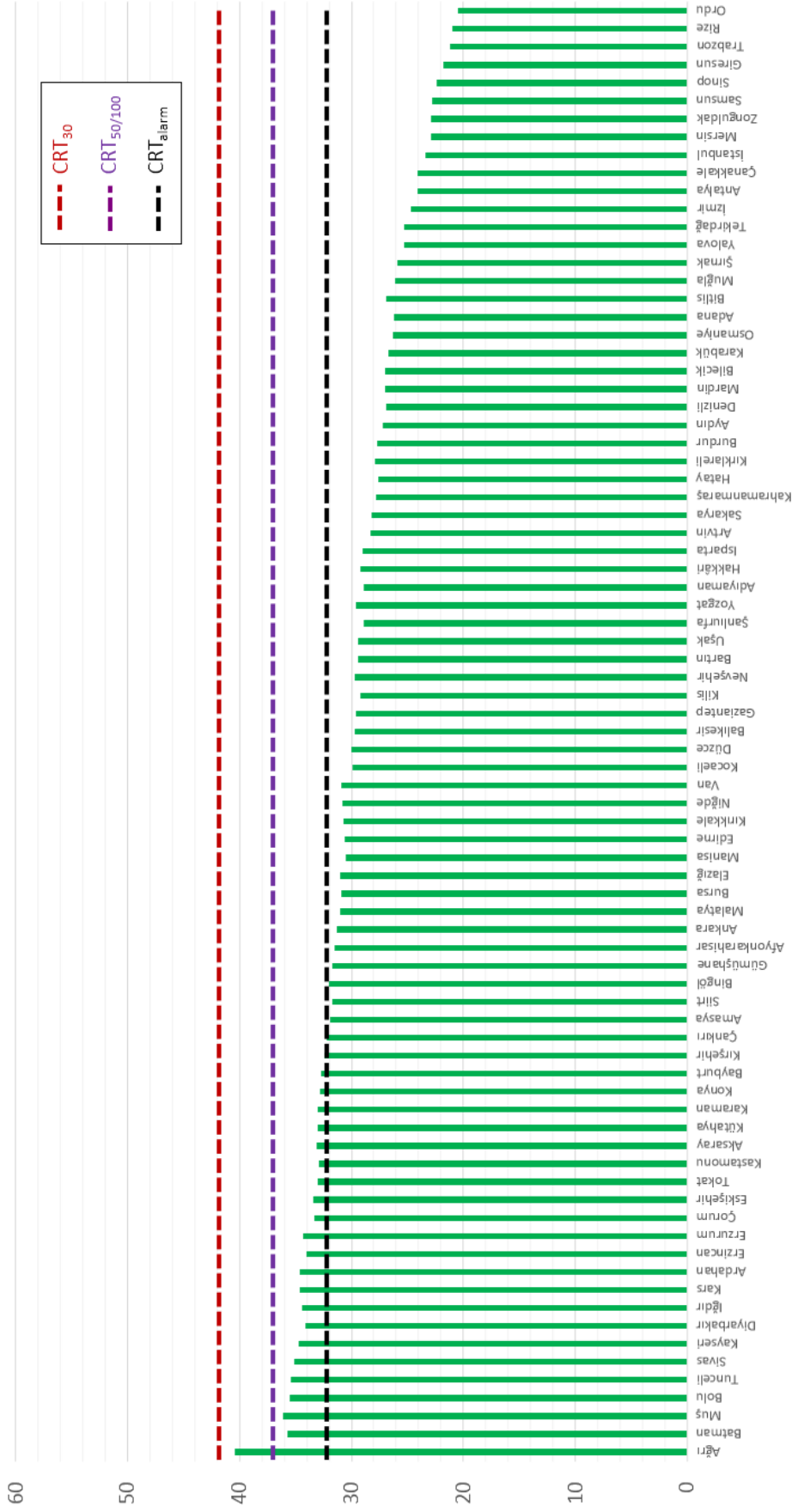


Şekil 3. Konvansiyonel metotla belirlenen SFT_{conv} değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkların (ΔT_{conv}) iller bazında değişimi ve kritik ray sıcaklık limitleriyle karşılaştırılması

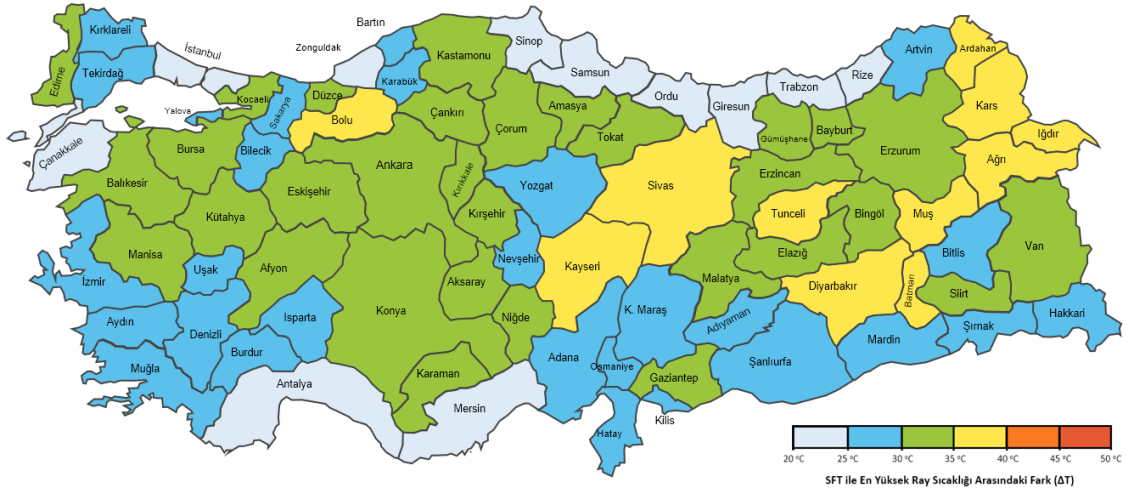
Şekil 3'teki grafikte Tablo 1'de detayları verilen çeşitli kritik ray sıcaklığı (CRT) aksiyon limitleri de karşılaştırma amacıyla işaretlenmiştir. Görüldüğü üzere ülkemizdeki 81 ilden 70'inde CRT_{alarm} limiti aşılmaktadır. Üstelik 43 ilimizde demiryolu bakım ekipleri hattı ideal kondisyonda tutmalar dahi, eğer zamanında yeterli seviyede tekayyüdat uygulanmamışsa, RTB riskini artıracak kadar yüksek farklılıklar ($>CRT_{50/100}$) mevcuttur. Dahası 9 ilimizde CRT₃₀ limitini aşıp 48 °C'ye ulaşan ΔT_{conv} değerleri söz konusudur ve bu durumda yalnız zorunlu hallerde ve 30 km/sa tekayyüdat ile işletim önerilmektedir. RTB risklerinin coğrafi dağılımının daha kolay incelenebilmesi için Şekil 4'teki harita hazırlanmıştır. Bu haritada ΔT_{conv} değerleri 5'er °C'lik bölümlere ayrılmış ve 6 bölümlü bir renk skalası uygulanmıştır. Şekil 5'te ise bu çalışma sonucunda ulaşılan ve Denklem 6'da verilen yeni SFT belirleme metoduyla belirlenen SFT_{new} değerleri ile güncel MGM verileri doğrultusunda hesaplanan olası en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklar (ΔT_{conv}), iller bazında sütun grafikler halinde sunulmuştur. Bu şekilde de Tablo 1'de detayları verilen çeşitli kritik ray sıcaklığı (CRT) aksiyon limitleri karşılaştırma amacıyla işaretlenmiştir. Yeni uygulamanın ülkemizde bu bağlamda iller bazında sağlayacağı faydaların daha kolay incelenebilmesi için Şekil 6'daki harita hazırlanmıştır. Bu haritada da ΔT_{conv} değerleri 5'er °C'lik bölümlere ayrılmış ve şeklin sağ alt köşesinde sunulan skalada görülebilecek farklı renklerle gösterilmiştir.



Şekil 4. Kovansiyonel SFT belirleme yaklaşımı ile Türkiye Demiryolu Termal Burkulma Riski Haritası



Şekil 5. Yeni metotla belirlenen SFT_{new} değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkların (ΔT_{new}) iller bazında değişimi ve kritik ray sıcaklık limitleriyle karşılaştırılması



Şekil 6. Yeni önerilen SFT belirleme yaklaşımı ile Türkiye Demiryolu Termal Burkulma Riski Haritası

4. Sonuç

Gerilimsiz ray sıcaklığı (SFT), raylı ulaşım sistemlerinin servis ömrü süresince sergileyeceği performans açısından kritik rol oynamaktadır. SFT değeri, gerekenden düşük belirlendiğinde yüksek basınç kuvvetleri nedeniyle demiryolu raylarında termal burkulma (RTB) veya diğer bir tabirle flambaj riski artmaktadır. Bu parametrenin gerekenden yüksek belirlenmesi halinde ise çekme kuvvetleri artarak ray veya kaynak kırılması hadiseleri ile karşılaşılabilir. Bu yüzden SFT değerlerinin optimum bir düzeyde belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde SFT değerleri belirlenirken ülkelerin ve demiryolu kuruluşlarının farklı uygulamaları söz konusudur. İklimsel faktörlerin farklı coğrafyalarda oldukça değişiklik gösterebilmesi nedeniyle herhangi bir ülke için geliştirilen bir metot başka bir ülke için geçerli olmayabilmektedir. Ayrıca çağımızda etkisini artıran iklim değişikliği ve küresel ısınma nedeniyle geçmişte geliştirilmiş bağıntıların lokal ve güncel veriler ışığında revize edilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde bu alandaki bilimsel çalışmaların sınırlı olduğu göz önünde bulundurularak, makine öğrenmesi destekli modern algoritmalar ve güncel meteorolojik veriler kullanılarak yeni bir SFT belirleme yöntemi geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bazı önemli çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- SFT değeri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki fark, bir diğer tabirle aşım miktarı (ΔT), RTB riskinin seviyesini gösteren en önemli parametrelerden biridir. Bu bağlamda en düşük ΔT değerleri görülen ve halihazırda (2024) demiryolu hattı geçen 3 il Samsun, Zonguldak ve Mersin'dir. En yüksek ΔT değerleri görülen ve halihazırda (2024) demiryolu hattı geçen 3 ilimiz ise Batman, Muş ve Sivas'tır. Ülkemizde hâlihazırda yaygın olarak kullanılan konvansiyonel SFT belirleme metodu ile belirlenen SFT_{conv} değerleri için 81 il bazında hesaplanan bu aşım miktarlarının (ΔT_{conv}) 27 °C ile 48 °C arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla TCDD'nin ülke genelinde tek bir SFT değeri kullanmak yerine, şehirler bazında farklı farklı SFT değerleri kullanmasının oldukça doğru bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir.
- Konvansiyonel metottaki aşım miktarları (ΔT_{conv}) toplu olarak değerlendirildiğinde, ülkemizdeki 81 ilden 70'inde CRT_{alarm} seviyesi olan 32 °C'nin aşıldığı, 43 ilde $CRT_{50/100}$ limit değeri olan 37 °C'nin aşıldığı, 6 ilimizde ise CRT_{30} limit değeri olan 42 °C'nin de aşıлып 48 °C'ye ulaşan ve neticede hat işletim prosedürlerine bağlı olarak 30-100 km/sa'lık hız sınırlamaları (tekayyüdat) gerektiren aşımın söz konusu olduğu görülmüştür.

Burada belirtilen CRT limit değerleri, hat kondisyonunun tamamen ideal durumda olduğu durum için geçerlidir. Yani konvansiyonel SFT belirleme uygulamasında -hat kondisyonu tamamen ideal durumda olsa dahi- birçok ilimizde sıkça tekayyüdat uygulanması gerekebilecektir. Bu durum ise yük/yolcu tren seferlerinin aksaması ve finansal kaybın artması anlamına gelmektedir.

- c. Konvansiyonel SFT belirleme metodunun bu dezavantajının kök-nedeni araştırıldığında, söz konusu metotta, olası en yüksek ve en düşük ray sıcaklıklarının aritmetik ortalamalarının alındığı, yani basınç ve çekme gerilmelerinin bir nevi dengelenmeye çalışıldığı görülmektedir. Bu yaklaşım, ülkemizde ılıman iklimlerin etkin olduğu kıyı kesimlerinde çoğunlukla problem oluşturmaya da özellikle karasal iklimin etkin olduğu iç kesimlerdeki illerimizde, yüksek aşım miktarlarına (ΔT_{conv}) sebebiyet verebilmektedir.
- d. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni SFT belirleme metoduyla belirlenen SFT_{new} değerleri ile güncel MGM verileri doğrultusunda hesaplanan en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklar (ΔT_{new}) incelendiğinde ise; ülkemizdeki 81 ilden 29'unda CRT_{alarm} seviyesi olan $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşan ray sıcaklıklarının söz konusu olduğu belirlenmiştir. Ancak CRT_{30} limitini aşması beklenen hiçbir il bulunmadığı, yani 30 km/sa 'lik tekayyüdat gerektiren ray sıcaklıklarının söz konusu olmadığı görülmüştür.
- e. Yeni yaklaşımda, ülkemizdeki 81 ilden yalnız 1'inde, hat işletim prosedürlerine bağlı olarak 50 veya 100 km/sa 'lik tekayyüdat gerektiren, yani $CRT_{50/100}$ limit değerini aşan ray sıcaklıklarının söz konusu olduğu belirlenmiştir. Bir diğer ifadeyle yalnızca Ağrı ilinde, gelecekte demiryolu inşa edilmesi halinde, $CRT_{50/100}$ limitini aşan ancak CRT_{30} limitinin altında kalan aşım söz konusu olabilecektir. Neticede RTB risk yönetiminin konvansiyonel metoda göre daha kolay ve ekonomik olması beklenmektedir.
- f. Yeni önerilen SFT belirleme metodunun bu önemli avantajının kök-nedeni, söz konusu metotta kullanılan ampirik bağıntının elde edilmesi için hazırlanan Python kod dizininde, konvansiyonel uygulamanın aritmetik ortalama almaya dayalı mantalitesinin yerine, ülkemizdeki 81 ilin meteorolojik verilerini kapsayan, demiryolu hattının çekme gerilmesi kapasitesinden en yüksek düzeyde yararlanan ve RTB hadiselerine neden olan basınç gerilmelerini en düşük seviyeye indirgeyen, yani kısaca "aritmetik ortalama" almaktansa "optimum" bir çözüm sağlamaya endeksli bir algoritma kullanılmasıdır.

Bu çalışmanın hazırlandığı 2024 yılı itibariyle ülkemizdeki 45 ilden demiryolu geçerken 36 ilden henüz geçmemekteydi. Ancak çalışmada, -il sınırları içerisinde demiryolu bulunmasa da- Türkiye'deki 81 ilin tamamı için analiz yapılmıştır. Nitekim ülkemizdeki raylı ulaşım ağı her yıl giderek artmakta ve bu çevreci ulaşım biçiminin yakın gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Ayrıca SFT değerlerinin ülke genelindeki dağılımının gözlemlenip analizinin yapılabilmesi de düşünülerek, analiz sürecinde herhangi bir ilimiz kapsam dışında tutulmamıştır. Bununla birlikte yürütülen çalışmanın bazı kısıtları da mevcut olup, aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- i. Çalışma esnasında hat elemanlarının ve kondisyonunun tüm şehirlerde ideal ve eşdeğer durumda olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla yürütülen RTB risk analizleri, olası en yüksek ray sıcaklığı değerleri ile SFT değerleri arasındaki farkların seviyesine, yani aşım miktarlarına (ΔT) endeksli ve çeşitli hat parametrelerinin (üstyapı modeli, balast karakteristikleri vb.) RTB riskine etkileri "kapsam dışında" tutulmuştur.
- ii. Çalışma kapsamında kullanılan ray sıcaklığı verileri, MGM tarafından yayımlanan 1930-2023 yılları hava sıcaklığı verileri baz alınarak, literatürdeki ampirik bağıntılarla tahmini olarak belirlenmiştir. Daha kesin sonuçlar sağlayan yerinde ölçüm metodları, elimizde henüz bu denli geniş bir veri tabanı mevcut olmadığı için kullanılamamıştır.
- iii. Çalışma kapsamında kullanılan CRT aksiyon limitleri (CRT_{alarm} , $CRT_{50/100}$ ve CRT_{30}) ile ray/kaynak kırılması açısından izin verilebilir çekme gerilmesi oluşturan ray sıcaklığı ($SFT-52\text{ }^{\circ}\text{C}$) geçmiş tecrübeler ve literatür bilgilerine dayanmaktadır. Bu konuda

laboratuvar ortamında veya pilot uygulamalarla araştırma yürütülmesi söz konusu limit değerlerinin daha rasyonel bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, ülkemizde geliştirilen bu ilk SFT belirleme metodu, halihazırda ülkemizde ve dünyada kullanılmakta olan konvansiyonel metotlara kıyasla önemli geliştirmeler içermektedir. Bununla birlikte çalışmada sunulan bilgilerin bir kısmı, teorik ve temsili esaslara dayalıdır ve deneysel çalışmalar ve pilot uygulamalarla desteklenmesi gerekmekte olup, ilerleyen çalışmalarda araştırmaların bu yönde ilerletilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] A. Miri, D. P. Thambiratnam, T. Chan, "Thermal challenges of replacing jointed rails with CWR on steel railway bridges," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 181, no. 106627, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106627>
- [2] G. Isgro, C. J. Kleverlaan, H. Wang, A. J. Feilzer, "Thermal dimensional behavior of dental ceramics." *Biomaterials*, vol. 25 (12), pp. 2447-2453, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.027>
- [3] M. Saltan, F. Çeçen, Ö. F. Acar, "Rail thermal buckling risk management: comparative analysis of stress-free temperature determination in the USA and Türkiye," in *ICivilTech*, Isparta, Türkiye, 2024, pp. 68
- [4] F. Çeçen, B. Aktaş, "Ray sıcaklığı takip sistemleri (RSTS) için en uygun yerlerin belirlenmesinde termal kameralardan yararlanılması: hızlı analiz metotları geliştirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 20, pp. 141-154, Temmuz 2024, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1474099>
- [5] Anonymous, The Indira Gandhi National Open University (IGNOU): unit 2: thermal stresses, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/31825/1/Unit-2.pdf>
- [6] Anonymous, Dlubal: cross-section properties: UIC 60, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/uic-60-din-en-13674-1>
- [7] BBC.com, Türkiye'de son 15 yılın ölümlü tren kazaları, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://shorturl.at/mHP8U>
- [8] CNN.com, Sıcaktan tren rayları bile genleşti!, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.cnn.com/turkiye/sicaktan-tren-raylari-bile-genlesti-11-12-2018?page=3>
- [9] Baker C. J. K., L. Chapman, A. D. Quinn, "The future cost to the United Kingdom's railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change," *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224 (1), pp. 25-34, 2009, doi: <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT292>
- [10] MEB (Milli Eğitim Bakanlığı). UKR (Uzun kaynaklı ray), 2013. Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20\(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray\).pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray).pdf)
- [11] AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), *Manual for Railway Engineering*, Chapter 5: Track, Part 5: Track Maintenance, (2005). Accessed: 19.11.2024. [Online]. Available: <https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/AREMA-Chapter-5-2007.pdf>
- [12] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmi İklim İstatistikleri, Accessed: 19.11.2024. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m>

Özgeçmiş**Ferhat ÇEÇEN**

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryolu termal analizleri ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir.

E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Çalışmada içerisinde sunulan bilgilerin bir kısmı, teorik ve temsili esaslara dayalıdır ve deneysel çalışmalar ve pilot uygulamalarla desteklenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla çalışmanın herhangi bir hukuki metinde veya bilirkişi raporunda doğrudan mesnet teşkil etmesinin uygun olmadığı ve bağlayıcı nitelik taşımadığı değerlendirilmektedir.



Sürdürülebilir Ulaştırma Sistemlerinin Ana unsuru Olarak Demiryolu Taşımacılığı: Nicel Bir Değerlendirme

Ömer CENGİZ^{1b}

Kafkas Üniversitesi, Sarıkamış Meslek Yüksekokulu, Lojistik, Kars, Türkiye

*omercengiz99@gmail.com

(Alınış/Received: 16.12.2024, Kabul/Accepted: 09.01.2025, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Bu araştırma, sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin gerekli hale geldiği günümüzde, çevreci bir taşıma modu olan demiryolu taşımacılığının yeniden artan önemine vurgu yapma amacı taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda, belirlenmiş değişkenlere ait veriler elde edilerek, nicel analiz yöntemleri ile analiz edilmiştir. Araştırmanın veri setini 2000-2021 yılları arasında 37 ülkeye ait sürdürülebilir kalkınma hedefleri, demiryolu yatırım oranları, sera gazı emisyon miktarları ile demiryolu yük ve yolcu taşıma miktarları oluşturmaktadır. Araştırmada parametrik analiz yöntemlerinden Bağımsız İki Örneklem T Testi ve Pearson Korelasyon Analizi yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda demiryolu taşımalarına olan talebin sürekli olarak arttığı, ülkelerin sera gazı emisyon miktarlarının anlamlı bir şekilde düştüğü, demiryolu yük taşımaları ile ülkelerin kalkınma hedefleri arasında pozitif yönde arasında anlamlı bir ilişki olduğu ve demiryolu yatırım oranları ile sera gazı emisyon miktarları arasında negatif yönlü anlamlı bir ilişki olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilirlik, Ulaştırma Sistemleri, Demiryolu Taşımacılığı

Railway Transport as the Main Element of Sustainable Transport Systems: A Quantitative Assessment

Abstract: This research aims to emphasize the increasing importance of rail transportation as an environmentally friendly mode of transportation in today's world where sustainable transportation systems have become necessary. For this purpose, data on the determined variables were obtained and analyzed using quantitative analysis methods. The data set of the research consists of sustainable development goals, railway investment rates, greenhouse gas emission amounts and railway freight and passenger transportation amounts of 37 countries between 2000-2021. Independent Two Sample T Test and Pearson Correlation Analysis methods, which are among the parametric analysis methods, were used in the research. As a result of the analyzes, it was concluded that the demand for railway transportation is constantly increasing, the greenhouse gas emission amounts of the countries have decreased significantly, there is a positive and significant relationship between railway freight transportation and the development goals of the countries, and there is a negative and significant relationship between railway investment rates and greenhouse gas emission amounts.

Keywords: Sustainability, Transportation Systems, Rail Transport

1. Giriş

Dünya üzerinde son yıllarda yaşanan bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte tüm sektörlerde yürütülen faaliyetler sonucu olumsuz çevresel etkilerin yüksek düzeylere çıktığı bilinmektedir. Ekonomik ve sosyal yaşam alanlarının bu durumdan olumsuz yönde etkilenmesinin bir sonucu olarak, sürdürülebilirlik önemli bir kavram haline gelmiştir. Sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve çevre korumacı yaklaşımların gerekliliğini ve aciliyetini ortaya koyan bir yaklaşımdır. Gelişen bu bakış açısı, dünyada hareket etmesi gereken yük ve yolcuların vazgeçilmez gereksinimi olan ulaştırmayı da yakından ilgilendirmektedir [1]. Mevcut dünya nüfusunun 2030 yılına kadar 8,5 milyara ulaşması beklenirken, bunun doğal bir sonucu olarak

Atıf için/Cite as: Ö. Cengiz, "Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin omurgası demiryolu taşımacılığı: nicel bir değerlendirme" *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 111-123, Temmuz 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1602560

insanlara ve yüklere ait ulaşım hareketlerinde de artış yaşanacağı düşünülmektedir. Bunun bir sonucu olarak çevresel sorunların artacağı ve gerekli enerji talebinin yükseleceği tahmin edilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, gelecekte ulaşım sistemlerinin ihtiyaç duyduğu enerji talebini daha da azaltacak enerji tasarrufu çözümüne odaklı ve daha çevreci ulaşım sistemlerine geçiş gerekliliği artmaktadır. Bu bakış açısı ile ulaşım türleri arasındaki entegrasyonun etkin şekilde kullanımı ve çevreci ulaşım türlerinin etkinliğinin artırılması sağlanarak ulaşım faaliyetleri açısından sürdürülebilirliğin ilk adımları atılmalıdır [2].

Ulaşım sektörü tüm ticari faaliyetleri birbirine bağlamanın yanı sıra gereksinim duyulan bütün yer değişim hareketlerini mümkün kılarak, ülke ekonomilerinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sektörün bu olumlu rolünün yanında, küresel karbon emisyonlarındaki büyük payı sebebiyle olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Ulaşım kaynaklı emisyonlar, dünyadaki emisyonların %25'ini oluşturmaktadır. Bu oranın yüksekliği nedeni ile çevreci bir yaklaşımla dizayn edilmesi gereken öncelikli sektörlerden biri ulaşım sektörüdür [3,4]. Yeşil mutabakat ile Avrupa Birliği'nin ulaşım politikalarında yer alan temel konular güvenli, çevreci, emniyetli ve etkin ulaşım sistemleri olarak sıralanmaktadır. Dünyada petrole bağımlı olan taşıma sektörü, petrol fiyatlarında yaşanan dalgalanmalar ve çevreye verdiği zararlar dikkate alındığında, önümüzdeki yıllarda önemli sorunların meydana geleceği bilinmekte ve ulaşım sistemlerindeki ihtiyaç duyulan dönüşümlerin hızlı bir biçimde planlanması gerekmektedir [5,6].

Yük taşımacılığının tüm dünyada hızlı bir şekilde genişlemesi ve bu sektöre duyulan ihtiyacın her geçen gün artmasıyla birlikte sürdürülebilirlik ve çevrenin korunmasına ilişkin konularda da ciddi endişeler ortaya çıkmaktadır [7]. Geliştirilecek çevreci alternatif taşıma organizasyonları ve alternatif enerji kaynakları açısından teknolojinin rolü yüksek düzeyde önemlidir. Ulaşım sistemleri açısından en sürdürülebilir çözümler her ulaşım modunun en son teknolojileri, yenilikçi motor yapısını, alternatif yakıtları ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanması olacaktır [4]. Sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin kurulmasında ve devamlılığının sağlanmasında en etkin paydaşın demiryolu taşımacılığı olacağı beklenmektedir. Bu beklentiler ışığında ulaşım faaliyetlerinde sürdürülebilir sistemlerin kurulması ve demiryolu taşımacılığının yeni ulaşım entegrasyonları içerisinde önemli bir paya sahip olmasının düşünülmesi nedeniyle bu bilimsel araştırma yapılmıştır. Araştırma demiryolu taşımacılığının sürdürülebilir ulaşım faaliyetlerine sağlayacağı desteğe dikkat çekmeyi hedeflemektedir. Araştırmanın amacı çevreci bir taşıma türü olan demiryolu taşımacılığının önemini giderek artmasıyla birlikte sürdürülebilir taşıma faaliyetlerine sunacağı katkıları vurgulamak ve belirlenmiş değişkenler açısından demiryolu taşımacılığının mevcut durumunu değerlendirmektir. Araştırmanın kavramsal çerçeve bölümünde ilgili kavramların açıklanmasına ve literatürdeki görünürlük düzeylerine değinilmiştir. Yöntem ve bulgular bölümlerinde nicel analiz yöntemleri kullanılarak kavramlar arasındaki ilişki ve farklılıkların varlığına değinilerek sürdürülebilir ulaşım sistemleri için demiryolu taşımacılığının önemine vurgu yapılmıştır.

2. Kavramsal Çerçeve

Sürdürülebilirlik, gelecek kuşakların ihtiyaç duyacakları kaynakların korunması hedefiyle bugünün ihtiyaçlarını karşılayan ekonomik kalkınma faaliyetlerinin bütünü olarak tanımlanmaktadır. Sürdürülebilirlik aynı zamanda, küresel eşitlik bakışı ile tüm insanlığın temel ihtiyaçlarını karşılayabilecek sistemi temsil eden bir model arayışıdır [8]. Son yıllarda yaşanan çevresel ve iklimsel değişimler, doğal kaynaklarda yaşanan azalmalar, toplumsal dönüşümler ve ekonomik krizler gibi birçok önemli sorun ilk olarak mevcut durumun korunmasını, devamında ise gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya anlayışını önemli kılmaktadır [9]. Mevcut kaynakların gelecek kuşaklara aktarılacak üzere verimli bir şekilde kullanılması ve çevrenin korunması amacı göz ardı edilmeden ekonomik ve sosyal gelişme hedeflerinin sağlanması ise sürdürülebilir kalkınma olarak adlandırılmaktadır. Bu kavram

içerisinde tüm insan ihtiyaçlarının karşılanmasını hedefleyen eşitlik prensibi de yer almaktadır. Gelecek nesillerin gereksinimlerini karşılama yeteneğinden ödün verilmeden, bu günün ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla sürdürülebilir kalkınma çabası gösterilmelidir [4].

Ulaştırma kavramı, ihtiyaç duyulan mal ve hizmetlere zaman ve mekân faydası kazandırmak amacıyla fiziksel hareketlerini ifade etmektedir [10]. Ulaştırma faaliyetlerinin toplumlar üzerinde ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarda önemli etkileri vardır. Özellikle kentsel alanlarda ulaşılması hedeflenen sürdürülebilirlik düzeylerine ulaştırma faaliyetleri ile ilgili düzenlemelerin katkısı göz ardı edilemeyecektir. Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerine geçişte öncelikli adımlar, geleneksel yakıtların optimum kullanımı, toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi, teknolojik sistemlerin mevcut yapılara entegre edilerek etkinlik oranlarının sürekli artırılması ve bütüncül ulaştırma sistemlerinin dizayn edilmesidir. Bu sayede; gelişmiş enerji ve kaynak sürdürülebilirliğinin arttığı, trafik ve riskli taşımaların azaldığı, taşıma kaynaklı kirliliğin azaldığı ve optimize edilmiş bir ulaştırma sistemin kurulduğu görülecektir [11]. Sürdürülebilir ulaştırma kavramı, daha az enerji kullanmayı hedefleyen ve çevreye verilen zararların minimuma indirildiği önemli bir alan olarak tanımlanırken, sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ise, tüm dünyada ihtiyaç duyulan hareketliliğin güvenli ve sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla çevresel zararları azaltarak ve yenilenemeyen kaynakların kullanımını sınırlandırarak verimli ve sürdürülebilir kalkınmaya katkı sunmayı hedefleyen sistem olarak tanımlanmaktadır [12]. Sürdürülebilir ulaştırma konusu planlanan gelecek için çözüm bekleyen öncelikli bir alanın dizayn edilmesinde önemli katkılar sunacaktır [9]. Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin tanımı içerisinde sosyal açıdan eşitlik, sağlık, erişilebilirlik, güvenlik, bireysel sorumluluk, bütüncül planlama yer alırken çevresel açıdan; kirliliği önleme, verimli arazi ve kaynak kullanımı ekonomiklik prensibi ile yer almaktadır [13,14].

Araştırma konusu içerisinde yer alan diğer önemli bir kavram ise sera gazlarıdır. Atmosferde meydana gelen sera gazları, su buharı (H_2O), metan (CH_4), azotoksit (N_2O), karbondioksit (CO_2), ozon (O_3) gazları ve endüstriyel üretimler sonucunda ortaya çıkan sülfürhekzaflorid (SF_6), hidroflorokarbon (HFC), perflorokarbon (PFC) gibi florür içeren bileşiklerden oluşmaktadır. İnsan kaynaklı sera gazlarının en önemlisi olan karbondioksit toplam sera gazlarının %80'ini oluşturmaktadır. Karbondioksit havada en yüksek düzeyde ısı tutma özelliği gösterirken, miktarının artması ile birlikte küresel ısınmanın önemli sebeplerinden biri olarak görülmektedir [9]. İlerleyen başlıklarda ise sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ile demiryolu taşımacılığı ve sürdürülebilirlik kavramlarının daha ayrıntılı açıklanmasına yönelik tanımlamalar, kapsamlı bir şekilde yer almaktadır.

2.1. Ulaştırma sistemlerinde sürdürülebilirlik

Tedarik zinciri ve lojistik operasyonlarının sosyal, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli bir yere sahip olduğu bilinmekte ve bu alanlarda gerekli gelişimin sağlanması amacı ile çalışmalar ve projeler yürütülmektedir [15]. Tedarik zinciri ve lojistiğin önemli bir unsuru olan ulaştırma sistemlerinin amacı, yüklerin ve yolcuların çevre ve toplum üzerinde en az olumsuz etki bırakacak biçimde ve verimli olarak taşınmasıdır. Dünyadaki mevcut ulaştırma sistemleri, hava kirliliğinin artmasının, sera gazı emisyonlarındaki yüksek oranların, çevresel bozulmaların, küresel ısınmanın ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerin ana nedenlerinden biridir. Ulaştırma sektörünün sürdürülebilir ve çevreci bir hale getirilmesi mevcut sorunların aşılması için önemli bir adımdır [14]. Söz konusu sektörün yüksek düzeyde fosil yakıtlara bağımlı olması nedeniyle, küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarına katkısı yüksektir. Bu etkilerin azaltılması ve ulaştırma faaliyetlerinin daha etkin yürütülmesi amacına yönelik olarak sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin kurulması hızlı ve öncelikli hale gelmektedir [3,17]. Ek olarak, yük taşımacılığında sürdürülebilir sistemlerin kurulması, çevresel açıdan sağlıklı ve

dönüşüm ekonomisini destekleyecek önemli politikaların geliştirilmesine büyük faydalar sağlayacaktır [7].

Bir ulaşım sisteminin sürdürülebilir olmasındaki temel etkenler; sistemin ekonomik olması, tüm insanlara fayda sağlayacak olması ve çevre dostu olacak şekilde tasarlanmasıdır. Bu etkenler birbirinden bağımsız değildir ve ortak çözüm noktaları bulunmalıdır. Sürdürülebilir bir ulaşım sistemi tüm kullanıcılar için hareketlilik ve etkin erişim, güvenli ve çevre dostu bir ulaşım şekli, ekonomik açıdan sürdürülebilir bir sistem ve halk sağlığı (kardiyo-solunum hastalıkları, ölümler ve kanser) gibi birçok konu ile yakından ilişkilidir. Sürdürülebilir ulaştırma sistemleri için son yıllarda odaklanılan konular yüksek oranda kentleşmiş bölgelerdeki trafik sıkışıklığının hafifletilmesi ve kirlenici emisyonları en aza indiren geleneksel ulaşım sistemlerine alternatif ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi olmuştur [6].

Büyük bölümü karayolu taşımaları ile gerçekleştirilen yük taşımalarında sürdürülebilir ulaşım modlarının kullanımı bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Esneklik, hız, güzergâh ve kapıdan kapıya taşıma gibi avantajları nedeniyle çok tercih edilen karayolu taşıma modu; yoğun enerji tüketimi, kazalar, gürültü ve çevre kirliliği gibi önemli olumsuzlukları bünyesinde barındırmaktadır. Bu sebeple oluşturulacak sürdürülebilir ulaşım sistemleri içerisinde karayolu taşıma modunun optimum düzeyde kullanımının hesaplanması önem arz etmektedir. Dönüşüm sırasında sisteme dâhil edilecek önemli bir taşımacılık modu demiryolu taşımacılığıdır. Bu taşıma modu, çok düşük emisyon düzeylerine sahip olması nedeniyle yeşil bir ulaştırma modu olarak değerlendirilmektedir [18]. Sürdürülebilir taşımacılıkta yüklerin tek bir taşıma türü ile taşınması yerine iki veya üç farklı taşıma sistemi olarak planlanarak, karayolu araçlarının özel tasarlanmış raylı sistemlere bindirilmesiyle kapıdan kapıya taşımayı mümkün kılmanın yanında enerji tasarrufu ve karbon salınımlarının azaltılmasına olanak sunmaktadır. Bu tür yeni taşıma sistemleri aynı zamanda maliyet ve zaman tasarruflarına katkı sağlamaktadır [8].

Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinde en önemli paydaşlardan bir diğeri de geliştirilen teknolojik cihaz ve yöntemlerdir. Teknolojinin desteği ile sağlanan ulaştırma faaliyetleri optimizasyon ve verimlilik ilkelerini daha etkili bir şekilde yerine getireceği için ulaştırma faaliyetlerinin sürdürülebilirliğine önemli katkılar sunacaktır. Sürdürülebilir ve akıllı ulaştırma sistemleri akıllı şehirlerin vazgeçilmez unsurları olarak görülmektedir [11]. Bu konulara ek olarak, son yıllarda geliştirilmiş olan teknolojilerden faydalanan akıllı ulaştırma sistemleri sürdürülebilir ulaşımın en önemli destekçilerinden biri olmuştur. Yeni hedeflenen ulaştırma sistemleri için simülasyon, makine öğrenimi, yapay zeka ve optimizasyon en popüler konular olmaya başlamıştır [6].

Karbon emisyonlarının artışına bağlı olarak sürdürülebilir ulaştırma sistemlerine olan ilgi ve bu sistemlerin kurulma gereksinimleri tüm dünyada öncelikli bir konu olarak karşımıza çıkarken çevre, sağlık ve ekonomik açıdan sunduğu temel faydalar aşağıda listelenmiştir [14]:

- (1) Taşıma faaliyetleri sonucu ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının yüksek oranlarda azaltılması.
- (2) Taşıma işlemlerinin daha az maliyetlerle gerçekleştirilmesi sonucu ekonomik tasarruf sağlanması.
- (3) Ulaştırmanın sürdürülebilir hale getirilmesi ile genel sürdürülebilir ekonomi yaklaşımına katkı sunulması.
- (4) Çevresel zararların ve zararlı gazların azaltılması sonucunda daha sağlıklı ve iyi bir yaşam kalitesine sahip yaşam alanları oluşturulması.
- (5) İyi planlanmış entegre taşıma sistemleri ile trafik sıkışıklığının azaltılması.
- (6) Yenilenemeyen enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltacak alternatif enerji kaynaklarına geçişin sağlanması.

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de sürdürülebilir ulaştırma sistemlerine duyulan ihtiyacın gün geçtikçe arttığı görülmektedir. Bu ilgi artışının başlıca sebebi, ulaştırma sektörü kaynaklı karbon emisyon oranlarının sanayi sektöründen sonra ikinci sırada kirletici seviyede olmasıdır. Çevreye verilen bu zararların giderilmesi açısından en önemli çözüm yöntemi ise sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin dizayn edilmesi görülmektedir [9]. Türkiye’nin AB ile ticareti ve taşıma faaliyetlerinin devamlılığı açısından sürdürülebilir ulaştırma politikalarını uygulama zorunluluğu gün geçtikçe önemli hale gelirken, sürdürülebilir bir ulaştırma sistemi kurma amacıyla gerekli adımların gecikme yaşanmadan atılması gerekmektedir [5].

2.2. Demiryolu taşımacılığı ve sürdürülebilirlik

Demiryolu taşımacılığının tarihsel açıdan gerileme yaşaması ile birlikte yüksek yol yoğunluğu, trafik sıkışıklığı, tıkanıklık ve ulaşımdan kaynaklanan yüksek emisyonlar gibi zararlı etkiler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, son yıllarda demiryolu taşımacılığı, önemli sosyo-ekonomik ve çevresel faydaları açısından tekrar geliştirilmesi gereken bir ulaştırma alanı olarak önemini artırmıştır [19].

Ulaştırma faaliyetlerindeki sürdürülebilirlik çalışmalarında genel yaklaşım fosil yakıt kullanımının azaltılması amacıyla karayolu taşımacılığının payının düşürülmesi ve demiryolu taşımacılığının ise payının artırılması yönündedir [9]. Sürdürülebilir ulaşımda özellikle demiryolu taşımacılığının çevresel ve bölgesel etkinliğinin artırılması ve diğer taşıma türleri ile uluslararası düzeyde entegrasyonlarının sağlanması önemli bir gerekliliktir. Sürdürülebilir taşıma sistemlerinin kurulması sırasında demiryolu taşımacılığının avantajları olan güvenlik, yüksek taşıma kapasitesi ve çevreci olma gibi özellikleri kullanılarak daha esnek organizasyon yapılarının kurulması ulaştırma ağlarına önemli faydalar sağlayacaktır [20]. Demiryolu taşımacılığının sürdürülebilir bir ulaştırma modu olarak görülmesinin diğer önemli nedenleri ise; farklı tür enerji kaynaklarının kullanımına imkan vermesi, karbon emisyon düzeylerinin düşük olması, yüksek kapasiteli taşımacılık yapabilmesi ve mekan tüketiminin azlığı olarak sıralanabilir [1]. Yıllık karbon emisyon miktarlarının ulaştırma modlarına göre dağılımı aşağıda yer alan Şekil 1’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, yıllık karbon emisyon değerlerinin %24’ünün ulaştırma faaliyetleri kaynaklı olduğu ve bu değerlerin %74,5’inin ise karayolu kaynaklı olduğu görülmektedir. Demiryolu taşımacılığının kaynaklanan emisyon miktarının ise %1 gibi çok düşük bir değer olduğu görülmektedir [21].



Şekil 1. Ulaştırma sistemleri kaynaklı karbon emisyon oranları [21]

Demiryolu taşımacılığının iklim değişikliği, hava kirliliği, kaza ve gürültü kirliliği gibi çevresel etkileri karayolu ve diğer taşıma türlerine göre daha düşük seviyelerdedir. Demiryolu taşımacılığının etkinliğinin artırılması, sürdürülebilir taşıma sistemleri açısından önem taşırken, gerek ülke ve ekonomik bölgelerin ulaştırma planları gerekse de geliştirilen yasa ve politikaların uygulamaya konulması ile mevcut taşıma sistemlerinde demiryolu merkezli dönüşümü sağlayacaktır [7,17]. Demiryolu taşımacılığı hem yük hem de yolcu hareketliliği açısından verimli bir ulaştırma şekli olmasının yanında, gelecekte çevreci ulaştırma sistemlerinin inşası ve enerji talebinin azaltılması için önemli bir alternatif çözüm olarak görülmektedir [2].

Demiryolu altyapılarına yapılan yatırımlar ülkelerin sosyo-ekonomik kalkınmalarıyla yakından ilgilidir. Demiryolu sistemlerinin geliştirildiği ülkelerde ekonomik büyümedeki hareket dinamik ve kademeli olma eğilimindedir [22]. Sürdürülebilir taşımacılık yönetimi için önemli bir role sahip olan demiryolu taşımacılığına yönelik altyapı yatırımları, gelişimi ve yaygınlaştırılması güncel bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Yatırımların yüksek maliyetli oluşu devlet destekli projelerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Demiryolu gelişim ve sürdürülebilirliği için kamusal sübvansiyonların yeterli ve sürekli olması gerekmektedir [23]. Teknolojik gelişmelerle birlikte kullanılmaya başlanan yüksek hızlı trenler ulaştırma sistemleri için yeni ve önemli bir alternatif olmaya başlamıştır. Raylı sistemlerde yaşanan gelişmeler, gelecek ulaştırma planlarında demiryolu taşımacılığını ön plana çıkarmaktadır [24]. Demiryolu ağ sistemlerinin daha etkin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, çevreci ekonomik sistemlerin gelişmesine katkılar sunulacaktır [25].

Demiryolu taşımacılığı tahıl, kömür, gübre, hububat, demir cevheri gibi taneli ağır yükler ile sıvı yük taşımalarında büyük avantajlar sunmaktadır. Ayrıca konteynerlerin etkin bir şekilde demiryolu taşımalarında kullanılması ile birlikte intermodal ve kombine taşıma türleri için önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır. Bu tür etkin kullanımları ile birlikte, taşımacılık sektörü içerisinde çevreyi en az kirleten ve daha az enerji tüketen demiryolu taşımacılığına ağırlık verilmesi beklenmektedir [8].

Yaşanan covid-19 salgını ile birlikte Avrupa ulaştırma sektörü üzerine bir yük oluştuğu bilinmektedir. Bu durum, demiryolu sektörünün rekabet gücünü artırma ve Avrupa yük ve insan hareketliliğinin omurgası olma vizyonuna yönelik bir fırsat olarak düşünülmektedir. Çevresel olarak sürdürülebilir olmayan ulaşım modlarından çevre dostu ulaşım modlarına geçişi aktif olarak teşvik ederek, çevre koruma ve hareketlilik gerekliliğini aynı anda korumak hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple demiryolu taşımacılığı, ulaşım için fosil yakıtların yoğun kullanımından uzaklaşmayı ve yeniden toparlanma süreci ile birlikte tekrar önemli artan bir ulaştırma modu olarak yeni politikaların gerçekleştirilmesine destek sağlayabilir [26].

3. Literatür Taraması

Sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ve demiryolu taşımacılığının bu sistemler açısından önemini ortaya koyacak çalışmalar hedeflenerek literatür araştırması yapılmış ve bu bilimsel araştırmanın literatürde kapsayacağı yer belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak belirlenen anahtar kelimeler web of science, google scholar, dergipark ve researchgate veri tabanlarında taranarak ilgili bilimsel çalışmalara ulaşılmıştır. Devamında elde edilen çalışmalar arşivlenerek araştırmanın kavramsal çerçevesi ve literatür araştırması kısımlarında kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmasına göre Bouraima vd. [19] çalışmalarında çok kriterli karar verme tekniklerini kullanarak, sürdürülebilir ulaştırma sistemleri için alternatif demiryolu sistemlerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Araştırma sonucunda demiryolu tabanlı ulaştırma sistemlerine ait kritik aşamaları sıralayarak, en kritik zorluğun bilgi sistemleri olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Moslem [27] çalışmasında, Bulanık Analitik Hiyerarşi sürecini kullanarak, sürdürülebilir kentsel ulaşım sürecine katkı sunan toplu taşıma sistemini iyileştirmek için sürdürülebilir ve verimli çözümler sunmuşlardır. Zhao vd. [28] çalışmalarında 2000-2019 yılları arasında sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ile ilgili yapılmış bilimsel araştırmaları inceleyerek gelecekte yapılacak çalışmalara yön verecek araştırma konuları belirlemişlerdir. Bunlar sürdürülebilir ulaştırma göstergeleri için performans modeli, sürdürülebilir ulaştırma politikası, paydaşların katılımı, tedarik zinciri ve lojistik yönetimi, çevresel etki, seyahat davranışı, araçlar için yeni yakıtlar, ulaştırma stratejik planlaması ile bisiklet ve toplu taşıma konularıdır. Ahsan vd. [29] çalışmalarında net sıfır emisyon miktarlarına ulaşma amacına yönelik çevresel, ekonomik, sosyal ve teknik perspektiflere dayanan demiryolu teknolojileri ile ilgili bir araştırma yapmışlardır. Araştırma sonucunda, gelecekte kullanılacak alternatif enerji kaynakları ile çalışan lokomotif tiplerine geçiş ve genel demiryolu sistemlerinin performans ve güvenliğini

artıracak teknik engellerin aşılması gerekliliği vurgulanmıştır. Ezsias vd. [30] yapmış oldukları çalışmalarında uygun fiyatlı ve temiz enerji, inovasyon, altyapı, sorumlu tüketim ve üretim, demiryolu ve sürdürülebilirlik konularını incelemiştir. Araştırma sonucunda yük ve yolcu taşımacılığında, demiryolu taşımacılığının tercih edilmesi ile enerji tasarrufu ve CO₂ emisyonları açısından diğer ulaşım modlarına göre 2 ila 10 kata kadar daha yüksek fayda sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Ekici ve Ferşadoğlu [23] demiryolu taşımacılığının diğer modlarla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlar üzerine yapmış oldukları çalışmalarında yatırım maliyetleri, çevreye verilen zarar, emisyon, enerji tüketimi, ulaşım güvenliği gibi nedenlerle demiryolu ulaştırma sistemlerine öncelik verilmesi ve ulaştırma altyapısının yenilenmesine yönelik yatırım çalışmalarının devam ettirilmesi sonucuna varmışlardır. Milewicz vd. [31] yapmış oldukları çalışmalarında, dünyada iklim değişikliğini azaltma ile sürdürülebilir ulaşım modlarına geçiş konularına duyulan acil ihtiyaç ve demiryolu taşımacılığının bu konulardaki önemli rolüne değinmişlerdir. Araştırma sonucunda temel stratejileri, teknolojileri ve politika çerçevelerini inceleyerek, dünya çapındaki demiryolu taşımacılığında sürdürülebilirlikle ilgili zorluklara ve fırsatlara ışık tutmayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmalara ek olarak sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ile ilgili paylaşımlı mobilite, ulaşım araçlarında elektrik enerjisine geçiş, akıllı mobilite ve mikro ulaşım araçlarına geçiş konuları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Belirlenen kriterler doğrultusunda yapılan literatür taraması sonuçları değerlendirildiğinde, sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ve demiryolu taşımacılığının sürdürülebilir ulaşım katkılarını konularında sınırlı sayıda çalışma bulunması ve belirlenmiş olan birçok değişken açısından iki konu arasındaki ilişkinin incelenmiş olması bu çalışmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır. Bu sebeple yapılan bu araştırmanın literatürde bulunan bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

4. Yöntem

Sürdürülebilir taşıma faaliyetlerinin önem kazandığı bu günlerde, çevreci bir taşıma modu olan demiryolu taşımacılığının yeniden artan önemine vurgu yapmak ve sürdürülebilirlik, sera gazı emisyon değerleri, altyapı yatırımları ve demiryolu yük-yolcu taşımaları verilerini kullanarak kapsamlı bir değerlendirme yapmak amacıyla bu bilimsel araştırma çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada nicel araştırma deseni kullanılmıştır. Araştırmanın verilerini 37 ülkeye ait 2000-2021 yılları arasındaki Sürdürülebilir Kalkınma Raporu verileri, Demiryolu Yatırım verileri, Demiryolu Yük Taşımacılığı verileri, Demiryolu Yolcu Taşımacılığı verileri ve Sera Gazı Emisyon Miktarları verileri oluşturmaktadır. Ülke sayısı, 2000-2021 yılları arasında ulaşılabilecek maksimum sayıda veriye göre belirlenmiştir. Bu ülkeler Almanya, Amerika B.D., Avustralya, Avusturya, Belçika, Birleşik Krallık, Bulgaristan, Çekya, Çin, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Hırvatistan, Hollanda, İrlanda, İzlanda, İsveç, İsviçre, İtalya, Japonya, Kanada, Kore C., Letonya, Litvanya, Lüksemburg, Macaristan, Meksika, Norveç, Polonya, Portekiz, Rusya, Slovak C., Slovenya, Türkiye, Yeni Zelanda, ve Yunanistan'dır. Verilere ait kaynak, birim ve referans bilgileri aşağıdaki Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Araştırmada kullanılan veri setleri

No	Veri Setinin Adı	Kapsam Yılı	Ülke Sayısı	Kaynak
1	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi	2000-2021	37	Sachs vd. [32]
2	Demiryolu Yatırım Oranları (Yatırım/GDP)	2000-2021	37	OECD İstatistikleri [33]
3	Demiryolu Yük Taşımacılığı (MilyonTon/Km)	2000-2021	37	OECD İstatistikleri [33]
4	Demiryolu Yolcu Taşımacılığı (MilyonKişi/Km)	2000-2021	37	OECD İstatistikleri [33]

5	Sera Gazı Emisyon Miktarları (Kişi başına ton)	2000-2021	37	OECD İstatistikleri [33]
---	---	-----------	----	-----------------------------

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri Birleşmiş Milletler tarafından sürdürülebilir kalkınma için belirlenen hedefler bütünüdür. Birleşmiş Milletler İstatistik Komisyonu'nun yetki alanındaki 231 göstergeden oluşan bir set kullanılarak, üye ülkelere sağlanan bilgiler veri tabanında tematik olarak düzenlenerek hesaplanmaktadır. Demiryolu yatırım oranları ülkelerin yıllık yatırım miktarlarının yıllık gayri safi yurtiçi hasıla miktarlarına oranı ile hesaplanarak elde edilmiş değerlerden oluşmaktadır. Demiryolu yük ve yolcu taşıma miktarları ise yıllık kilometre başına kişi ve kilometre başına ton olarak alınmıştır. Sera gazı emisyon miktarları ise kişi başına ton olarak alınmıştır. 37 ülkenin 2000-2021 yılları arasındaki beş değişkene ait veriler öncelikle tasnif edilmiş ve veriler tanımlayıcı istatistiksel yöntemler kullanılarak özet tablolar oluşturulmuştur. Özet tabloların yorumlanması ve değişkenler arasındaki ilişki ve farklılıkların belirlenmesi amacıyla hipotez testleri yapılmıştır. Veri setleri elde edilmiş değişkenler için yapılacak hipotez testi analiz yöntemlerini belirlemek amacıyla tüm verilere ön testler yapılmıştır. Verilerin çarpıklık ve basıklık katsayılarının +1,5 ile -1,5 aralığında olması, verilerin normale yakın bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir [16]. Elde edilen analizler sonucunda araştırmada kullanılan tüm veri setlerine ait çarpıklık ve basıklık katsayılarının +1,0 ile -1,0 arasında olduğu tespit edilmiştir. Aşağıda yer alan Tablo 2 veri setlerine ait çarpıklık ve basıklık katsayılarını göstermektedir.

Tablo 2. Veri setlerine ait çarpıklık ve basıklık katsayıları

Değişken	İstatistik	Std. Hata
Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi	Çarpıklık (Skewness)	-0,939
	Basıklık (Kurtosis)	0,987
Demiryolu Altyapı Yatırım Oranları	Çarpıklık (Skewness)	-0,599
	Basıklık (Kurtosis)	0,160
Demiryolu Yük Taşıma Miktarları	Çarpıklık (Skewness)	0,540
	Basıklık (Kurtosis)	0,754
Demiryolu Yolcu Taşıma Miktarları	Çarpıklık (Skewness)	0,242
	Basıklık (Kurtosis)	-0,425
Sera Gazı Emisyon Miktarları	Çarpıklık (Skewness)	0,188
	Basıklık (Kurtosis)	-0,469

Veri setlerinin normale yakın bir dağılım göstermesi ve katsayıların belirlenen aralıklarda olması sebebiyle, hipotez testleri yapılırken parametrik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla Pearson Korelasyon Analizi yapılmıştır. Değişkenlere ait yapılan fark testleri için Bağımsız İki Örneklem T Testi yapılmıştır. Fark testleri yapılırken ülkelere ait veriler 2000-2010 yılları ile 2011-2021 yılları arasında kapsayacak şekilde iki gruba ayrılmış ve iki grup arasındaki farklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Gruplar arası farkların tespiti için kurulan hipotezler aşağıdaki yer almaktadır:

H1: Demiryolu altyapı yatırım oranlarının 2000-2010 yılları ile 2011-2021 yılları arasındaki ortalamaları birbirinden farklılaşmaktadır.

H2: Demiryolu yük taşıma miktarlarının 2000-2010 yılları ile 2011-2021 yılları arasındaki ortalamaları birbirinden farklılaşmaktadır.

H3: Demiryolu yolcu taşıma miktarlarının 2000-2010 yılları ile 2011-2021 yılları arasındaki ortalamaları birbirinden farklılaşmaktadır.

H4: Sera gazı emisyon miktarlarının 2000-2010 yılları ile 2011-2021 yılları arasındaki ortalamaları birbirinden farklılaşmaktadır.

Araştırmaya ilişkin tüm analizler SPSS 26 istatistiksel analiz programı kullanılarak yapılmış ve elde edilen veriler bulgular kısmında sunulmuştur.

5. Bulgular

Belirlenmiş ülkelerin Demiryolu taşımacılığı açısından 2000-2021 yılları arasındaki verileri tasnif edilerek Tablo 3 hazırlanmıştır. Tabloda demiryolu yatırım oranları ile yük ve yolcu taşımacılığı verileri özetlenerek yıllara göre yüzdeler artışları hesaplanmıştır.

Tablo 3. Demiryolu yatırım oranları, yük ve yolcu taşıma miktarları özet tablosu

Yıllar	Altyapı Yatırım Oranı (Binde)	Yüzde Değişim	Demiryolu Yük Taşıma Miktarları	Yüzde Değişim	Demiryolu Yolcu Taşıma Miktarları	Yüzde Değişim
2000	2,78	-	5.801.402	-	1.482.018	-
2001	2,71	-2	5.988.647	3	1.508.960	2
2002	3,03	9	6.192.645	7	1.505.467	2
2003	3,17	14	6.607.167	14	1.489.744	1
2004	3,04	9	7.157.684	23	1.582.831	7
2005	2,80	1	7.435.099	28	1.655.934	12
2006	2,65	-4	7.814.863	35	1.736.660	17
2007	2,83	2	8.175.894	41	1.808.893	22
2008	3,23	16	8.339.501	44	1.919.362	30
2009	3,45	24	7.637.328	32	1.889.215	27
2010	3,50	26	8.353.963	44	1.883.987	27
2011	3,37	21	8.755.525	51	2.035.306	37
2012	3,17	14	8.834.552	52	2.082.025	40
2013	3,21	16	8.871.230	53	2.158.134	46
2014	3,59	29	9.078.191	56	2.238.582	51
2015	3,67	32	8.591.322	48	2.274.916	54
2016	2,74	-1	8.408.333	45	2.361.201	59
2017	2,65	-5	9.059.757	56	2.488.626	68
2018	2,70	-3	9.476.410	63	2.609.722	76
2019	2,81	1	9.437.645	63	2.713.099	83
2020	3,18	15	8.982.450	55	1.071.397	-28
2021	3,11	12	9.230.473	59	1.971.081	33

37 ülkeye ait demiryolu altyapı yatırım oranları, yük taşıma miktarları ve yolcu taşıma miktarlarının yıllara göre toplam verileri incelendiğinde yatırım oranlarında yıllara göre genel bir artış veya azalış eğiliminin olmadığı, ancak yük ve yolcu taşımacılığında artış eğiliminin olduğu görülmektedir. Yük ve yolcu taşıma miktarları incelendiğinde 2000 yılı itibarıyla her iki değişkenin de sürekli bir artış eğiliminde olduğu görülürken sadece yolcu taşımalarında covid-19 pandemisi döneminde seyahat kısıtlamaları sebebiyle 2020 yılında önemli bir düşüş yaşanmıştır. Tablo 3'teki veriler genel olarak demiryolu taşımacılığına yönelik bir talep artışını göstermektedir. Bu talep artışının anlamlı olup olmadığı ise yapılacak hipotez testleri ile belirlenecektir. Demiryolu yatırım, yük ve yolcu taşımaları ile ülkelerin emisyon miktarları değişkenlerinin 2011 yılı öncesi ve sonrasına ait değerleri arasında anlamlı bir fark olup olmadığının incelenmesi amacıyla kurulmuş olan hipotezler test edilerek Tablo 4'te yer alan analiz sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 4. Kurulan hipotezlere ait bağımsız iki örneklem t testi sonuçları

Değişkenler	Gruplar	Ortalama	Std. Sapma	T İstatistiği	P Değeri
Demiryolu Altyapı Yatırım Oranları	2000-2010	0,3017	0,0292	-0,660	0,517
	2011-2021	0,3108	0,0351		
Demiryolu Yük Taşıma Miktarları	2000-2010	195.341	25.625	-5,793	0,000
	2011-2021	243.199	9.693		
Demiryolu Yolcu Taşıma Miktarları	2000-2010	45.363	4.740	-3,545	0,002

	2011-2021	58.978	11.821		
Sera Gazı Emisyon Miktarları	2000-2010	8.686	266	6,934	0,000
	2011-2021	7.438	534		

Tablo 4 incelendiğinde Yatırım oranları değişkenine ait t istatistiğinin -0,660 ve anlamlılık değerinin 0,517 ($p>0,05$) olduğu görülmektedir. Buna göre demiryolu alt yapı yatırım oranlarına ait ortalamaların, 2011 yılı öncesi ve sonrası farklılaşmadığı görülmekte ve H1 hipotezi reddedilmektedir. Demiryolu alt yapı yatırım ortalamalarının 2011 yılı sonrasında daha yüksek olduğu tespit edilmiş olsa da bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildir. Demiryolu altyapı yatırımlarının yüksek sabit maliyetlere sahip olması ve genellikle kamu yatırımları ile finanse edilmesi gibi sebepler yatırım oranlarının kamu sübvansiyonlarına bağlı olmasını zorunlu kılmaktadır. Ülkelerin yatırım bütçelerinin birçok alan için kullanılması ve bu yatırımlardan demiryolu taşımalarına ayrılan payın sürekli değişkenlik göstermesi nedenleri anlamlı bir fark oluşmamasını etkilemektedir. Demiryolu yük taşıma değişkenine ait t istatistiğinin -5,793 ve anlamlılık değerinin 0,000 ($p<0,01$) olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değerlere göre H2 hipotezi kabul edilerek, demiryolu taşımacılığında taşınan yük miktarlarının 2011 yılı öncesi ve sonrası arasında anlamlı bir fark olduğu kabul edilmektedir. Yük taşıma verilerinin ortalamaları incelendiğinde 2011 yılı sonrası taşıma miktarlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Demiryolu yolcu taşıma değişkenine ait t istatistiği -3,545 ve anlamlılık değerinin 0,002 ($p<0,05$) olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değerler H3 hipotezinin kabul edildiğini göstermektedir. Demiryolu ile yapılan yolcu taşıma verilerine ait ortalamalarda, 2011 yılı sonrasına ait değer önceki yılların ortalamasından yüksek olduğu ve ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olduğu görülmektedir. Ayrıca ülkelerin sera gazı emisyonlarının farklarını test etmek için geliştirilen H4 hipotezine ait analiz sonuçlarında ise t istatistiği 6,934 ve anlamlılık düzeyinin 0,000 ($p<0,001$) olduğu görülmektedir. Buna göre, sera gazı emisyonlarının 2011 yılı öncesi ve sonrası değerleri arasında beklendiği üzere düşüş yaşandığı görülmektedir. 2011 yılı sonrası ortalamaların önceki yıllardan daha düşük olduğu ve bu farkın anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ve demiryolu taşımacılığı arasındaki ilişkinin incelenmek istendiği bu çalışmada, belirlenmiş olan araştırma değişkenleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi amacıyla Pearson Korelasyon Analizi yapılarak aşağıda yer alan Tablo 5 elde edilmiştir.

Tablo 5. Değişkenler arasındaki ilişkilere ait Pearson korelasyon analizi sonuçları

Değişkenler	N	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (1)	814	r	1				
		p	-				
Demiryolu Altyapı Yatırım Oranları (2)	814	r	,056	1			
		p	,113	-			
Demiryolu Yük Taşıma Miktarları (3)	814	r	,431**	,404**	1		
		p	,000	,003	-		
Demiryolu Yolcu Taşıma Miktarları (4)	814	r	,046	,584**	,647**	1	
		p	,189	,000	,000	-	
Sera Gazı Emisyon Miktarları (5)	814	r	-,414**	-,375*	,356**	,159**	1
		p	,001	,032	,000	,000	-

Tablo 5'te yer alan analiz sonuçları incelendiğinde ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedefi verileri ile sera gazı emisyon verileri arasındaki ilişkinin incelenmesi amacıyla yapılan analiz sonucu r değeri (korelasyon değeri) -0,414 ve anlamlılık değeri 0,001 ($p<0,05$) olduğu görülmektedir. Buna göre, ülkelerin sürdürülebilirlik hedefleri ile sera gazı emisyon değerleri arasında negatif yönde anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Ek olarak ülkelerin

sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile demiryolu yük taşıma miktarları arasındaki ilişkiye ait analizlerden elde edilen değerlerin, r değeri 0,431 ve p anlamlılık değerinin 0,000 ($p < 0,001$) olduğu tespit edilmiştir. Buna göre kalkınma hedeflerine paralel olarak demiryolu yük taşıma miktarlarının artış gösterdiği söylenmelidir. Yine yapılan analizlerde demiryolu yatırım oranları ile sera gazı emisyon verileri, demiryolu yük taşımacılığı ve demiryolu yolcu taşımacılığı verileri arasında anlamlı ilişkiler olduğu tespit edilmiştir. Demiryolu yatırım oranları ve sera gazı emisyon değerlerinin korelasyonu incelendiğinde r değeri -0,375 ve p anlamlılık değeri 0,032 ($p < 0,05$) olduğu görülmektedir. Buna göre demiryolu yatırım oranlarının artması ile sera gazı emisyon değerlerinin düştüğü, iki değişken arasında negatif yönlü ve anlamlı bir ilişkinin olduğu söylenmelidir. Yatırım oranları ve yük taşıma miktarlarına ait değerlerin $r = 0,404$ ve $p = 0,003$ ($p < 0,05$) olduğu tespit edilmiştir. Buna göre yatırım oranları ile demiryolunda yapılan yük taşıma faaliyetleri arasında anlamlı ve olumlu bir ilişki olduğu söylenmelidir. Son olarak yatırım oranları ve yolcu taşıma miktarları arasındaki korelasyon ilişkisine ait değerler, $r = 0,584$ ve $p = 0,000$ ($p < 0,001$) olduğu görülmektedir. Buna göre demiryolu yatırım oranlarının artışına paralel olarak, demiryolu taşımacılığındaki taşınan yolcu sayılarında artış yaşandığı görülmektedir.

6. Sonuç

Son yıllarda kentsel yaşamdaki ilerlemeler, karayolu-havayolu araç ve terminallerinin kullanımına bağlı artan trafik sıklığı, yaşanan aşırı sıklık, hava ve gürültü kirliliğinde yaşanan artışlar, yaşanan çevre sorunları ve enerji krizleri çevre dostu bir ulaştırma modu olan demiryolu taşımacılığının yeniden en önemli alternatife dönüşmesine neden olmuştur. Demiryolu taşımacılığının farklı türlerdeki enerji kaynaklarının kullanımına müsait olması, sera gazı emisyon oranlarının aşırı düşük olması, yüksek kapasiteli taşımalar yapabilmesi ve teknolojik gelişmelerle birlikte hız, esneklik gibi dezavantajların ortadan kalkmasına bağlı olarak bu taşıma modu, sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin önemli bir aktörü haline gelmektedir. Bu sayılan önemli nedenlerden dolayı, sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ile ilgili gerçekleştirilecek değişim ve dönüşüm faaliyetlerinin ana omurgasını demiryolu taşıma sistemlerinin oluşturacağı düşünülmektedir.

Demiryolu taşımalarının sürdürülebilir ulaştırma sistemlerindeki yerine vurgu yapmak amacıyla taşıyan bu araştırmadaki analizler neticesinde önemli sonuçlar elde edilmiştir. Demiryolu yük ve yolcu taşımalarına ait miktarların 2000 yılı itibarıyla sürekli bir artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Yapılan hipotez testi sonuçlarına göre hem yük hem de yolcu taşımalarında yaşanan artışların istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Bu artış demiryolu taşımalarına olan talebin sürekli bir artış eğiliminde olduğu anlamına gelmektedir. Yine yapılan hipotez testi sonuçlarına göre, demiryolu yatırım oranlarının 2011 yılı öncesine göre anlamlı bir şekilde farklılaşmadığı tespit edilmiştir. Bu durum geliştirilmesi gereken çevreci ulaştırma sistemleri kurma amacının tersi bir gösterge olarak görülmektedir. Ülkelerin sürdürülebilirlik yaklaşımına uygun olarak ulaştırma yatırımları içerisinde demiryolunun payını artırmaları ve demiryolu için kamu sübvansiyonlarını artırmaları gerekmektedir. Ülkelerin sera gazı emisyon değerlerinin 2011 yılı öncesi ve sonrası arasındaki farkı gösteren analiz sonucu ise ülkelerin sera gazı emisyonlarını düşürme eğiliminde olduğunu göstermektedir. 2011 sonrası emisyon değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde düştüğü söylenmelidir. Yine araştırma bulguları ışığında Ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile sera gazı emisyon miktarları arasında negatif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Ek olarak demiryolu yatırım oranları ile sera gazı emisyon miktarları arasında tespit edilen negatif yönlü anlamlı ilişki demiryolu taşımacılığının sürdürülebilir ulaştırma sistemleri için önemli bir göstergedir.

Ulaştırma sistemlerinde sürdürülebilirlik yaklaşımı ve demiryolu taşımacılığının bu dönüşümde üstleneceği önemli rol daha önce yapılmış ilgili araştırmaların sonuçları ve bu araştırmada

kullanılan veri setlerine ait analiz sonuçları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Sürdürülebilir ulaştırma sistemleri ile ilgili yapılan bilimsel araştırmaların çoğunda demiryolu taşımacılığının gerekliliği öne çıkmaktadır. Bu sebeple demiryolu taşımacılığının gelecek yıllarda daha etkin ulaştırma sistemlerine dâhil edilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Dünyada ve Türkiye’de demiryolu taşımacılığının sürdürülebilir ulaştırma sistemlerine entegrasyonu için belirtilen öneriler doğrultusunda gerekli adımlar atılmalıdır. Bu öneriler, demiryolu altyapı ve teknolojik gereksinimlerini karşılayacak sistemlerin kurulması için finansman sağlanması gerekmektedir. Demiryolu taşımacılığında yatırım ve operasyon faaliyetlerini düzenleyici birimlerin kamu ve özel sektör paydaşlığı ile kurulması. Demiryolu hizmetlerine erişim imkanı sunacak ve diğer taşıma modları ile entegrasyon sağlayacak fiziksel erişim imkanlarının artırılması. Dijital sistemler yardımı ile hizmetlerden faydalanacak kişilerin erişimini kolaylaştıracak hizmet sunumu ve izlenebilirlik imkânlarının sunulması. Uluslararası demiryolu bağlantılarına kolay entegrasyon sağlayacak mevzuat ve teknoloji konularının güncel olarak takip edilmesi ve uygulamalarının sağlanmasıdır.

Kaynakça

- [1] M. F. Altan, M. Ç. Kızıldaş, and Y. Ayözen, “Demiryollarında gelişme eğilimleri, yüksek hızlı demiryollarının küresel mevcut durumu ve ülkemiz için bir derleme,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp.1261-1268, 2020.
- [2] M. Brenna, V. Bucci, M. C. Falvo, F. Foiadelli, A. Ruvio, G. Sulligoi, and A. Vicenzutti, “A review on energy efficiency in three transportation sectors: railways, electrical vehicles and marine,” *Energies*, vol. 13, no. 9, 2020.
- [3] M. T. Sohail, S. Ullah, M. T. Majeed, and A. Usman, “Pakistan management of green transportation and environmental pollution: a nonlinear ARDL analysis,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 29046-29055, 2021.
- [4] M. Ogrzyzek, D. Adamska-Kmicic, and A. Klimach, “Sustainable transport: an efficient transportation network case study,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19, 2020, 8274.
- [5] G. Koyuncu, “Avrupa Birliği ortak ulaştırma politikasının lojistik sektörü üzerindeki etkisi: Türkiye örneği,” *Ahi Evran Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp.263-278, 2022.
- [6] R. Torre, C. G. Corlu, J. Faulin, B. S. Onggo, and A. A. Juan, “Simulation, optimization, and machine learning in sustainable transportation systems: models and applications,” *Sustainability*, vol. 13, no. 3, 2021, 1551.
- [7] M. Tamannaeei, H. Zarei, and M. Rasti-Barzoki, “A game theoretic approach to sustainable freight transportation: competition between road and intermodal road–rail systems with government intervention,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 153, pp. 272-295, 2021.
- [8] H. Çetinoğlu, and L. Dalyancı, “Cumhuriyetin 100. yılında Türkiye’de demiryolu ulaşımı,” *Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 42-53, 2021.
- [9] D. Demirtürk, “Sürdürülebilir ulaşımda sera gazı etkisini azaltmaya yönelik çalışmalar,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 9 no. 4, pp. 1080-1092, 2021.
- [10] H. Keskin, *Lojistik el kitabı*. Ankara: Gazi Kitabevi, 2011.
- [11] K. J. Shah, S. Y. Pan, I. Lee, H. Kim, Z. You, J. M. Zheng, and P. C. Chiang, “Green transportation for sustainability: review of current barriers, strategies, and innovative technologies,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 326, 2021, 129392.
- [12] C. Chirieleison, A. Montrone, and L. Scrucca, “Event sustainability and sustainable transportation: a positive reciprocal influence,” *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 28 no. 2, pp. 240-262, 2020.
- [13] H. Aydemir, “Yapay zekâ sistemleriyle Türkiye demiryollarının enerji analizi ve sürdürülebilir ulaşım planlaması stratejileri ile ulaşımda enerji verimliliği,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [14] M. M. Abdel Wahed Ahmed, N. Abd El Monem, “Sustainable and green transportation for better quality of life case study greater Cairo–Egypt,” *Hbrc Journal*, vol. 16 no. 1, pp. 17-37, 2020.
- [15] P. Singh, Z. Elmi, V. K. Meriga, J. Pasha, and M. A. Dulebenets, “Internet of things for sustainable railway transportation: past, present, and future,” *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 4, 2022, 100065.

- [16] B. G. Tabachnick, and L. S. Fidell, *Using multivariate statistics: international edition*. Boston: Pearson, 2013.
- [17] S. Erdogan, F. F. Adedoyin, F. V. Bekun, and S. A. Sarkodie, "Testing the transport-induced environmental Kuznets curve hypothesis: the role of air and railway transport," *Journal of Air Transport Management*, vol. 89, 2020, 101935.
- [18] F. Chen, X. Shen, Z. Wang, and Y. Yang, "An evaluation of the low-carbon effects of urban rail based on mode shifts," *Sustainability*, vol. 9 no.3, pp. 401-422, 2017.
- [19] M. B. Bouraima, Y. Qiu, Z. Stević, and V. Simić, "Assessment of alternative railway systems for sustainable transportation using an integrated IRN SWARA and IRN CoCoSo model," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 86, 2023, 101475.
- [20] C. N. Pyrgidis, *Railway transportation systems: design, construction and operation*. Florida: CRC press, 2021.
- [21] H. Ritchie, "Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from?" 2020. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>. [Accessed: 20-Sep-2024].
- [22] X. Sun, S. Yan, T. Liu, and J. Wu, "High-speed rail development and urban environmental efficiency in China: a city-level examination," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 86, 2020, 102456.
- [23] Ü. Ekici, and T. Feriřadođlu, "Demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modlarıyla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlar," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 19, pp.121-132, 2024.
- [24] E. Kuşkan, M. K. Çodur, and M. Y. Çodur, "Türkiye'deki demiryolu enerji tüketiminin yapay sınırları ile tahmin edilmesi," *Konya Journal of Engineering Sciences*, vol.10, no:1, pp. 72-84, 2022.
- [25] W. T. Hong, G. Clifton, and J. D. Nelson, "Rail transport system vulnerability analysis and policy implementation: past progress and future directions," *Transport Policy*, vol. 128, pp. 299-308, 2022.
- [26] A. Tardivo, A. Carrillo Zanuy, and C. Sánchez Martín, "Covid-19 impact on transport: a paper from the railways' systems research perspective," *Transportation research record*, vol. 2675, no. 5, pp. 367-378, 2021.
- [27] S. Moslem, "A novel parsimonious spherical fuzzy analytic hierarchy process for sustainable urban transport solutions," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 128, 2024, 107447.
- [28] X. Zhao, Y. Ke, J. Zuo, W. Xiong, and P. Wu, "Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019," *Journal of cleaner production*, vol. 256, 2020, 120404.
- [29] N. Ahsan, K. Hewage, F. Razi, S. A. Hussain, and R. Sadiq, "A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives to achieve net zero emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 185, 2023, 113621.
- [30] L. Ezsias, A. Brautigam, S. K. Szurke, S. Szalai, and S. Fischer, "Sustainability in railways—a review," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 107, pp. 7-12, 2023.
- [31] J. Milewicz, D. Mokrzan, and G. M. Szymański, "Environmental impact evaluation as a key element in ensuring sustainable development of rail transport," *Sustainability*, vol. 15 no. 18, 2023, 13754.
- [32] J. D. Sachs, G. Lafortune, and G. Fuller, *The SDGs and the UN Summit of the Future. Sustainable Development Report 2024*. Paris: SDSN, Dublin, 2024.
- [33] OECD, "The International Transport Forum", 2024. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/en/topics/transport.html>. [Accessed: 10-Sep-2024].

Özgeçmiş



Ömer CENGİZ

1984 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliğinde tamamlamıştır. 2011 yılında itibaren Kafkas Üniversitesinde çalışmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları; Lojistik, Tedarik Zinciri Yönetimi ve Ulaştırma Sistemleridir. E-Posta: omercengiz99@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.



Dış Ticarete Demiryolu Taşımacılığının Stratejik Durumu: Türkiye Analizi

Muhammed TURGUT^{*1}, Şule GÜNGÖR²

¹ Tarsus Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Mersin, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Dış Ticaret Bölümü, Mersin, Türkiye

*muhammedturgut@tarsus.edu.tr

(Alınış/Received: 28.04.2024, Kabul/Accepted: 29.07.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Demiryolu taşımacılığı, içerisinde bulundurduğu avantajlar sayesinde dış ticarete önemli bir taşıma türü olmaktadır. Bu açıdan ülkeler dış ticarete taşımacılık faaliyetlerinin gelişebilmesi açısından yürüttükleri yatırım politikalarında hâlihazırda var olan karayolu ağ bağlantısının yanı sıra demiryolu ağ bağlantısı da desteklenmeye yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Türkiye demiryolu bağlantısı bölgesel bazda gelişme göstermiş fakat söz konusu gelişmelerin devamına da açık potansiyel taşımaktadır. Demiryolu bağlantısı ile ülke içindeki ticari faaliyetler ve yolcu taşınması yürütülebildiği gibi dış ticaret kapsamında da fayda sağlanabilmektedir. Türkiye dış ticaretinde diğer taşımacılık türlerine alternatif olması, maliyet ve elleçleme gibi avantajlar yaratması nedeniyle demiryolu taşımacılığı dış ticareti besleme noktasında önem taşımaktadır. Bu husustan yola çıkarak bu çalışmada Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının mevcut durumu incelenmiş ve stratejik önemi ele alınmıştır. Çalışmada mevcut raporlar, istatistiki bilgiler, uzman görüşleri dikkate alınarak SWOT analizi tekniği kullanılmıştır. Araştırma sonucunda düşük maliyet, mevcut ağ bağlantısı, Türkiye iş gücü potansiyeli ve üretim gücü gibi hususlar güçlü yön olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra liberalleşen taşımacılık operasyonları, modern olmayan ağlar, yüksek altyapı maliyeti ve eğitim kurumlarındaki yetersiz eğitim zayıf yön olarak tespit edilmiştir. Jeopolitik konum, demiryolu projeleri ve dış ticaret iş hacmindeki istikrarlı artış fırsat; politik istikrarsızlık, denizyolu ve karayolunun dış ticaret taşımalarında aktif rol alması ve demiryolunun işletim maliyetleri tehdit olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Dış Ticaret, SWOT Analizi, Demiryolu Taşımacılığı

Strategic Situation of Railway Transportation in Foreign Trade: Türkiye Analysis

Abstract: Railway transportation is an important type of transportation in foreign trade thanks to its advantages. In this respect, countries work to support the railway network connection as well as the existing road network connection in their investment policies in order to develop transportation activities in foreign trade. Türkiye's railway connection has developed on a regional basis, but it also has the potential for the continuation of these developments. With the railway connection, commercial activities and passenger transportation within the country can be carried out, as well as benefits within the scope of foreign trade. Railway transportation is important in terms of feeding foreign trade as it is an alternative to other types of transportation in Turkey's foreign trade and creates advantages such as cost and handling. Based on this issue, in this study, the current situation of railway transportation in Turkey's foreign trade is examined and its strategic importance is discussed. SWOT analysis technique was used in the study, taking into account existing reports, statistical information and expert opinions. As a result of the research, issues such as low cost, existing network connection, Turkey's workforce potential and production power were determined as strengths. In addition, liberalized transportation operations, non-modern networks, high infrastructure costs and inadequate education in educational institutions have been identified as weaknesses. Geopolitical location, railway projects and the steady increase in foreign trade business volume provide opportunities; Political instability, the active role of maritime and road transport in foreign trade transportation, and the operating costs of the railway have been identified as threats.

Keywords: Railway, Foreign Trade, SWOT Analysis, Railway Transportation

Atıf için/Cite as: M. Turgut, Ş. Güngör, "Dış ticarete demiryolu taşımacılığının stratejik durumu: Türkiye analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 124-141, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1474807

1. Giriş

Lojistik ve taşımacılık faaliyetleri uluslararası ticaretin mihenk taşlarından biridir. Taşımacılık faaliyetinin etkin yönetilmesi uluslararası ticaret süreçlerine doğrudan katkı sunmakta ve performansı iyileştirmektedir. Bu pozitif etki ülke ekonomilerinin büyümesine de olumlu yansımaktadır. Ülke pazarının genişlemesini sağlayan uluslararası ticaret ile iç talepte artış yaşanmakta, iş gücüne yönelik istihdamın teşviki sağlanabilmekte ve araştırma-geliştirme kapsamında yeniliklerin önü açılabilir. Bu açıdan ekonominin büyümesinin yanı sıra ülke refahına da katkı sağlanmaktadır [1].

Dış ticaret sayesinde ülke içindeki tüketimi karşılamaya yönelik mal ve hizmet ticareti yürütülürken aynı zamanda ülke sınırları dışına da ilgili ürünlerin transferi mümkün hale gelmektedir. Bu durum da gerek ülke gerekse de işletmelerin ekonomi ve verimlilikleri üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Diğer taraftan ticaretin serbestleşmesine yönelik ülke politikalarının genişletilmesi veya gerekli noktalarda esnetilmesi, iç üretimi besleyici tedbirleri alırken ihracatı artırmaya yönelik uygulamaları belirlemeye dair faaliyetler göstermek dış ticaret kapsamında atılan önemli adımlardır.

Genel itibarıyla ithalat ve ihracat kapsamında ortaya koyulan iş hacimleri ile belirlenen dış ticaret faaliyetleri birçok husustan etkilendiği gibi ülke ve sektörler kapsamında da birçok alanı etkileme gücüne sahiptir. Ulusal paranın değerlendirme biçiminden istihdam oranına, global ölçekte ülkenin kendine bulduğu yere kadar birçok hususla etkileşim yaratan dış ticaret temelde taşıma ihtiyacı duyulan yükün taşıma biçimi ile şekillenmekte; aksayan bir durumda sürecin geriye atması, sorunsuz ilerleyen bir süreçle de sıçrayışın yaşanması gibi durumlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sebeple ülkelerin dış ticareti geliştirmeye yönelik ekonomik ölçekte attığı adımlar, korumacı veya teşvik edici faaliyetlerin yanı sıra dış ticaretin sürekliliğini sağlamak adına taşıma hususunda geliştirdiği politikalar ve bu politikaların hayata geçirilmesi de oldukça önemlidir. Taşıma noktasında maliyetin dezavantaj yaratması, taşıma sürecinin duraksamalarla yürütülmeye çalışılması veya yatırımın tamamen çekilmesi gibi olumsuzluklar dış ticareti zaman için dönüşü mümkün olmayan seviyelerde etkileme potansiyeline sahiptir. Bu sebeple yoğun bir şekilde ithalat ve ihracat faaliyetleri yürüten her ülkenin söz konusu dış ticaret faaliyetlerini besleyecek atılımları da taşımacılık kapsamında ortaya koyması gerekmektedir. Demiryolu, denizyolu, havayolu, karayolu ve boru hattına yönelik yapılan geliştirmeye veya iyileştirmeye yönelik adımlar yüksek fayda sağlarken geri planda kalan değerlendirmeler de telafi edilemeyecek hasarlara sebep olabilmektedir.

Dış ticaretin en önemli taşıma modu dış ticaretteki taşıma payları içerisinde payı çok yüksek olan denizyolu taşımacılığıdır. Türkiye dış ticaret verilerine bakıldığında 2022 yılında denizyolu ile %92 oranında ithalat, %80 oranında ihracat yapılmıştır [2]. Tek bir taşıma türünün ülke dış ticaretinde bu kadar etkin olması birtakım problemler doğurmaktadır. Bunun en güzel örneklerini COVID dönemi yaşanan konteyner krizi ve hâlâ problemler devam eden Süveyş Kanalı'nın problemleri oluşturmaktadır. Bu açıdan bakıldığında dış ticarete pazar çeşitlendirmesi ülkelerin dış ticaret rakamlarına ne kadar olumlu yansırıyorsa taşıma türlerinin de çeşitlendirilmesi gerekmektedir.

Denizyolu taşımacılığının dış ticaret için taşınan yük miktarı ve maliyet gibi avantajlar yaratmasına rağmen tüm yük transferleri denizyolu taşımasına entegre olacak şekilde organize edilememektedir. Taşınan yükün cinsi, maddi değeri, taşıma zamanı ya da taşıma sıklığı önemli kriterler oluştururken temelde taşınan yükün güzergahı ve varış noktası da taşıma modları kapsamında sınırlılık oluşturmaktadır. Bu sınırlılıklar kapsamında maliyet avantajı yaratırken dış ticaret kapsamında hedeflenen ölçütlere uygun taşıma miktarı ile taşıma yapmak denizyolu yerine demiryolu taşımasını da cazip hale getirebilmektedir. Bu açıdan ülkelerin demiryolu taşımasını göz ardı etmelerinin mümkün olamayacağı, hatta zaman içinde demiryolu taşımasının dış ticareti

beslediği ve kolaylaştırdığı dikkat çekmiştir. Bununla beraber geçmişten gelen demiryolu yatırımlarının beslenmesi, yenilenmesi veya geliştirilmesi de önem kazanmaktadır. Buradan yola çıkarak denizyolu taşımasının yüksek miktarda yük taşıması genel kabul şeklinde değerlendirilse de demiryoluna yönelik atılacak adımların denizyolu taşıması içinde yük taşıması hususunda pay alacağı da görülen bir gerçektir. Bu amaçla demiryolu taşımasının tarihsel süreç içinde incelenmesi, avantaj ve dezavantaj olarak belirlenebilecek noktaların ortaya koyulması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada Türkiye'nin dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının mevcut durumu ele alınmaktadır. Literatürde lojistik faaliyetlerle dış ticaret ilişkisi veya diğer taşıma türleri ile dış ticaret değerlendirmesine yönelik benzer çalışmaların [3, 4, 5, 6] yapılmış olmasına rağmen demiryolu taşımacılığının dış ticaret üzerine etkisini inceleyen ve stratejik durumunu analiz eden herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu kapsamda çalışmanın özgün yanını ortaya koymaktadır.

Çalışmanın birinci kısmında dış ticaret ve demiryolu taşımacılığıyla ilgili kavramsal çerçeve ele alınmış, istatistiki bilgilerle detaylandırılmıştır. İkinci kısımda ise Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının mevcut durumunu raporlar ve istatistiki bilgilerle bir projeksiyon sunacak şekilde ele alınmıştır. Araştırmanın üçüncü ve son kısmında ise SWOT analizi yöntemiyle belirlenen sorulara cevaplar aranmış ve çalışma tamamlanmıştır.

2. Dış Ticaret ve Demiryolu Taşımacılığına Dair Kavramsal Çerçeve

Ülkelerin ekonomik büyümelerinde, kalkınma ve refah düzeylerinde doğrudan etkili olan dış ticaret uluslararası ekonomik ilişkilerin temelindedir. Dış ticaret, ülke sınırlarını aşan potansiyelde mal ve hizmet ticareti şeklinde yürütülen ithalat ve ihracat faaliyetlerini içermektedir [7]. Ülke ihtiyaçlarının karşılanamadığı durumlarda veya üretimin maliyet olarak avantaj yaratmadığı, uzmanlaşmadığı mal ve hizmetler kapsamında ülke sınırları dışına açılarak ülke arzını karşılamaya yönelik mal ve hizmetin elde edilmesiyle ekonomi adına verimliliğin artırılması mümkündür.

Ülke pazarının genişlemesini sağlayan dış ticaret ile iç talepte artış yaşanmakta, iş gücüne yönelik istihdamın teşviki sağlanabilmekte ve araştırma-geliştirme kapsamında yeniliklerin önü açılabilir. Bu açıdan ekonominin büyümesinin yanı sıra ülke refahına da katkı sağlanmaktadır [1]. Mal veya hizmet ortaya koyan işletmelerin rekabet alanlarının genişlemesinin etkisiyle yerel işletmelerin verimliliği artmaktadır. Bununla beraber dış ticaret politikaları kapsamında ticaret engellerini kaldırmak, korumacı önlemler uygulamak ve ihracatı teşvik etmek gibi faaliyetler dış ticaret üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır. Rekabeti korumak, ülke çıkarımı gözetmek ve uluslararası ticaret dengesini sağlamak dış ticaret politikaları ile mümkündür. Uluslararası ekonomik ilişkilerin stratejik bir bileşeni olan dış ticaret bir ülkenin ekonomik yönden kalkınması, refahının sağlanması ve büyümesi noktasında doğrudan etkiye sahiptir [8].

Ülkelerin dış ticaret faaliyetleri ithalat ve ihracat potansiyelleri ile ölçülmektedir. İhracat, ülke mal ve hizmetlerinin yabancı ülkelere belirlenmiş bir bedel karşılığında satılması işlemidir. Ülkelerin sahip oldukları endüstriyel altyapı etkisinde üretilen ürün, doğal kaynak ve iş gücü potansiyeli ihracatı etkileyen unsurlardır [9]. Döviz kuru, ticaret politikaları, devlet teşvikleri, uluslararası rekabet gücü, küresel ekonomik yapıda ulusal ülkenin edindiği yer ve teknolojik gelişmeler gibi faktörlerle ihracat, bir ülkenin ekonomik performansını doğrudan etkilemektedir [10]. İhracata ağırlık verilmesinin neticesinde ekonomik büyüme olumlu yönde ivme kazanırken uluslararası ticaret dengesinin sağlanması, istihdam artışı ve ülke ekonomisinin uluslararası pazarda rekabetçi konuma ulaşması da mümkün hale gelmektedir.

Ülkelerin deniz aşırı kapsamda diğer bir faaliyeti olan ithalat, ülke sınırları dışından mal ve hizmetin satın alınarak ulusal ekonomiye dâhil edilmesi olarak ifade edilmektedir. Uluslararası pazarlara açılmış bir ülkenin mal ve hizmet satın almasıyla ulusal talebin karşılanması hedeflenmekte, üretim süreçleri desteklenmekte, tüketici ihtiyaçları giderilmektedir [11]. İthalat faaliyetleri ülke dışı ticaret politikaları, ülkeler arasında yapılan ticaret anlaşmaları ve piyasa koşulları gibi hususlardan etkilenmektedir. Döviz talebinin yaratılarak dış ticaret dengesinde üzerinde fark yaratılması ile ülke ekonomisi üzerinde etki söz konusu olmaktadır. Rekabet ve ülke tüketici fiyatları üzerinde etkili olan ithalat tüketiciye kalite ve çeşitlilik noktasında fayda sağlamaktadır [12]. Olumlu tüm etkilerinin yanı sıra ulusal sanayiye ve işletmeleri nihai ürün temininde olumsuz yönde etkileme potansiyeline de sahiptir.

Türkiye ölçeğinde bakıldığında ithalat ve ihracat kapsamında ülke sınırlarındaki işletmelerin ortaya koydukları potansiyel ve devlet politikaları ile ticari faaliyetler uluslararası kapsamda yoğun bir şekilde yürütülmektedir. Türkiye'nin son on yıldaki ihracat ve ithalat rakamları ile değişim oranları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yıllara göre Türkiye dış ticareti [13]

Yıllar	İhracat		İthalat	
	Değer (Bin ABD Doları)	Değişim (%)	Değer (Bin ABD Doları)	Değişim (%)
2013	161.480.915	-	260.822.803	-
2014	166.504.862	3,11	251.142.429	-3,71
2015	150.982.114	-9,32	213.619.211	-14,94
2016	149.246.999	-1,15	202.189.242	-5,35
2017	164.494.619	10,22	238.715.128	18,07
2018	177.168.756	7,70	231.152.483	-3,17
2019	180.832.722	2,07	210.345.203	-9,00
2020	169.637.755	-6,19	219.516.807	4,36
2021	225.214.458	32,76	271.425.553	23,65
2022	254.169.748	12,86	363.710.575	34,00
2023	255.538.193	0,54	361.766.457	-0,53

Tablo 1'e bakıldığında yıllar içinde gerek ihracat gerekse de ithalat rakamlarında değişiklikler görülmektedir. Bu kapsamda ihracat değerleri 2017 yılı itibarıyla yüksek değerler göstermektedir. 2020 yılında var olan azalış ise küresel ölçekte etkili olan Covid-19 salgınının tüm dünya üzerinde yarattığı etkiyle genel azalıştan ileri gelmektedir. Aynı yılda %4,36 oranında artış gösteren ithalat rakamları temel yükselişi 2021 ve 2022 yıllarında göstermektedir. Nitekim ithalat rakamlarına bakıldığında yıllar içinde istikrarın düşük olduğu bir seyrin söz konusu olduğu görülmektedir.

Dış ticaretin yürütülmesi taşımacılık modları açısından demiryolu, denizyolu, havayolu, karayolu ve boru hattı şeklinde sıralanmaktadır. Taşımacılık modları ele alındığında her birinin birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajlara bağlı olarak kullanım oranları da farklılık göstermektedir. Ülkelerde altyapı imkânına bağlı kısıtlamalar veya taşıması yapılan yolcu/yük kriterleri taşımacılık modu seçiminde tercih noktasında ilk aşamada dikkate alınan hususlardır. Bu açıdan her bir taşımacılık modu ayrı parametrelere bağlı olarak ele alınmakta, ülkelerdeki kullanım oranının artması, duraksaması veya azalması gibi durumlar önem kazanmaktadır.

19. yüzyıldan itibaren taşımacılık kapsamında kullanılmaya başlayan demiryolu taşımacılığı mal ve yolcunun kitlesel taşınmasında dünya genelinde gelişme göstermiş ve gelişme potansiyelinin

yüksek olduğu bir taşıma türüdür. Yük taşımada uzun mesafeli taşımada maliyet avantajı yaratırken; yolcu taşımada kullanılan teknolojiye bağlı olarak uzun mesafelerin katedilme sürelerini azaltabilecek imkâna sahiptir. Bu açıdan demiryolu taşımada sağladığı birtakım avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Avantajlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır [14, 15, 16]:

- Taşımada enerji tüketimi açısından yolcu veya taşınan yükün birim cinsinden değeri bakımından düşük enerji tüketimi sağlaması önemsenen bir husustur.
- Demiryolu taşımada yüksek taşıma kapasitesi sağlanmakta; sıralı vagonlar ile tek seferde yüksek tonaja sahip yüklerin transferi mümkün olmaktadır. Bu noktada taşımada verimli bir süreç sağlanmaktadır.
- Karbon salınımı noktasında diğer taşıma türleri ile kıyaslandığında demiryolu taşımacılığı daha düşük seviyelerde karbon salınımı sağladığı için doğa dostu bir taşıma türü olarak ifade edilmektedir.
- Coğrafi olaylardan kolaylıkla etkilenmeyen demiryolu taşımacılığı iklim şartlarına karşı dayanıklı olmakla beraber; trafik akışında da sıkışıklık ve bu sıkışıklık ihtimaline bağlı olarak gecikme gibi olumsuzlukların yaşanmasına karşı üstünlüğe sahiptir.
- Yolcu taşımada kullanımı görülen hızlı trenler ile uzak mesafeler yüksek hızla aşılabilmektedir. Yüksek hızlı trenlerin genel kent trafiğinden bağımsız olması da ulaşım sürecinde aksamanın önüne geçmektedir.
- Yük taşımada düşük maliyet sağlaması işletmeler tarafından uygun destinasyonda demiryolu taşımada tercih edilebilir hale getirmektedir.
- Demiryolu ağının tasarlanması ve inşasına bağlı olarak güzergâh planlamaları ve zaman çizelgelerine bağlı olmak önemlidir. Bu açıdan yük ve yolcu taşımada taşıma süresinin başlayıp biteceği zaman dilimi net olarak bilinebilmektedir.

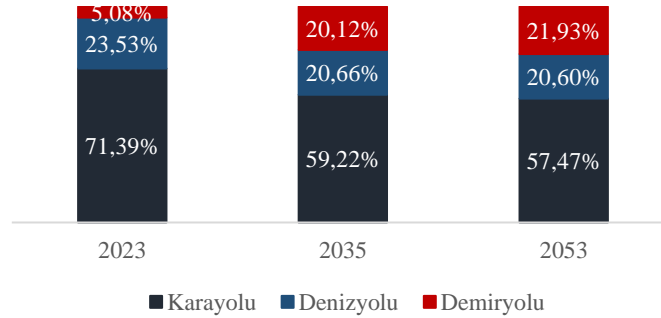
Diğer taşıma türlerinde olduğu gibi demiryolu taşımacılığında da avantajların yanı sıra birtakım dezavantajlar da bulunmaktadır. Dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [17, 18, 19]:

- İnşa sürecinde tasarlanmış ve hayata geçmiş olan demiryolu ağları esneklik noktasında sınırlılığa sahiptir. Bu da taşınan yükün belli bir noktadan sonra diğer taşıma türleri ile temas etmesini gerekliliğini doğurmaktadır.
- Yeni ağ inşasının yürütülmesi ve yatırımının ortaya konulması maliyet yaratmaktadır. Bu da ülke politikalarında demiryoluna yönelik altyapı planlamalarının ön plana çıkamamasına sebep olmaktadır.
- Demiryolu altyapısı ile doğal yaşamı bozucu etkilerin yaratılma ihtimali söz konusudur.
- Genellikle nüfusun yoğun olduğu kentlerde yolcu taşımada fayda sağlayan demiryolu taşımacılığı artan nüfusu karşılamakta yetersiz kalma potansiyeli taşımaktadır.
- Demiryolu ağı geliştirilmesi noktasında her coğrafi alanın aynı seviyede elverişlilik sağlamaması güçlük yaratmaktadır.
- Demiryolu ağlarının varış noktası olan istasyonların belirli yerlere konumlandırılması bu bölgelere yük ve yolcu erişimini güç hale getirebilmektedir.
- Demiryolu altyapısı, araçları ve ekipmanlarının bakımı maliyet yaratan bir unsurdur.

Demiryolu ile taşımacılık faaliyetinde yolcu taşımada ağırlıklı olarak gelişmiş ülkelerde ve yine gelişmiş kentlerde söz konusudur. Çünkü yolcu taşımada kullanılmak üzere geliştirilmiş olan yüksek hızlı trenler nüfus yoğunluğuna bağlı olarak yatırım noktasında desteklenmiş ve bu doğrultuda da ülkeler çalışmalarını yürütmüşlerdir. Benzer husus Türkiye için de geçerlidir. Türkiye’de yolcu taşımada demiryolu taşımacılığı ile sürdürülmesi belli bölgelerle sınırlı kalmıştır. Fakat demiryolu ile yük taşımada bakıldığında ülkenin coğrafi bölgelerini çevreleyecek şekilde ağ bağlantısına sahip olduğunu altyapı faaliyetlerinde dikkat çekmektedir. Yük taşımada yanı sıra taşınan yükün cinsi de demiryolu taşımacılığında kendi içinde özel bir grup oluşturmaktadır. Her türlü yükün ve her türde ambalajlamaya sahip yükün elverişli ve

hasarsız bir şekilde taşımalarının yapılamadığı demiryolu taşımacılığında taşınan yükün cinsi büyük öneme sahiptir. Taşıma süresi, yükün çıkış ve varış noktası, yükün cinsi ve demiryolu taşımada karşılaşılan titreşim etkisi gibi durumlar ayırıcı hususlardır. Yük cinslerine bakıldığında demiryolu taşınmasında elverişlilik sağlayan yüklerin taşıyıcılar tarafından tercih edildiği görülmektedir [20]. Özellikle cevher ve metal artık, üretilmiş mineral ve inşaat malzemesi, araç makine ve katı mineral yakıt sınıflamasına tabi yüklerin taşımaya ağırlık verildiği görülmektedir. İlgili yükler elleçleme açısından sorunsuz elleçlemeye izin verecek yükler olmakla beraber taşıma süresi olarak da bozulabilir bir özellik göstermeyecek yüklerdir. Ayrıca yüklerin maddi değerleri de demiryolu taşımaya ile taşımacılığın yürütülmesinde avantaj sağlayacak potansiyeldedir.

Taşıma türleri olarak sıralanan demiryolu taşımacılığı, denizyolu taşımacılığı, havayolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığı ve boru hattı taşımacılığına bakıldığında tamamı aynı verimle kullanılmamaktadır. Taşıma türleri yükün taşındığı mesafe, yük türü, taşınan alana dair coğrafi konum, maliyet ve yükün maddi değeri gibi kriterlere göre taşıma türü seçimi de farklılık gösterebilmektedir. Türkiye’de yük taşımada ağırlıklı olarak demiryolu, denizyolu ve karayolu taşımacılığı kullanılmaktadır. İlgili veriler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Taşıma modlarının yük taşımacılığında tahmini oranları [21]

Tablo 1 incelendiğinde Türkiye için ele alınan taşımacılık türlerinde demiryolu, denizyolu ve karayolu dağılımında 2023 yük taşıma hacimlerine bakıldığında demiryolu taşımacılığı %5,08 gibi bir orana sahip olduğu görülmektedir. Fakat yürütülmesi planlanan ve bir kısmı projelendirilen çalışmalar doğrultusunda 2035 yılında demiryolu taşımacılığının %20,12 seviyesine ulaştırılmasıyla %457,12 oranında bir artış tasarlanmaktadır. Benzer şekilde 2053 yılı öngörülmesi değerlendirildiğinde ise 2035 yılına kıyasla demiryolu taşımacılığında söz konusu artış %46,39 şeklinde olacaktır. Bu kapsamda yürütülen demiryolu altyapı faaliyetleri yolcu taşımalarının yanı sıra yük taşımacılığını da yük taşıyıcıları etkileyecek şekilde olacaktır. Tahminleme rakamları demiryolu taşımacılığının yük taşımadaki payının artması neticesinde denizyolu ve karayolu taşımacılığı paylarının da etkileneceğini; ticari planlamalara bağlı olarak ilgili taşıma türleri ile taşınan yük miktarının da artış göstermesine rağmen demiryolu taşımacılığının bu taşımalarından pay alacağını göstermektedir.

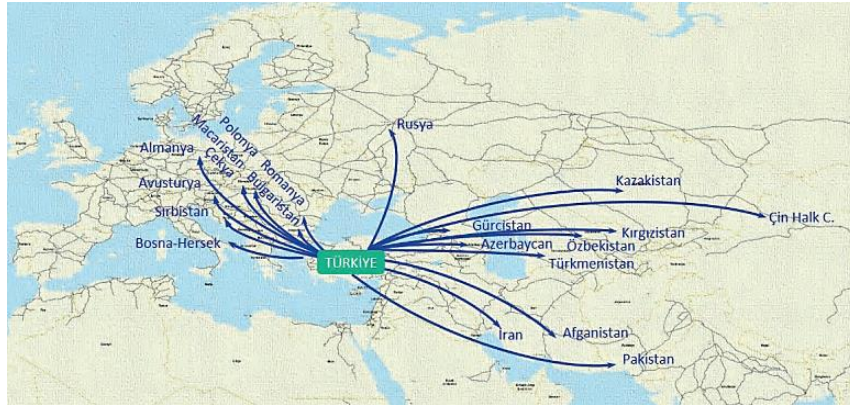
Türkiye’nin dış ticareti ve demiryolu taşımacılığı ele alındığında yıllar içinde var olan dış ticaret hacimlerinin diğer taşımacılık türlerinde olduğu gibi demiryolu taşımacılığıyla da beslendiği görülmektedir. Denizyolu ile yüksek tonajlarda yük taşımaya yapılırken her noktadan bu taşıma modu ile taşımacılık başlatılmadığı gibi her noktadan da denizyolu taşımaya ile taşımacılık süreci tamamlanamamaktadır. Diğer yandan karayolu taşımaya ile geniş ağ yapısına dayandırılarak her noktadan taşımacılık süreci başlatılıp her noktada bitirelebilmektedir fakat karayolu taşımaya ile taşınan yükün tonajı, sevkiyat sıklığı, yüksekliği ve genişliği gibi kısıtlamalarla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu durumlar da doğrudan maliyet üzerinde bir dezavantaj oluşturmaktadır. Demiryolu taşımaya yürütülen yatırımlara bağlı olarak yük taşımada tonaj fazlalığı veya

sevkiyat sıklığı fark etmeksizin avantaj yaratırken, doğru altyapının geliştirilmesi ile başka bir taşımacılık moduna bağlı kalmadan taşımanın başlatılıp sonlandırılmasını da mümkün hale getirebilmektedir. Bununla beraber çevreye verdiği etkinin de düşük seviyede olması birçok açıdan demiryolu taşımasını ele alınması gereken bir taşıma modu olarak değerlendirmeyi sağlamaktadır.

Dış ticaretin değerlendirilmesi neticesinde demiryolu taşımasının da yıllar içinde ne düzeyde değişim gösterdiği ve nihai zamanda sahip olduğu boyutu bilmek önem kazanmıştır. Demiryolu taşımasının geçmişten güncel zamana geçirdiği dönüşüm, demiryolunun kamu idareleri noktasında taşıdığı önem ve sahip olduğu alan demiryolu ağını geliştirmeden etkili olacağı gibi dış ticareti de doğrudan etkileyebilecek niteliği barındırmaktadır. Bu çalışma tüm hususlar doğrultusunda Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımasının sahip olduğu yere odaklanırken demiryolu taşımasını daha iyi hale getirebilecek hususların neler olduğuna değinmeyi amaçlamıştır.

3. Türkiye Dış Ticaretinde Demiryolu Taşımacılığının Yeri

Türkiye dış ticareti dünya genelinde ağırlık verildiği gibi denizyolu taşımacılığı üzerinde yoğunluk göstermektedir. Fakat demiryolu ve karayolu taşımacılığı da denizyolu taşımacılığını takip etmekte ve denizyolu taşımacılığının ulaşamadığı noktalarda taşıma sürecini tamamlama görevini yürütmektedir. Demiryolu taşımacılığı ile ağ bağlantısının olduğu ülkelere yoğun bir şekilde yük taşıması yürütülmektedir. Temel kriter ağ bağlantısının var olması ve arz/talebin sağlanabilmesidir. Türkiye'nin demiryolu ile dış ticarete yük taşıma ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Türkiye'nin demiryolu ile dış ticarete yük taşıma coğrafyası [20]

Yük taşıma coğrafyasına paralellik gösterecek şekilde Türkiye'nin dış ticaretinde 2022 yılında ihracat kapsamında ve değer bazında ilk sıradaki ülke Almanya'dır. Ağırlık bazında bakıldığında ise ihracatta ilk sırada Bulgaristan yer almaktadır. Konu ile ilgili olarak demiryolu taşımacılığında ihracat kapsamındaki ilk beş ülke Tablo 2'de sıralanmıştır.

Tablo 2. İhracat kapsamında demiryolu taşımasında ülkeler sıralaması [2]

Sıralama	Değer	Ağırlık
1	Almanya	Bulgaristan
2	Hollanda	İran
3	Çek Cumhuriyeti	Sırbistan
4	Polonya	Almanya
5	Avusturya	Avusturya

İthalat rejimine tabi olarak yapılan taşımalarda ağırlık ve değer kapsamında ilk olarak Bulgaristan yer almaktadır. Ardından Almanya yer alırken ihracatta yer alan ülkelerle farklılık gösterecek şekilde Kazakistan değer ve ağırlık kapsamında ilk beşte dikkat çekmektedir. İran ve Bulgaristan'da blok tren uygulamasının söz konusu olması ilgili ülkeleri ithalat ve ihracatta ilk sıralara taşıyan bir faaliyettir. Tablo 3'te ithalat kapsamında demiryolu taşımasında ülke sıralamasına yer verilmiştir.

Tablo 3. İthalat kapsamında demiryolu taşımasında ülkeler sıralaması [2]

Sıralama	Değer	Ağırlık
1	Bulgaristan	Bulgaristan
2	Almanya	İran
3	Polonya	Almanya
4	Çek Cumhuriyeti	Avusturya
5	Kazakistan	Kazakistan

Türkiye dış ticaretinde taşımacılık türlerinin tamamı ulaşılabilen her destinasyona yük taşımasında kullanılmaktadır. Bu şekilde de ihracat ile ülke sermayesine yönelik olumlu etki sağlanmaktadır. Demiryolu taşımacılığının da ihracat rakamları içinde payını gösteren Türkiye ihracatında kullanılan taşıma türlerine göre ABD Doları cinsinden taşıma türlerinin payları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Taşıma türlerine göre Türkiye ihracat rakamları (bin ABD doları) [13]

Yıl	Denizyolu	Demiryolu	Karayolu	Havayolu	Diğer	Toplam
2016	80.139.270	673.816	49.537.436	17.908.782	987.696	149.246.999
2017	93.378.625	699.915	50.988.408	17.217.240	2.210.432	164.494.619
2018	108.802.681	753.544	52.222.468	14.127.905	1.262.157	177.168.756
2019	109.114.264	971.021	54.461.860	14.849.231	1.436.347	180.832.722
2020	100.907.927	1.287.765	53.127.588	12.732.561	1.581.914	169.637.755
2021	133.714.269	1.648.442	68.749.376	18.735.586	2.366.785	225.214.458
2022	150.294.432	2.457.286	78.837.775	20.687.774	1.892.481	254.169.748
2023	143.226.221	1.960.107	83.132.697	25.508.659	1.710.510	255.538.193

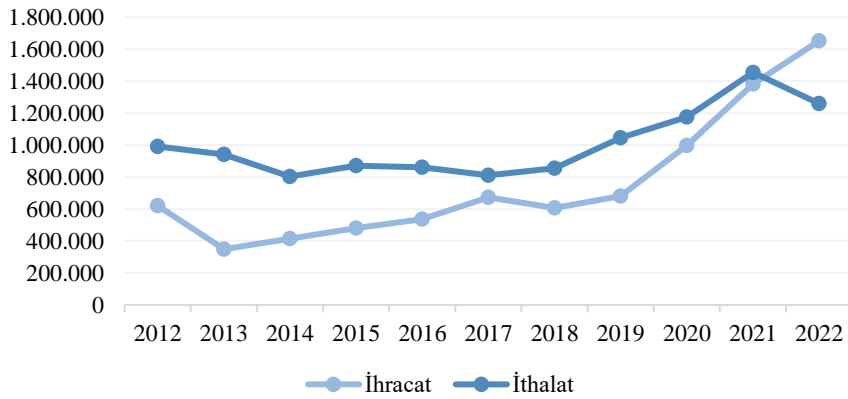
Dış ticarete taşıma türlerinin ağırlık bazında taşıdıkları yük miktarına bakıldığında Türkiye'nin ithalat ve ihracat rakamları ile doğru orantı kurulacak şekilde ilk aşamada denizyolu taşımacılığı dikkat çekmektedir. Takip eden tür olarak karayolu taşımacılığı yer almakta havayolu taşımacılığı ve demiryolu taşımacılığı da yıllar içinde sahip oldukları payı artırma eğilimi göstermişlerdir. Özellikle demiryolu ulaşabildiği ülkeler ölçeği ve taşıyabildiği yük cinslerine bağlı olarak yıllar içinde yüksek rakamlara ulaşma gayretindedir. Bu noktada demiryolu yatırımlarının artırılması ve bağlantı kurulması planlanan ülkelerle iş birliğine gidilmesi doğrudan fayda sağlayacaktır. Dış ticarete taşıma türlerinin ağırlık bazında payları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Dış ticarete taşıma türlerinin ağırlık bazında payları (%) [2]

Yıl	Karayolu		Havayolu		Denizyolu		Demiryolu	
	İthalat	İhracat	İthalat	İhracat	İthalat	İhracat	İthalat	İhracat
2012	3,98	22,54	0,06	0,99	95,38	75,83	0,59	0,63
2013	4,11	24,25	0,07	1,03	95,27	74,38	0,55	0,35

2014	3,89	24,04	0,07	1,12	95,60	74,41	0,45	0,42
2015	3,73	24,68	0,07	1,15	95,76	73,69	0,45	0,49
2016	3,72	24,49	0,06	0,81	95,78	74,19	0,43	0,52
2017	4,00	22,12	0,06	0,81	95,56	76,49	0,37	0,58
2018	4,05	20,44	0,05	0,83	95,48	78,25	0,42	0,48
2019	4,34	17,59	0,06	0,87	95,12	81,09	0,49	0,45
2020	4,33	16,79	0,05	0,39	95,08	82,19	0,54	0,64
2021	5,36	17,78	0,05	0,49	93,94	80,96	0,64	0,77
2022	7,10	18,28	0,06	0,70	92,22	80,08	0,62	0,94

Yıllar içinde demiryolu ile dış ticaret kapsamında taşınan yükün ağırlığına bakıldığında taşınan yük miktarının artması ile ilişkili şekilde taşınan yükün ağırlığı da artış göstermektedir. Gelecek yıllarda gerek demiryolu kullanımının artması gerekse de yürütülen yatırım faaliyetleri ile söz konusu artışın yükselen bir seyirle devam etmesi beklenmektedir. Hazine ve Maliye Bakanlığı tarafından da benzer şekilde karbon ayak izini düşürmek amacıyla çıkılan yolda demiryolu ağ yapısının geliştirilmesi ve yüksek hızlı tren inşası öncelikli plan olarak ifade edilmektedir. Bununla beraber endüstriyel bölgelerin limanlara bağlanması da temel projeler içinde yer almaktadır. Dış Ticarete ağırlık bazında demiryolu inşasını ortaya koyan veri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dış ticarete ağırlık bazında demiryolu taşımacılığı [2]

Türkiye’de demiryolu bağlantısı sınır kapılarına konumlandırıldığı gibi denizyolu taşımacılığını desteklemek amacıyla deniz limanlarının içine de ağ bağlantısının sağlanmasıyla limanlardan yük çıkarma veya limana yük taşıma gibi bir fayda da sağlamaktadır. Bu şekilde denizyolu ile ihrac edilecek yük tamamen karayoluna bağlı kalmamakta; demiryolu ile de limana aktarımı gerçekleşmektedir. Benzer şekilde denizyolu üzerinden ithal edilen yüklerin liman sahasından çıkışı karayolu üzerinden taşımayı mecbur hale getirmemekte; demiryolu da bağlantının olduğu noktalara taşınmanın yapılması açısından yoğun şekilde tercih edilmektedir. Bu şekilde yükün liman sahasına veya liman sahasından aktarımı daha düşük maliyetlerle yapılmaktadır. Zaman yönünden dezavantaj yaratan bekleme gibi durumların ortaya çıkabilme ihtimaline karşın; demiryolunun limanlar üzerinden aktarımı büyük partili taşımalarda maliyet yönünden yarattığı avantajla bekleme süresini göz ardı edilebilir bir seviyeye getirmektedir.

Sınır kapılarından demiryolu ihracatını sağlayan kapılar BTK (Canbaz/Ahılkelek), İran (Kapıköy) ve Avrupa (Kapıkule) şeklindedir. Demiryolu bağlantısının liman sahaslarının içine erişimin sağlandığı limanlar ise Aliğa Limanları, Assan İskelesi, Çatalağzı Eren, Çelebi Port (Bandırma), DP World, Ekinciler İskelesi, Evyap Port Gübretaş İskelesi, İsdemir İskelesi, Limak Port, MIP

(Mersin/Tırmıl), NemPort, Safi Port, Samsun Port, Samsun Yeşilyurt, TCDD Alsancak Limanı, Tekirdağ Asya Port, Zonguldak TTK Limanı ve MMK-Atakaş Limanlarıdır. 2022 yılı rakamlarına bakıldığında demiryolu ile yapılan ihracat taşımalarında sınır kapılarından taşınan yük miktarı 2.182.000 ton; ihracat kapsamında liman sahalarından taşınan yük miktarı ise 5.832.000 ton olarak not edilmiştir [20].

Türkiye dış ticaretinde etkisi diğer taşımacılık modlarının birçoğundan yüksek düzeyde olan demiryolu taşımacılığı altyapısı, yukarıda verilen detaylarda da görüldüğü üzere geliştirilebilir bir alana sahiptir. Devlet politikaları ve özel sektör iş birlikleri neticesinde yürütülmüş olan ve gelecekte de yürütülebilecek olan bu faaliyet ülke dış ticareti için büyük bir öneme sahiptir. Demiryolu bağlantısının ülkenin ticaret noktalarını besleyecek şekilde geliştirilmesi, taşımacılık faaliyetlerinin demiryolu ile yürütülmesinin teşvik edilmesi ve yaygınlaştırılması denizyoluna ihtiyaç duymadan ağırlıklı olarak da karayolu taşımalarını bertaraf ederek dış ticaret üzerinde olumlu etki yaratacak potansiyelindedir. Diğer taşıma modlarına göre maliyet, yüksek tonajlı yük transferi ya da taşıma sıklığı gibi birtakım avantajları barındıran demiryolu taşımacılığı doğru şekilde desteklendiğinde yük taşımada dikkate değer etkiler yaratabilecektir. Ağırlıklı olarak yolcu taşımada gelişmiş kentler kapsamında yatırımlara odaklanılan demiryolu taşıması yük transferi için de birçok olumlu etkiyi barındırmaktadır. Bu açıdan demiryolu taşımalarının güçlü ve zayıf yönlerini belirlerken geliştirilmeye açık alanları üzerine yoğunlaşmak fayda sağlayabilecek hususlardır. Bu çalışma da bu doğrultuda Türkiye'nin dış ticareti içinde demiryolunun payını ele alırken demiryolu taşımalarının Türkiye boyutunda değerlendirmesini yapmayı amaçlamıştır.

4. Literatür Taraması

Demiryolu taşımacılığını konu alan çalışmalara bakıldığında diğer taşımacılık türlerini ele alan çalışma sayısı noktasında geri planda kaldığı görülmektedir. Ancak demiryolu taşımacılığının bir ülke ekonomisine doğrudan katkı yapma potansiyeline sahip olması bu taşımacılık türüne akademik anlamda da ağırlık verilmesi gerektiğini göstermektedir. İlk aşamada demiryolu ve Türkiye dış ticaretini konu alan çalışmalara yer verilmiştir. Ardından demiryolu ile ilintili olarak SWOT analizini konu alan çalışmalarda incelenmiş ve yerli ve yabancı çalışmaları özetleyecek bir literatür taraması yürütülmüştür.

Öçal, çalışmada demiryolu taşımacılığının dış ticaret üzerindeki etkisini Samsun-Sivas demiryolu hattı çerçevesinde incelemiştir. Hattın açılması sonrasında değer olarak ithalat hacminin arttığına fakat ağırlık kapsamında artışın yer almadığına ulaşılmıştır. İhracat olarak ele alınan yüklerde de değer bazında ve ağırlık bazında artış olduğu bulgusuna ulaşılmıştır [22]. Benzer şekilde Bozdağlıoğlu ve Keşir, çalışmalarında Türkiye lojistik sisteminde dış ticaretini ele almış, demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modları arasında düşük yük miktarının taşınmasına konu olmasına rağmen Türkiye ekonomisinde yerinin fazla olduğuna, TCDD tarafından kurulan lojistik merkezlerin demiryolu istasyonlarına yakın yerlere konumlandırılması gerektiğine ve demiryolu taşımacılığında altyapıyı geliştirmeye yönelik bütçe ayrılmasının ülke ekonomisine katkı sağlayacağı sonucuna varmıştır [23]. Benzer şekilde Takım ve Ersungur da çalışmalarında taşıma şekillerine göre Türkiye dış ticaretini incelemiştir. Çalışmada Bozdağlıoğlu ve Keşir'in ortaya koyduğu bulgulara benzerlik niteliğinde demiryolu taşımacılığının Türkiye coğrafi konumunun etkisiyle yaygınlaştırılması gerektiği bulgusuna ulaşılmıştır. Ayrıca Takım ve Ersungur çalışmaları sonucunda denizyolu taşımalarının yetersiz kaldığı noktalarda demiryolu taşımacılığında destek alınabilecek şekilde yatırımların yönlendirilebileceği, demiryolu koordinesinin devlet tekelinden kaldırılması gerektiği belirtilmiştir [4]. Yürütülen bu çalışma da benzer şekilde dış ticaret ve demiryolu arasındaki ilişki incelenirken ülke genelindeki altyapı faaliyetleri ve yatırım çalışmalarına bakılarak SWOT analizi neticesinde birtakım değerlendirmelerin yapılması amaçlanmaktadır.

Yerli literatürde belli bir iş faaliyetini veya alanı konu alan çalışmalara da rastlanmıştır. Zeybek, demiryolunun konteyner limanlarında hinterlant bağlantılarını ele almış ve bu kapsamda bir SWOT analizi yürütmüştür. Çalışmasında Mersin Limanı'nı konu almış ve liman sahasına aktarım sağlanan demiryolu ağının hinterlant bağlantısının güçlendirilmesi gerektiğine vurgu yapmıştır. Ayrıca bu faaliyetin yürütülebilmesi için paydaşlar arasında iş birliği ve entegrasyonun da göz ardı edilemeyeceği üzerinde durulmuştur [28].

Hacıahmetoğlu, demiryolu taşımacılığını Demir İpek Yolu Projesi kapsamında ele almış ve SWOT analizi yürütmüştür. Çalışmanın sonucunda Türkiye'nin transit ağlar üzerinde yer almasını, uluslararası koridorları güçlü; hatların bakımsızlığını, uzman personel eksikliğini, yer sanayinin gelişmemesini zayıf; çevre dostu olmasını, turizmi harekete geçirebilir potansiyelde olmasını, yeni pazarlara ulaşma imkanını fırsat; sınır geçiş kısıtlamalarını, güvenlik riskini ve ülkeler arası politik gerilimleri tehdit olarak belirtmiştir [29].

Yabancı literatüre bakıldığında demiryolu ulaşımının SWOT analizi kapsamında değerlendirildiği çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmalar arasında Bouraima vd., çalışmalarında Batı Afrika Ekonomik ve Parasal Birliğinde demiryolu ulaşım sisteminin gelişimini SWOT matrisi ile ele almıştır. Karayolu rekabeti ve aralıklı devlet müdahalesini tehdit, altyapının eskimesi ve kaynakların yetersizliğini zayıflık, büyüme potansiyelini ve uzun mesafede büyük kapasite avantajını güç başlığı altında sonuçlandırmıştır [24]. Diğer yandan Çin'i konu alarak enerji tüketiminde güneş enerjisini barındıran demiryolu sistemini SWOT analizi ile inceleyen Ji vd., demiryolunun yeşil, dayanıklı, kendi kendine yeten ve sürdürülebilirliği hususunda bulgulara yer verilen çalışmada hibrit enerjinin gerekliliği ve gerek yerli gerekse de yabancı inşaat projelerinde enerjide teknolojik yeniliklerden faydalanılması gerektiği üzerinde durmuştur [25].

Ulaşım sistemleri kapsamında demiryolunu SWOT analizi doğrultusunda ele alan çalışmalar da bulunmaktadır. Mlinarić vd., çalışmalarında akıllı ulaşım sistemlerinde demiryolu ağ bağlantısının değerlendirilmesine yönelik performans göstergeleri üzerinde durmuş ve bu doğrultuda SWOT analizi yürütmüştür. Çalışma sonucunda 25 kriter belirlenmiş ve temelde sürdürülebilir demiryolu taşımacılığı için akıllı ulaşım sistemlerinden fayda sağlanabileceğine ulaşılmıştır [26]. Bunun dışında Ma, çalışmasında Çin'in yüksek hızlı demiryolu bağlantısının gelişimine dikkat çekerek konu ile ilgili SWOT analizi yürütmüştür. Özellikle deniz dışı yüksek hızlı trene yönelik yurtdışı kapsamlı ilerletilen çalışmada Çin'in yurtdışına yüksek hızlı trenle açılabilmesi için fırsatlar ve öneriler ortaya koyulmuştur. Personel eğitim sistemlerinin kurulması, uluslararası kapsamda profesyonel yeteneklerin istikrarlı akışının sağlanması, yeşil ve enerji tasarrufu odaklı planlamalarla bağımsız inovasyonun gerekliliği gibi hususlar dikkat çekmektedir [27].

5. Metot

5.1. Araştırmanın yöntemi

Araştırmamızın amacı demiryolu taşımacılığının Türkiye dış ticaretindeki durumunu ortaya koymak ve stratejik durum analizi yaparak gelecek vizyonu oluşturmaktır. Bu amaca Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının durumunu güçlü ve zayıf yönler, fırsat ve tehditler (SWOT analizi) çerçevesinde incelenerek ulaşılmak hedeflenmektedir.

Türkiye dış ticaretinde mevcut durumu ortaya koyan ve demiryolu taşımacılığını göstergelerle net bir projeksiyon şeklinde sunan bir çalışma olmaması çalışmanın önemini ve özgünlüğünü göstermektedir. Ayrıca bu çalışma sonucunun hem karar vericilere hem de işletmelere katkı sunacak şekilde stratejik planlanması da önemini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu kapsamda 2010-2023 yılı arasında Türkiye’de yayınlanan veriler ve raporların incelenmesi araştırmanın sınırlılığını oluşturmaktadır. Çalışmanın teorik olarak yapılması bir diğer sınırlılığını oluşturmaktadır.

Çalışmada SWOT analizi yöntemi kullanılacaktır. SWOT analizi ilk olarak, Stanford Üniversitesinde 1960’lı yıllarda kullanılmaya başlanan bir yöntem olmuştur. Bu yöntemle ilk etapta büyük şirketler analiz edilerek, başarılı ve başarısız oldukları unsurların detaylandırılması hedeflenmiştir. İlk başta firma bazlı gerçekleştirilen bu analiz yöntemi günümüzde endüstriler, sektörler ve ülkelerin analiz edilmesine kadar stratejik analizlerde çok yaygın kullanılan bir metod haline gelmiştir [30].

SWOT analizi, "Strengths", "Weaknesses", "Opportunities" ve "Threats" kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir tekniktir. Bu analiz, bir projenin veya girişimin geleceği için önemli olan fırsatları tespit etmeyi, girişime karşı tehdit olabilecek faaliyetleri fark etmeyi ve buna karşı önlem almayı, girişimin güçlü yönlerini ortaya çıkararak bunları hangi durumlarda kullanabileceğini belirlemeyi ve girişimin zayıf yönlerini bulup buna karşı önlem almayı içermektedir [31].

SWOT analizi, önemli bir stratejik planlama aracıdır. Ayrıca sadece stratejik planlamada değil, aynı zamanda politika geliştirme ve problem çözüme de kritik öneme sahiptir. SWOT analizi yapılan kurum, kuruluş, bölge veya ülkenin etkileşimi içindeki çevresine sistematik olarak bakan bir analiz yöntemi olması sebebiyle derinliğe sahiptir. Bu yöntem kullanılarak içsel güçler ve zayıflıklar, aynı zamanda dışsal fırsatlar ve tehditler açıkça ortaya konulmaktadır. Bu yöntemle birlikte güçlü ve zayıf taraflar ve dış faktörlerden kaynaklanan fırsatlar ve tehditler incelenerek, gelecekte uygulanacak stratejik planların geliştirilmesini amaçlanmaktadır [32]. SWOT matrisi aşağıdaki maddeleri içermektedir [33]:

- Güç/Fırsat (SO) analojisi, bir sistemin güçlü yönlerinin şansları yakalamak için nasıl kullanılacağına odaklanır.
- Güç/Threat (ST) yaklaşımı, güvende kalmanın avantajlarından yararlanmayı sağlar.
- Zayıflık/Fırsat (WO) stratejileri, yeni fırsatlar yaratmak için boşlukları kapatmaya çalışır.
- Zayıflık/Threat (WT) teknikleri çoğunlukla savunmacıdır ve güvenlik açıklarını azaltmak ve tehditleri etkisiz hale getirmek için çalışır.

Çalışmanın bu kısmında SWOT analizi yöntemiyle Türkiye’nin dış ticaretin demiryolu taşımacılığının stratejik durumu ele alınacaktır. Bu durum ele alınırken sektör raporları, TCDD verileri, bakanlık istatistikleri, TÜİK çalışmaları ve akademik makaleler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kısımda dış ticarette demiryolunun güçlü yönleri, fırsatları, zayıflıkları ve tehditleri ortaya konulması gerek karar vericilere gerekse sektör temsilcilerine ışık tutacaktır.

Bilimsel çalışmalarda araştırmaya dair aşamaların başlatılabilmesi için ilk etapta araştırma sorusunun belirlenmesi gerekmektedir [34]. Bu şekilde çalışma belli bir plan çerçevesinde ve mantık dahilinde ilerletilmektedir [35]. Buradan yola çıkarak çalışmanın araştırma sorusu yapılan literatür taramasının da katkısı ile aşağıdaki gibidir:

- Türkiye dış ticaretinde demiryolunun mevcut durumu nedir?
- Türkiye dış ticaretinde demiryolunun güçlü yönleri nelerdir?
- Türkiye dış ticaretinde demiryolunun zayıf yönleri nelerdir?
- Türkiye dış ticaretinde demiryolunun gelecek vizyonu nedir?
- Demiryolu taşımacılığı Türkiye için bir fırsat mı yoksa tehdit midir?
- Dış ticaret firmaları ve lojistik firmaları için demiryolu taşımacılığı yatırım yapılacak bir taşıma türü müdür?

Bu kapsamda yürütülen araştırmada yukarıda yer alan sorulara cevap aranacak ve problemler çözümlenmeye çalışılacaktır.

5.2. Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının stratejik durum analizi

SWOT analizi, uzmanların bir süreçte veya bir yapıda yer alan güçlü yönleri (S), zayıf yönleri (W), fırsatları (O) ve tehditleri (T) değerlendirdiği yapılandırılmış bir analiz çeşididir [36]. SWOT analizi, mevcut literatür, raporlar ve istatistikler incelenerek uzmanların gerçekleştirdiği önemli bilimsel araştırma yöntemlerinden biridir. Bu araştırmada da Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının SWOT analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırmada ilk olarak güçlü yönler ele alınmış ardından zayıf yönler sıralanmıştır. Analizin devamında fırsatlara ve tehditlere yer verilmiştir. SWOT analizi dört alt başlıktan oluşmaktadır. İlk değerlendirme gerçekleştirilen kısım Türkiye'nin dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının güçlü yönleri olmuştur. Bu yönlerin tespitiyle birlikte eksik olduğu hususlar ortaya çıkarılmış; bunlar da zayıf yönlerini ortaya koymuştur. Güçlü ve zayıf yönlerin tespiti sırasında ülkenin halihazırdaki altyapısı, mevcut faaliyetleri, diğer ülkelerden ayrılan olumlu ve olumsuz yönleri, nitelikli iş gücü potansiyeli, coğrafi koşullar ve mevcut kamu politikaları dikkate alınarak ilgili raporlar, analizler ve mevcut literatür incelenmiş ve bulgulara ulaşılmıştır [2], [4], [6], [16], [13], [20], [21], [22]. Bu iki unsur ülke iç faktörleri ile ilgili unsurlar olarak yer almaktadır. Ayrıca dış faktörlerden oluşan unsurların da ele alınması bu analiz tekniğinin temel boyutları arasında bulunmaktadır. Dış faktörlerden oluşan bu unsurlarda fırsatlar ve tehditleri oluşturmaktadır. Dış faktörler değerlendirilirken uluslararası ve ulusal ekonomik eğilimler, demografik özellikler, politik unsurlar, kamu politikaları, teknolojik gelişmeler, dış ilişkiler, pazar eğilimleri ve uluslararası anlaşmalar dikkate alınmıştır. Yine bu unsurların belirlenmesi aşamasında kamu kuruluşlarının raporları, sektör kuruluşlarının araştırmaları, mevcut istatistikler, uluslararası projeler ve mevcut literatür geniş kapsamlı incelenmiştir [2], [13], [17], [18], [20], [21], [25], [27], [29]. Araştırmada SWOT analizi tekniği aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak güçlü yönler ele alınmış ardından zayıf yönler sıralanmıştır. Analizin devamında fırsatlara ve tehditlere yer verilmiştir.

Tablo 6. Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığı SWOT analizi

Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
<ul style="list-style-type: none"> Taşımacılık maliyetinin düşük olması Geçmişten gelen güçlü demiryolu koridorlarının bulunması Türkiye'nin iş gücü potansiyelinin olması Türkiye'nin üretim gücü Küresel iklim krizleriyle mücadelede en çevreci taşıma modu olması Ulusal ve uluslararası anlamda mevcutta hatlara sahip olunması Petrole olan bağılılığı azaltması Kamu politikalarında demiryolu taşımacılığının desteklenmesi Yüksek hızlı tren hatlarının hızlı bir şekilde inşa edilmesi ve kombine taşımacılık faaliyetlerine entegre edilmesi Çin ve Türkiye arasında mevcutta demiryolu taşımacılığının gerçekleştirilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> TCDD kontrolünde gerçekleşmesi Sektörün serbestleşmemesi Mevcut demiryolu hatlarının modern olmaması Kurulum maliyetlerinin çok yüksek olması Teknolojik gelişmelerin istenilen düzeyde demiryoluna entegre edilememesi Türkiye'nin mevcut lojistik performansının yeterli düzeyde olmaması Taşımacılık alanında üniversitelerde uzmanlaşmanın az olması Lojistik merkezlerin etkin ve verimli olmaması Mevcuttaki iş gücünün nitelik olarak yetersizliği Mevcuttaki envanterin dış ticarete yük taşımacılığı yapacak düzeyde olmaması Farklı ülkelere inşa edilecek demiryolu hatlarında mevzuat ve yasalardan kaynaklı farklılıkların olması (gabari ve tonaj farklılıkları vb.)

	<ul style="list-style-type: none"> • Türkiye’de ağırlığı kamu sektöründe olan demiryolu taşımacılığının özel sektörle uyumlu çalışmaması • İltisak hatları eksiklikleri • İltisak hatlarının organize sanayi bölgeleri, serbest bölgeler, limanlar gibi uluslararası ticaretin önemli bileşenlerine ulaştırılmaması • Üretim ve tüketim noktaları arasında demiryolu hatlarının yeterli olmaması • Demiryolu hatlarının yetersizliğinden kaynaklı demiryolu taşımacılığında ağırlıklı olarak hammadde ve yarı mamul taşınması • Devlet teşvik sisteminin yük taşımacılığında demiryoluna yönelik gerçekleştirilememesi
Fırsatlar	Tehditler
<ul style="list-style-type: none"> • Türkiye’nin jeopolitik konumu • Türkiye’nin büyüyen dış ticaret rakamları • Türkiye’nin mevcut kamu politikalarında ciddi yatırım miktarlarının ayrılması • Marmaray, Bakü-Tiflis gibi önemli demiryolu projelerine sahip olması • Lojistik performansın gelişmesinde demiryolu taşımacılığının kritik öneme sahip olması • Topografyanın demiryolu taşımacılığı altyapısına uygun olması • Denizyolunda başta Süveyş krizi, Konteyner krizi gibi krizlerin olması • Karayolunda geçiş belgelerinden ve bürokratik süreçlerden kaynaklı problemlerin olması • Havayolunun oldukça pahalı bir tür olması • Türkiye’nin yerli lokomotif ve vagon üretimi yapması • Yüksek hızlı tren projelerinin son yıllarda hız kazanması • Lojistik merkez sayılarının her geçen gün artması ve bu merkezlerde demiryolu hatlarının bulunması • Türkiye’nin Asya ve Avrupa arasında transit bir merkez noktasında yer alması • Ulaştırma Bakanlığının raporlarında gelecek vizyonunda demiryolu taşımacılığının büyüme oranlarının çok yüksek olması 	<ul style="list-style-type: none"> • Altyapı maliyetinin yüksek olması • Dış ticarete farklı ülkelerle bağlantılı bir demiryolu ağının zor kurulması • Karayolu ve denizyolunun uluslararası ticarete etkinliği • Coğrafyanın siyasi ve politik çalkantılara müsait olması • İşletme ve bakım onarım maliyetlerinin yüksek olması • Yerli sanayinin henüz istenilen düzeyde olmaması • Türkiye’nin tüm noktalarında demiryolunun bulunmaması • Demiryolunda araştırma geliştirme faaliyetlerine gerekli önemin verilmemesi • Nitelikli iş gücünün karşılanamama ihtimali

Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının stratejik durumu analizi sonucu öne çıkan güçlü yanlara bakıldığında Türkiye’nin geçmişten gelen güçlü demiryolu ağına sahip olması, iş gücü potansiyeli ve kamu politikalarının demiryolu taşımacılığını desteklemesi gibi hususların öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca ülke konumunun tarihi İpekyolu güzergahında olması, dünyanın dış ticarete en büyük ülkelerinden biri olan Çin ile mevcut ağlara sahip olması ve geliştirilmeye yönelik projelerin devam etmesi de güçlü yönler arasında görülmektedir. Zayıf yönlerine bakıldığında ise sektörün henüz liberalleşmemesi, diğer taşıma modlarıyla istenilen bağlantıların kurulamaması, yasal mevzuatlar ve mevcut hatların eski olması yer almaktadır.

Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının birçok fırsatı da barındırdığı tespit edilmiştir. Bu fırsatların başında jeopolitik konumu, büyüyen dış ticaret rakamları, üretim potansiyeli ve önemli demiryolu projelerinin var olması yer almaktadır. Ayrıca taşıma modları arasında demiryolu taşımacılığının operasyonel olarak maliyetlerinin düşük olması da dış ticaret süreçlerinde demiryolu taşımacılığı için önemli bir fırsattır. Tehditler incelendiğinde ise öne çıkan unsur; demiryolu hatlarının altyapı maliyetlerinin yüksek olmasının demiryolu hatlarının inşası için önemli bir tehdit oluşturduğudur. Ayrıca başka ülkelerle bu hatların kurulması ve yönetilmesi de oldukça zorlu bir faaliyet olduğu için demiryolu taşımacılığının Türkiye dış ticaretinde önemli tehditlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Denizyolu ve karayolunun dış ticarete etkinliğinin fazla olması ve mevcut süreçlerin buna göre dizayn edilmesi de bir tehdit unsuru olarak ele alınabilmektedir.

6. Sonuç ve Öneri

Taşımacılık faaliyetleri dış ticaret süreçlerini ve performansını etkileyen önemli hususların başında gelmektedir. Demiryolu taşımacılığı dış ticarete henüz istenilen seviyede olmasa da Türkiye’de kamu otoritelerin sunmuş oldukları gelecek vizyonlarında ve raporlarında en fazla büyüme gerçekleşmesi beklenen taşıma türü durumundadır. Ayrıca devlet yatırım bütçelerinde de demiryolu taşımacılığı için yük ve yolcu kapsamında Türkiye’de büyük yatırımlar yapıldığı tespit edilmiştir. Bu unsur demiryolu taşımacılığının umut vaat eden ve gelecekte ön plana çıkacak taşıma türü olacağını göstermektedir. Benzer şekilde Hazine ve Maliye Bakanlığı tarafından da karbon ayak izini düşürmek amacıyla çıkılan yolda demiryolu ağ yapısının geliştirilmesi ve yüksek hızlı tren inşası öncelikli plan olarak ifade edilmektedir. Ayrıca endüstriyel bölgelerin limanlara bağlanması da temel projeler içinde yer almaktadır.

Yapılan analizde Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığını öne çıkaran güçlü hususlar olarak taşımacılık maliyetinin düşük olması, Türkiye’nin geçmişinden gelen demiryolu ağları, ülkenin iş gücü potansiyeli ve üretim gücü, hükümet politikalarında ciddi destekler sağlanması ve çevreci bir taşıma türü olması belirlenmiştir. Demiryolu taşımacılığının zayıf yönleri olarak öne çıkan hususlar; taşımacılık operasyonlarının liberalleşmemesi, modern ağların bulunmaması, altyapı maliyetinin yüksek olması, demiryolu taşımacılığı anlamında üniversite eğitimlerinin yeterli düzeyde olmaması ve nitelikli iş gücünün bu alanda az olması, iltisak hatları eksiklikleri belirlenmiştir. Ulaştırma Bakanlığı Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi Hedef 2023 raporunda da zayıf yönler olarak ağların yetersiz olması, sektörde rekabetin bulunmaması, altyapı standartlarının düşük olması, uzman personel eksikliği gibi sorunlar belirlenmiştir [37]. İlgili Bakanlığın hazırlamış olduğu bu raporda belirtilen hususlar gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucuyla benzerlik göstermektedir. Taherian vd. (2017), araştırmalarında demiryolu taşımacılığı avantajları arasında yakıt tüketiminin ve çevre kirliliğinin azaltılması olduğunu tespit etmişlerdir [38]. Sacar ve Özdemir (2022) çalışmasında Türkiye’nin jeopolitik konumunun ve orta koridor üzerinde yer almasının demiryolu taşımacılığı anlamında önemli avantajlar sağlayacağını tespit etmişlerdir [39]. Tüm bu unsurlar bu araştırmadaki avantajlarla benzerlik göstermekte ve çalışma sonucunu desteklemektedir.

Türkiye dış ticaretinde demiryolu taşımacılığının fırsatlarına bakıldığında jeopolitik konumu, sürekli artan dış ticaret rakamları, ciddi yatırım miktarının ayrılması, önemli demiryolu projelerini bünyesinde bulundurması tespit edilmiştir. Demiryolu taşımacılığında yer alan tehditler ise altyapı ve kurulum maliyetlerinin yüksek olması, rekabetin olmaması, politik çalkantılar, denizyolu ve karayolunun uluslararası ticarete mevcut etkinliği, işletme bakım-onarım maliyetlerinin yüksek olması, demiryolunun henüz istenilen seviyede olmaması olarak tespit edilmiştir. Takım ve Ersungur (2015) çalışmalarında demiryolu taşımacılığında altyapı maliyetinin yüksek olmasını ve demiryollarının devlet tekelinde olmasının demiryolu taşımacılığı önündeki önemli engellerden biri olduğunu tespit etmişlerdir. Bouraima vd. (2020) araştırmalarında demiryolu taşımacılığı önünde en büyük engelin rekabet kaynaklı engeller ve

altyapı maliyeti olduğunu ortaya koyarken, en büyük avantajların ise potansiyel pazar büyümesi, uzun mesafe taşınması ve kapasite büyüklüğü olduğunu belirlemiştir. Bu sonuçlarda yürütülen bu çalışmada ortaya koyulan tehditlerle benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Sun vd. (2022), demiryolu taşımacılığının düşük enerjili bir taşıma türü olduğunu vurgularken, demiryolu taşımacılığıyla ticaret bağlantılarının güçlü bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [40]. Ayrıca Bir Kuşak Bir Yol projesi üzerinde yer alan ülkelerin demiryolu bağlantılarının güçlü koordinasyon kapasitesi olduğu belirlenmiştir. Türkiye de Bir Kuşak Bir Yol projesi üzerinde yer alan önemli bir mütteftir. Bu çalışma sonucunda da görüldüğü üzere fırsatlar ve avantajlar konusunda üzerinde durulan Çin ile mevcut yapı ve tarihi İpekyolu üzerinde yer alması Türkiye için ciddi fırsatlar barındırmaktadır. Sonuç olarak Türkiye gibi genç ve nitelikli nüfusa sahip bir ülkede dış ticaret verilerinin her geçen yıl arttığı ve bu artışın devam edeceği düşünülmektedir. Bu artış içerisinde demiryolu taşımacılığı, yüksek kapasitesi, düşük enerji tüketimi ve çevre dostu özellikleri ile önemli bir ulaşım seçeneği olmaktadır. Ancak altyapı yatırımları ve teknolojik gelişmelerle desteklenmesi gerekmektedir. Bu taşımacılık türü, küresel ticaretin ve ekonominin büyümesine katkı sağlamaya devam etmektedir.

Yürütülen çalışma kapsamındaki araştırma sonuçlarının literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir. Bundan sonraki araştırmacılar demiryolu taşımacılığının dış ticarete etkisini ekonometrik analiz yöntemleriyle inceleyebileceklerdir. Ayrıca taşımacılık sektörü yöneticileriyle yüz yüze görüşmeler yaparak veya anket yoluyla görüşlerini ve düşüncelerini analiz edilebilecektir. Çalışma kapsamında kamu otoritelerine öneri niteliğinde demiryolunun hizmete dönük alanlarında liberalleşmesinin önünü açacak ve istikrarlı denetimi yürütecek alanlar tayin ederek teşvik edici politikalar ve uygulamaların yürütülmesi yönündedir. Özel sektör uygulayıcılarına yönelik öneri ise iş süreçlerinde demiryolu taşımacılığını entegre edici süreçler geliştirmeleri yönündedir. Bu çalışmada eğitim kurumları olan üniversitelere dönük öneri ise demiryolu taşımacılığı ile ilgili derslerin, ders müfredatlarının veya eğitime dair uygulamaların artırılarak nitelikli iş gücüne katkı sunmaları olacaktır.

Kaynakça

- [1] E. Gül, and A. Kamacı, "Dış ticaretin büyüme üzerine etkileri: bir panel analizi", *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, no. 3, pp. 81-89, 2012
- [2] UTİKAD, "Uluslararası taşımacılık ve lojistik hizmet üreticileri derneği lojistik sektörü raporu", 2022.
- [3] Y. Bayraktutan, and M. Özbilgin, "Uluslararası ve yurtiçi ticarete taşıma türlerinin payı: Bir analitik hiyerarşi prosesi (AHP) uygulaması". *Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 405-436, 2012
- [4] A. Takım, and Ş. M. Ersungur, "Taşıma şekillerine göre Türkiye'de dış ticaretin analizi: Mevcut durum, sorunlar ve beklentiler". *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 19, no. 3, pp. 357-376, 2015
- [5] A. Demirbilek, "Küresel ticarete lojistik performans düzeyi ile havayolu kargo taşımacılığı ilişkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [6] Ö. Bora, "COVID-19'un Türkiye'nin dış ticaret taşıma türlerine etkisinin incelenmesi". *JINENIS*, vol. 1, no. 2, pp. 65-77, 2022, doi: 10.5281/zenodo.7487537
- [7] H. Seyidoğlu, *Uluslararası İktisat: Teori, Politika ve Uygulama*, 19.Baskı, İstanbul: Güzem Can Yayınları, 2013
- [8] B. Kiran, and B. Güriş, "Türkiye'de ticari ve finansal dışa açıklığın büyümeye etkisi: 1992-2006 dönemi üzerine bir inceleme" *Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 11, no. 2, pp. 69-80, 2011
- [9] N. Aslan, and D. Yörük, "Teori ve uygulamada dış ticaret hadleri ve kalkınma ilişkisi", *Marmara Üniversitesi İİBF Dergisi*, vol. 27, no. 2, 2008
- [10] N. Serin, *Dış Ticaret ve Kalkınma*, Ankara Üniversitesi Yayınları, Ankara, 1981
- [11] F.F.R., Ramos, "Exports, imports, and economic growth in portugal: evidence from causality and cointegration analysis" *Economic Modelling*, no. 18, pp. 613-623, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0264-9993\(00\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0264-9993(00)00055-9)

- [12] S. Agayev, "İhracat ve ekonomik büyüme ilişkisi: 12 geçiş ekonomisi örneğinde panel eştümleşme ve panel nedensellik analizleri", *Ege Akademik Bakış*, vol. 11, no. 2, pp. 241-254, 2011
- [13] TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), 2024, [Online]. Available: <https://www.tuik.gov.tr/>. [Erişim Tarihi: 20.03.2024]
- [14] U. Demircan, "Demiryolu taşımacılığının liman hizmet pazarlamasına etkileri". *Journal of Maritime Transport and Logistics*, vol. 2, no. 2, pp. 91-100, 2021, <https://doi.org/10.52602/mtl.945718>
- [15] M.F., Altan, and M.Ç. Kızıltaş, "Yüksek hızlı demiryolları, yolcu ve yük taşımacılığı karşılaştırmaları bağlamında küresel ölçekli bir derleme çalışması". *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 11, no.1, pp. 319-328, 2020, <https://doi.org/10.24012/dumf.404832>
- [16] Ü., Ekici, and T., Feriadoğlu, "Demiryolu taşımacılığının diğer taşımacılık modlarıyla karşılaştırılması ve sağladığı avantajlar". *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 121-132, 2024, <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1385217>
- [17] H. Zeybek, "Uluslararası ticarete yeni avrasya ulaşım yolları arayışı: demiryolu yük taşımacılığına etkileri". *Avrasya Etüdüleri*, vol: 56, no. 2, 135-154, 2019
- [18] D.A., Deveci, and D., Çavuşoğlu, "İntermodal demiryolu taşımacılığı: Türkiye için fırsatlar ve tehditler". *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 93-120, 2013
- [19] Y. Uğurlu, "Türkiye'de beklenen yeni demiryolu sektör yapısı," *Demiryolu Mühendisliği*, no.1, pp. 68-71, 2015
- [20] TCDD Faaliyet Raporu, 2022
- [21] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, "2053 Ulaştırma ve Lojistik Planı", 2023
- [22] B., Öçal, "Demiryolu taşımacılığının dış ticarete etkisi: Samsun gümrük müdürlüğü örneği". *Sosyal, Beşerî ve İdari Bilimler Alanında Araştırmalar*, no. 83, 2023
- [23] Y.E., Bozdağlıoğlu, and B., Keşir, "Türkiye'de lojistik sektörünün dış ticarete etkisi". *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, vol. 10, no.1, pp. 1-17, 2022
- [24] M.B., Bouraima, Y., Qiu, B., Yusupov, and C.M., Ndjegwes, "A study on the development strategy of the railway transportation system in the West African Economic and Monetary Union (WAEMU) based on the SWOT/AHP technique". *Scientific African*, no. 8, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00388>
- [25] L., Ji, F., Ning, j., Ma, and I., Jia, "SWOT analysis for orchestrated development of a solar railway system in China". *IET Renewable Power Generation*, vol.14, no.18, pp. 3628-3635, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0465
- [26] T.J., Mlinari, B., Đorđević, and E., Krmac, "Evaluation framework for key performance indicators of railway ITS". *Promet-Traffic&Transportation*, vol. 30, no. 4, pp. 491-500, 2018
- [27] H., Ma, "SWOT Analysis on China's high-speed rail to the overseas". In International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS 2015).1259-1265, 2015
- [28] H., Zeybek, "Demiryollarının konteyner limanı-hinterland bağlantılarındaki önemi: Mersin limanı örneği". *Demiryolu Mühendisliği*, no.14, pp. 49-64, 2021, <https://doi.org/10.47072/demiryolu.840401>.
- [29] G., Hacıahmetoğlu, "Demir ipek yolu projesi ve Türkiye'ye yönelik bir SWOT analizi". *TURAN-SAM*, vol.8, no.30, pp. 226-232, 2016
- [30] A., Sarsby, *SWOT analysis: a guide to SWOT for business studies students*. United Kingdom: Spectaris Ltd, 2016
- [31] Z., Aghayev, "Lojistik yönetimi açısından Azerbaycan pazarının değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2008
- [32] B., Çoban, and Y.E., Karakaya, "Geleceği planlamada stratejik yönetim ve SWOT analizi: kavramsal yaklaşımlar". *Social Sciences*, vol. 5, no. 4, pp.342- 352, 2010
- [33] B. Murat, and Y., Onur, "Analysis of the nuclear energy systems as an alternative propulsion system option on commercial marine vessels by utilizing the SWOT-AHP method". *Nuclear Engineering and Design*, 407, 112265, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112265>
- [34] S. Gürbüz, and F., Şahin, *Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri: felsefe-yöntem-analiz*. 5. Basım, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2018
- [35] I., Ali, and I., Gölgeci, "Where is supply chain resilience research heading? A systematic and cooccurrence analysis", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 49, no.8, pp. 793-815, 2019, <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2019-0038>
- [36] T. Leiber, B. Stensaker, and L.C. Harvey, "Bridging theory and practice of impact evaluation of quality management in higher education institutions: a SWOT analysis". *In Impact Evaluation of Quality Management in Higher Education*, pp. 117-132, 2020

- [37] T.C. Ulaştırma Bakanlığı (2011). http://www.sp.gov.tr/upload/xSPTemelBelge/files/93C5Y+Turkiye_Ulasim_velletisim_Stratejisi.pdf Erişim Tarihi: 13.07.2024
- [38] M. Taherian, M. Maeen, and M. Haghparast, M. “Promoting the quality level of signaling in railway transportation system taking advantage from wireless sensor networks Technology”. *Computers*, vol. 6, no. 3, pp. 26, 2017
- [39] Ö. Sacar, S. Özdemir, “Orta koridor rotasında Türkiye'nin liman bağlantılarının bulanık AHP ve TOPSIS yöntemleriyle araştırılması”, *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 145-157, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.944161
- [40] Q. Sun, X. Wang, F. Ma, Y. Han, and Q. Cheng, “Synergetic effect and spatial-temporal evolution of railway transportation in sustainable development of trade: an empirical study based on the belt and road”. *Sustainability*, vol. 11, no. 6, pp.1721, 2019

Özgeçmiş



Muhammed TURGUT

Lisans eğitimini KTO Karatay Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Uluslararası Ticaret bölümünde, doktora eğitimini ise yine aynı üniversitenin Uluslararası Ticaret ve Lojistik Anabilim dalında tamamlamıştır. Lojistik alanında özel sektörde çalıştıktan sonra İstanbul Gelişim Üniversitesi ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesinde öğretim görevliliği tecrübesi bulunmaktadır. Şu anda Tarsus Üniversitesi Uluslararası Ticaret ve Lojistik bölümünde hala devam etmekte olan öğretim üyeliği görevini icra etmektedir. İlgi alanına giren, lojistik, taşımacılık, gümrük ve dış ticaret konularında çalışmalar yapmaktadır.

E-Posta: muhammedturgut@tarsus.edu.tr



Şule GÜNGÖR

Lisans eğitimini Marmara Üniversitesi İktisat Fakültesinde, Yüksek lisans eğitimini Mersin Üniversitesi Uluslararası Ticaret ve Lojistik anabilim dalında, doktora eğitimini ise Tarsus Üniversitesi Uluslararası Ticaret ve Lojistik anabilim dalında tamamlamıştır. 2021-2016 yılları arasında Mersin Uluslararası Liman İşletmeciliği AŞ'de çalışmıştır. 2016-2018 yılları arasında Mersin Üniversitesi'nde görev yapmış, 2018 yılından itibaren ise Tarsus Üniversitesi'nde görev yapmaktadır. İlgi alanına giren konular lojistik, taşımacılık ve uluslararası ticaret olarak sıralanmaktadır.

E-Posta: sulegungor@tarsus.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Muhammed TURGUT: Kavramsallaştırma, Metodoloji ve Yöntem. Şule GÜNGÖR: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, İnceleme. Muhammed Turgut: Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Financial Analysis in Rail System Enterprises: Application of The Republic of Turkey State Railways Transportation Company

Hüseyin ARI¹, Ahmet ONAY^{*2}

¹ Eskişehir Technical University, Graduate Education Institute, Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Technical University, Vocational School of Transportation, Department of Management and Organization, Eskişehir, Turkey

*ahmet_onay@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 17.07.2024, Kabul/Accepted: 19.08.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Abstract: Financial analysis is a fundamental tool used to measure a company's financial condition and performance, particularly its profitability and operational efficiency. This study examines the applicability of financial analysis in railway system operations, specifically focusing on the Republic of Turkey State Railways Transportation Company. The study aims to validate the importance of financial analysis in the railway transportation sector and assess the company's financial condition and performance. The company's basic financial statements, such as the balance sheet and income statement, were analyzed to provide insights into its financial health regarding liquidity, debt, and profitability. Additionally, methods such as ratio analysis were employed to compare the financial performance with past years and to make inferences about potential future performance. The study's results indicate that while the company's financial health is generally strong, there are areas where improvements can be made. Efforts to enhance operational efficiency and implement more effective cost-control measures are recommended to the company. The findings suggest that financial analysis significantly affect in the company's strategic planning processes. In conclusion, this study has demonstrated the importance and applicability of financial analysis in railway system operations through the example of the company in question. Financial analysis can be used as a tool to help railway system enterprises understand their financial condition, make strategic decisions, and ensure long-term sustainability.

Keywords: Financial Analysis, Rail System Enterprises, Financial Performance, Ratio Analysis

Raylı Sistem İşletmelerinde Finansal Analiz: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık Anonim Şirketi Uygulaması

Öz: Finansal analiz, bir şirketin finansal durumu ve performansını, özellikle karlılığını ve operasyonel verimliliğini ölçmek için kullanılan temel bir araçtır. Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık Anonim Şirketi özelinde raylı sistem işletmelerinde finansal analizin uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmanın amacı, demiryolu taşımacılığı sektöründe finansal analizin öneminin doğrulanması ve şirketin finansal durumu ve performansının değerlendirilmesidir. Çalışmada şirketin bilanço ve gelir tablosu gibi temel finansal tabloları analiz edilerek; likidite, borçluluk ve karlılık gibi finansal sağlığına ilişkin bilgiler ortaya koyulmuştur. Ayrıca oran analizi gibi yöntemler üzerinden finansal performansı geçmiş yıllarla karşılaştırılmış ve gelecekteki potansiyel performansa ilişkin çıkarımlar yapılabilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, şirketin finansal sağlığının genel olarak güçlü olduğunu ancak bazı iyileştirmeler yapılabileceğini göstermiştir. Şirkete operasyonel verimliliğin artırılmasına yönelik çabalara girilmesi ve daha etkin bir maliyet kontrolünün yapılması önerilebilir. Sonuçlar, finansal analizin şirketin stratejik planlama süreçlerinde önemli bir rol oynayabileceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada, örnek şirket üzerinden raylı sistem işletmelerinde finansal analizin önemi ve uygulanabilirliği ortaya koyulmuştur. Finansal analiz, raylı sistem işletmelerinin finansal durumlarını anlamalarına, stratejik kararlar almalarına ve uzun vadeli sürdürülebilirliklerini sağlamalarına yardımcı olan bir araç olarak kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Finansal Analiz, Raylı Sistem İşletmeleri, Finansal Performans, Oran Analizi

Atıf için/Cite as: H. Arı, A. Onay, "Financial analysis in rail system enterprises: application of the republic of Turkey state railways transportation company," *Railway Engineering*, no. 21, pp. 142-154, Jan. 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1517934

1. Introduction

Businesses can utilize financial analysis for decision-making in numerous areas, such as feasibility, planning, investment, and budgeting from the inception stage. In financial analysis, it is possible to compare various items using financial statements. Financial statements are indispensable tools that enable users to understand the various business practices and measure the success of these practices. The selection and interpretation of items to be compared according to the objective constitute the key point of the analysis. Answers to numerous questions, such as the business's investment decisions, whether the targets are met, the level of resource utilization, the efficiency of the strategies followed, and the debt repayment capability, can be obtained through financial statements and the comparison of items within these statements [1]. Knowing which analysis methods to use and how to evaluate the information in the financial statements is critical to the success of the analysis. In this context, selecting the appropriate methodology and effectively interpreting financial data form the cornerstones of analytical processes [2].

Railway transportation is a critical component of the economy, providing a reliable and efficient means for transporting large quantities of goods and passengers. Financial analysis is paramount for companies operating in this sector for sustainability and growth. Financial analysis assists companies in assessing their financial status, performance, and future potential, thereby enabling strategic decision-making [3]. Railway transportation companies are characterized by complex operations that require substantial capital investments and long-term financing. Financial analysis evaluates the financial health of these companies by revealing their liquidity, debt, and profitability conditions. Analyzing fundamental financial statements such as balance sheets, income statements, and cash flow statements is crucial for understanding their operations' financial structure and sustainability [4].

Significant investment decisions, such as developing railway infrastructure, renewing vehicle fleets, and adopting technological innovations, are made based on robust financial analyses. For example, the construction of a new railway line or the modernization of existing lines entails considerable costs. Conducting financial analyses to accurately assess the return and cost of such investments is imperative [5]. Moreover, financial analysis aids railway transportation companies in achieving operational efficiency and cost control. Income and expenditure analyses help identify high-risk and potential savings areas [6]. For instance, detailed analyses of fuel consumption, personnel expenses, and maintenance costs allow for optimizing expenses.

Railway transportation faces various financial and operational risks. Financial analysis is vital for identifying and managing these risks. External factors such as exchange rate fluctuations, changes in interest rates, and economic downturns can affect the financial performance of railway transportation companies. Financial analysis helps evaluate the impact of these risks and adopt appropriate measures [7]. It is essential for railway transportation companies to utilize financial analysis as a fundamental guide when formulating long-term strategic plans. Maintaining financial robustness and assessing new opportunities are crucial for companies to achieve their growth targets [8]. Financial analysis, by considering past performance data and current market conditions, helps shape future growth strategies [9].

Investors, creditors, regulatory bodies, and other stakeholders rely on financial analyses to understand the financial condition of railway transportation companies. Accurate and comprehensive financial analyses provide confidence to these stakeholders and strengthen their relationships with the company. For example, before investing in a railway company, investors evaluate the financial statements to assess the risks and potential returns of the investment. In this context, insights gained from financial analysis can be considered the most crucial information source for all stakeholders [10].

For railway transportation companies, financial analysis is critical for evaluating financial health, making investment decisions, ensuring efficiency and cost control, managing risks, strategic planning, and providing information to stakeholders. These analyses enable companies to identify their strengths and weaknesses, foresee future opportunities and threats, and make informed strategic decisions [11]. Therefore, financial analysis is indispensable for successful and sustainable business management in the railway transportation sector.

Despite limited examples in international literature, no study has examined the financial health of a railway transportation company in Turkey. Financial analysis of railway transportation companies is an important research topic for the reasons previously mentioned. Such a study can potentially fill the research gap identified in the Turkish literature and open a new research avenue. This study aims to conduct a financial analysis of the financial statements of The Republic of Turkey State Railways Transportation Company (TCDD Transportation Inc.). The company's financials, including debt repayment capacity, financial structure, efficiency, and profitability, have been analyzed. The dataset for this study is based on the financial statements publicly shared by the company through its website.

The next section of the study discusses the research methodology, dataset, and scope of the analysis. The following section presents the research findings. The final section includes conclusions, limitations, and recommendations for future studies.

2. Methodology

In this study, a comprehensive financial analysis methodology was conducted to evaluate the financial health and performance of TCDD Transportation Inc. Various financial analysis techniques were applied to measure the company's financial health.

Initially, the primary financial indicators, such as the balance sheet and income statement for the years 2018-2022, were examined in detail. The company's financial statements are publicly shared via its website. These statements were analyzed to understand the company's liquidity, debt, and profitability conditions. The study employed the following financial analysis methods:

- **Liquidity Analysis:** Liquidity ratios such as the current ratio and quick ratio were calculated to assess the company's capacity to meet its short-term liabilities.
- **Debt Analysis:** The company's debt condition was evaluated by examining the ratio of total debt to assets.
- **Profitability Analysis:** Profitability ratios such as net profit margin, return on equity, and return on assets were used to analyze the company's profitability status.
- **Ratio Analysis:** Financial ratios were calculated to compare the company's performance with previous years and determine the trends over time.

Additionally, where necessary, horizontal, vertical, and trend analysis methods were used to examine the trends in the company's financial indicators and make inferences about its future financial performance.

This methodological approach aims to comprehensively evaluate the company's financial health and performance, identify its strengths and weaknesses, and contribute to strategic planning processes.

While static analysis involves analyzing data from financial statements for a single period, dynamic analysis examines the relationships between data from financial statements for

consecutive periods. Therefore, this research methodology can be described as a dynamic analysis method.

3. Findings and Discussion

Balance sheets are one of the basic financial statements that show the financial position of businesses on a specific date. A balance sheet includes the business's assets, liabilities, and equity. It shows the total of all assets owned by the business and the sources from which these assets are financed. The company's financial analysis began by examining the main components of the balance sheet. When the company's current assets are examined, it is seen that they have increased every year from 2018 to 2022. This shows that the company's current assets are increasing steadily from year to year, and its working capital is strengthening. The company's current assets have increased, especially in recent years. A large increase in 2021 indicates that the company has made significant investments in its fixed assets or made large asset purchases. Their total assets have increased every year, especially in recent years. The increase in total assets indicates that the company is growing overall and expanding its asset base. The company's short-term liabilities follow a fluctuating pattern. The fact that short-term debts decreased significantly in 2019 and then increased again in 2020 indicates that the company is experiencing fluctuations in short-term debt management. The fact that long-term liabilities remain relatively stable indicates no major changes in the company's long-term debt. The company's equity capital has generally increased. The general increase in shareholders' equity indicates that the company has strengthened its equity capital. The decrease in 2020 indicates that performance has decreased compared to the previous year. Table 1 shows the adjusted balance sheets for the five periods from 2018 to 2022, allowing one to examine the items in the company's balance sheets and identify increases and decreases.

Table 1. Balance sheet ratios (Million TL)

Balance sheet items	Years					Absolute Difference			
	2018	2019	2020	2021	2022	2019-2018	2020-2019	2021-2020	2022-2021
Current Assets	1158	1360	1767	2644	4064	202	407	877	1420
Non-Current Assets	5082	5003	4729	8143	10393	-79	-274	3414	2250
Total Assets	6240	6363	6496	10787	14457	123	133	4291	3670
Short-Term Liabilities	2636	369	1823	1257	1316	-2267	1454	-566	59
Long-Term Liabilities	160	156	150	148	148	-4	-6	-2	0
Shareholders' Equity	3444	5838	4523	9382	12993	2394	-1315	4859	3611
Total Liabilities and Equity	6240	6363	6496	10787	14457	123	133	4291	3670
						1,97	2,09	66,06	34,02

When examining company's balance sheet items, the company's assets increased by 1.97% in 2019 compared to 2018, 2.09% in 2020 compared to 2019, 66.06% in 2021 compared to 2020, and 34.02% in 2022 compared to 2021. Figure 1 and Figure 2 summarize the company's asset and liability - equity structure.

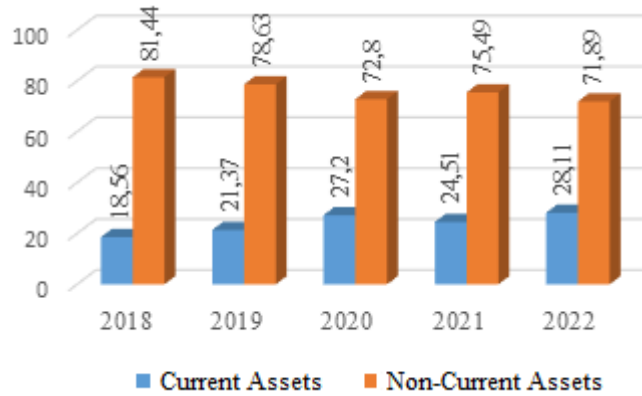


Figure 1. Assets

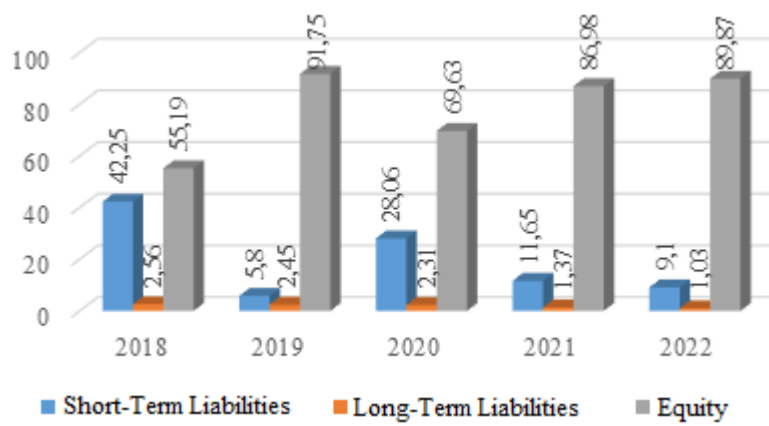


Figure 2. Liabilities and Equity

Over the years, it has been observed that non-current assets exceed current assets. The decrease in the share of non-current assets in the asset structure from 2018 to 2020 is understood to be due to the differential depreciation values of tangible non-current assets and the increase in inventories and securities within current assets, leading to an increase in the share of current assets in the asset structure. By 2021, an increase in tangible non-current assets led to an increase in non-current assets within the asset structure, but by 2022, there was a decrease again in non-current assets.

Regarding the distribution of resources, it is seen that equity holds a more significant weight than others, indicating that the company possesses a strong and balanced financial structure. It is desirable for long-term liabilities to outweigh short-term liabilities from external sources. However, it is observed that the company has a high proportion of short-term liabilities, increasing repayment risk.

Ratio analysis has been employed to comment on the company's financial health and performance. While all the company's financial ratios have been obtained, practical interpretation has focused on liquidity, financial structure, efficiency, productivity, and profitability ratios due to their practical significance and relevance to the company's overall situation and ratio practicality.

The acid-test ratio has been used to measure liquidity strength. More sensitive than the current ratio, the acid-test ratio complements the current ratio and is more meaningful. It indicates the company's ability to pay short-term debts, with a value of 1 being considered sufficient. The ratio separates inventories from current assets in determining liquidity. A ratio of 1 indicates that the company can meet all its short-term debts with cash or quickly convertible assets. A ratio below

1 suggests weakened debt repayment ability. While a ratio below 1 may initially seem unfavorable, the high speed of inventory conversion into cash can mitigate this negativity. The company's acid-test ratios over the years are listed in the table below.

Table 2. Acid-test ratios between 2018-2022 (Million TL)

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Current Assets	1158	1360	1767	2644	4064
Short-Term Liabilities	2636	369	1823	1257	1316
Inventories	578	720	1012	1355	2216
Acid-test ratio	0,22	1,73	0,41	1,03	1,41

In 2018, the company financed its operations with short-term liabilities, resulting in an acid-test ratio below 1 and weakened debt repayment ability, even if all inventories were converted to cash. In 2019, with a decrease in short-term liabilities, the acid-test ratio rose above 1, indicating the company's ability to pay off all short-term liabilities with cash. By 2020, due to high levels of short-term liabilities and an increased share of inventory within current assets, the ratio fell below 1 again, despite the potential conversion of all inventories to cash. The years 2021 and 2022 saw the acid-test ratio rise above 1, indicating the company's capability to meet its short-term debt obligations.

Financial leverage ratios such as the total debt ratio and the ratio of fixed assets to equity have been utilized to assess the company's financial structure and long-term debt repayment ability. The total debt ratio indicates the proportion of assets financed by external sources, also known as the leverage ratio. A ratio of around 50% is generally considered normal; a higher ratio suggests increased financial risk and credit risk [12]. The ratio of fixed assets to equity shows the proportion of fixed assets financed by equity and long-term liabilities, indicating sustainable capital. This ratio is calculated by dividing fixed assets by equity. A ratio below 1 is expected; if it exceeds 1, it indicates that a portion of fixed asset financing is covered by short-term liabilities [13]. Table 3 presents the company's total debt ratios for the relevant years, and Table 4 shows the ratio of fixed assets to equity.

Table 3. Total debt ratios between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Total liabilities (Million TL)	2796	525	1973	1405	1464
Total assets (Million TL)	6240	6363	6496	10787	14457
Total debt ratio	44,81	8,25	30,37	13,02	10,12

When examining the company's total debt ratios over the years, they are below 50%. This indicates that the company does not heavily rely on external sources of financing and, consequently, does not incur high-interest expenses.

Table 4. The ratio of non-current assets to permanent capital between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Non-current assets (Million TL)	5082	5003	4729	8143	10393
Equity (Million TL)	3444	5838	4523	9382	12993
Long-Term Liabilities (Million TL)	160	156	150	148	148
Non-current assets to permanent capital	1,41	0,83	1,01	0,85	0,79

When examining the ratios of the company's non-current assets to permanent capital, it is observed that in 2018 and 2020, these ratios were above 1. As previously noted in earlier analyses, this indicates a deficiency in net working capital. During 2018 and 2020, short-term liabilities were used alongside permanent capital to finance non-current assets. In 2019, 2021, and 2022,

the ratios of non-current assets to permanent capital were below 1, indicating that non-current assets were financed with permanent capital.

Activity ratios are used to determine how efficiently and effectively the company utilizes its assets in conducting its operations. The higher the turnover rates of elements within the operating cycle and other asset elements during the operating period, the more profitable and efficient the company is considered to be. Therefore, activity ratios are also referred to as ratios used in the analysis of efficiency, turnover rate, or operational status [14]. In analyzing the company's operations, inventory turnover, inventory turnover period, receivables turnover, receivables collection period, trade payables turnover, average payment period of trade payables, and asset turnover have been interpreted.

Inventory turnover ratios are used to measure how quickly inventories are consumed in production or converted into sales revenue [15]. Table 5 presents the company's inventory turnover ratios for the relevant years, and Table 6 presents the inventory turnover periods.

Table 5. Inventory turnover ratio between 2018-2022

Years	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Cost of sales (Million TL)		2832	3387	3022	4240	8857
Inventories (Million TL)	441	578	720	1012	1355	2216
Average inventories (Million TL)		509,5	649	866	1183,5	1785,5
Inventory turnover ratio		5,56	5,22	3,49	3,58	4,96

When examining the company's inventory turnover ratios, it is observed that inventories were converted to cash through sales 5 times in 2018, 5 times in 2019, 3 times in 2020, 3 times in 2021, and 4 times in 2022. The inventory turnover ratios have decreased over the years. In 2019, the decline in inventory turnover was due to an increase in inventory outpacing sales. This decline continued into 2020 as inventories increased while sales decreased. In 2021 and 2022, both inventories and sales increased; however, the increase in sales was more significant than the increase in inventories, resulting in a rise in inventory turnover.

Table 6. Inventory turnover period between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Inventory turnover period ratio	5,56	5,22	3,49	3,58	4,96
Inventory turnover times	64,75	68,96	103,15	100,56	72,58

When examining TCDD Transportation Inc.'s inventory turnover period, it is observed that inventories were converted to cash every 64 days in 2018, every 68 days in 2019, every 103 days in 2020, every 100 days in 2021, and every 72 days in 2022.

Receivables turnover indicates how many times a company collects its receivables in a year and is calculated by dividing net sales by average trade receivables for a period. Trade receivables encompass the receivables arising from the company's main activities. The receivables turnover ratio indicates the speed at which the company's receivables are converted to cash, thus showing its liquidity [16]. Table 7 presents the company's receivables turnover ratios for the relevant years, and Table 8 presents the receivables collection periods.

Table 7. Receivables turnover ratio between 2018-2022

Years	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Net sales (Million TL)		2131	2572	2105	2848	6895
Trade receivables (Million TL)	805	449	446	273	814	816
Average trade receivables (Million TL)		627	447,5	359,5	543,5	815
Receivables turnover ratio		3,39	5,75	5,85	5,24	8,46

When examining the company's receivables turnover ratio, it is observed that due to the size of trade receivables in 2017, the ratio was 3.39 in 2018. In 2019, the ratio increased to 5.75 due to an increase in net sales and a slight decrease in trade receivables. By 2020, both net sales and trade receivables had decreased, but the ratio increased to 5.85 due to a more significant decline in trade receivables. In 2021, despite an increase in net sales, the ratio fell to 5.24 due to a larger increase in trade receivables. In 2022, the ratio rose to 8.46 due to an increase in net sales, while trade receivables remained relatively unchanged.

Table 8. Receivables collection period between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Receivables turnover ratio	3,39	5,75	5,85	5,24	8,46
Ave. collection period of receivables	106,19	62,61	61,54	68,70	42,55

The trade payables turnover ratio indicates how many times a company's payables are paid in a year and is calculated by dividing net purchases by average trade payables for a period [17]. The trade payables turnover ratio should be compared and evaluated against the average payment period of trade payables and the average collection period of trade receivables. Table 9 presents the company's trade payables turnover ratios for the relevant years, and Table 10 presents the average payment periods of trade payables.

Table 9. Trade payables turnover ratio between 2018-2022

Years	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Cost of selling goods-services (Million TL)		2832	3387	3022	4240	8857
Trade payables (Million TL)	270	2530	214	1705	1126	1094
Average trade payables (Million TL)		1400	1372	959,5	1415,5	1110
Trade payables turnover ratio		2,02	2,47	3,15	2,99	7,98

When examining the company's trade payables turnover ratios, it is observed that the ratio increased steadily in 2019 and 2020, indicating that the company could pay its debts quickly with cash. During this period, due to using cash to pay off debts, the company would not be able to use this cash for other investments. By 2021, there was a decrease in the trade payables turnover ratio, indicating that the company extended the payment period of its trade payables. In 2022, however, there was an increase in the trade payables turnover ratio. This increase was due to the cost of goods sold more than double the previous period.

Table 10. The average payment period of trade payables between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Trade payables turnover ratio	2,02	2,47	3,15	2,99	7,98
The payment period of trade payables	178,22	145,75	114,28	120,41	45,11

When examining the company's average payment period for trade payables, it is observed that trade payables were paid in 178 days in 2018, 145 days in 2019, 114 days in 2020, 120 days in 2021, and 45 days in 2022. If we evaluate the average payment period of trade payables alongside the average collection period of receivables, it is observed that receivables were collected in 106 days in 2018, 62 days in 2019, 61 days in 2020, 68 days in 2021, and 42 days in 2022. Since it is expected that the payment period for trade payables should at least be as long as the collection period for receivables, the fact that the company's payment period for trade payables exceeds the collection period for receivables is considered positive.

The asset turnover ratio indicates how many times a company's assets are turned over through sales, and a higher ratio is considered favorable. The ratio is calculated by dividing net sales by total assets. A ratio of 2 is considered appropriate for large companies, while for small companies,

a ratio between 2 and 4 is deemed suitable [18]. The company's asset turnover ratios from 2018 to 2022 are presented in Table 11.

Table 11. Total assets turnover ratio between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Net sales (Million TL)	2131	2572	2105	2848	6895
Total assets (Million TL)	6240	6363	6496	10787	14457
Total assets turnover ratio	0,34	0,41	0,32	0,26	0,48

When examining the company's asset turnover ratios, it is observed that the ratios remained below 2 over the years, indicating low efficiency. This suggests that the company has not been using its assets efficiently, resulting in low productivity. Profitability is the ultimate outcome, and profitability ratios provide information on how effectively the company is managed.

The company's profitability has been measured from equity, sales, and assets. Equity profitability is measured using the return on equity ratio, sales profitability is measured using the gross profit margin, operating profit margin, and net profit margin ratios, and asset profitability is measured using the return on assets ratio.

The return on equity ratio is obtained by dividing net profit by average equity. This ratio, which indicates the profitability of equity, is calculated to determine how efficiently and effectively the values allocated to the company by its shareholders are being utilized [19]. Table 12 presents the company's return on equity ratios for the relevant years.

Table 12. Return on equity ratio between 2018-2022

Years	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Net profit (Million TL)		-925	-1087	-1333	-1641	-2511
Equity (Million TL)	4368	3444	5838	4523	9382	12993
Average equity (Million TL)		3906	4641	5180,5	6952,5	11187
Return on equity ratio		-0,24	-0,23	-0,26	-0,24	-0,22

When examining the company's return on equity ratio, it is observed that due to the company's losses over the years, the return on equity ratio has also been negative, indicating losses. Despite an increase in equity over the years, the increase in losses has resulted in similar ratios. This indicates that the values allocated to the company have not been used efficiently and effectively.

The gross profit margin is calculated by dividing gross profit by net sales. The operating profit margin, which shows profitability from operations, is used to measure the profitability of the company's core activities. This ratio is calculated by dividing operating profit by net sales. The net profit margin indicates the profit obtained from net sales. A higher ratio is interpreted as favorable for the company, indicating efficiency. Table 13 presents the company's gross profit margin for the relevant years, Table 14 presents the operating profit margin, and Table 15 presents the net profit margin.

Table 13. Gross sales profit margin between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Gross sales profit (Million TL)	-701	-815	-917	-1392	-1962
Net sales (Million TL)	2131	2572	2105	2848	6895
Gross sales profit margin	-0,33	-0,32	-0,44	-0,49	-0,28

When examining the company's gross profit margin, it is evident that the cost of goods sold and services exceeds the net sales revenue over the years, resulting in a negative gross profit margin and indicating that the company is experiencing losses.

Table 14. Operating profit margin between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Operating profit (Million TL)	-879	-1109	-1355	-1709	-2651
Net sales (Million TL)	2131	2572	2105	2848	6895
Operating profit margin	-0,41	-0,43	-0,64	-0,60	-0,38

When examining the company's operating profit margin, the negative gross profit margin over the years, combined with operating expenses, results in a negative operating profit, indicating an operating loss. The decreasing trend in the operating profit margin suggests a decline in the profitability and efficiency of the company's core operations.

Table 15. Net profit margin between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Net profit (Million TL)	-925	-1087	-1333	-1641	-2511
Net sales (Million TL)	2131	2572	2105	2848	6895
Net profit margin	-0,43	-0,42	-0,63	-0,58	-0,36

When examining the company's net profit margin, it is observed that period losses have increased over the years. Despite a positive trend in the net profit margin in the last two years, the margin has remained negative. Generally, it can be said that the company has been in a negative situation in terms of profitability, but the level of negativity has decreased in recent years.

The return on assets ratio is calculated to determine whether assets are effectively utilized for business profitability. Table 16 presents the return on assets.

Table 16. Return on assets between 2018-2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Net profit (Million TL)	-925	-1087	-1333	-1641	-2511
Total assets (Million TL)	6240	6363	6496	10787	14457
Return on assets ratio	-0,15	-0,17	-0,21	-0,15	-0,17

The company's total assets profitability ratios decreased from 2018 to 2020. Although there was an upward trend in 2021, the ratio declined again in 2022. Despite the company's significant assets over the years, the negative net profit margin has resulted in low active profitability ratios.

In the final stage of the company's financial analysis, DuPont analysis has been conducted for each year covered by the analysis. DuPont analysis is a method used to examine a company's financial performance in more detail. Developed by DuPont Corporation in the 1920s, it derives its name from there. This analytical method breaks down a company's return on equity (ROE) into three main components: net profit margin, asset turnover ratio, and financial leverage. DuPont analysis is formulated as follows:

$$\text{Return on equity} = \frac{\text{Net profit}}{\text{Equity}} = \frac{\text{Net profit}}{\text{Sales}} \times \frac{\text{Sales}}{\text{Total assets}} \times \frac{\text{Total assets}}{\text{Sales}} \quad (1)$$

The multiplication of these three components determines the company's return on equity (ROE). DuPont analysis is used to understand how each of these components affects the company's financial performance. For instance, if a company has a low return on equity, DuPont analysis can help determine whether this is due to a low net profit margin, low asset turnover ratio, or low financial leverage ratio. This enables management to make strategic decisions to improve in these areas. Due to reporting losses each year during the analysis period, the company records negative values for return on equity. The analysis results for each year show similarities due to this

consistent reason. The DuPont analysis for the year 2022 is as follows and is shown in detail in Figure 3:

$$\text{Net profit margin} = \frac{\text{Net profit}}{\text{Sales}} = -0,36 \quad (2)$$

$$\text{Total assets turnover} = \frac{\text{Sales}}{\text{Total assets}} = 0,48 \quad (3)$$

$$\text{Financial leverage} = \frac{\text{Total assets}}{\text{Equity}} = 1,11 \quad (4)$$

$$\text{Return on equity} = -0,36 \times 0,48 \times 1,11 = -0,19 \quad (5)$$

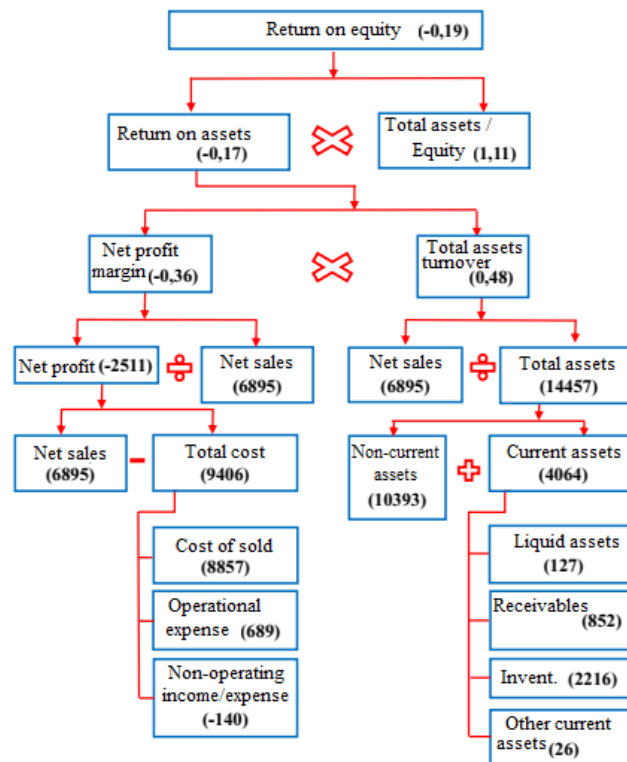


Figure 3. DuPont analysis of TCDD Transportation Inc. for 2022

The return on assets has been calculated as -0.17%. Due to the negative return on assets at -0.17%, it is impossible to discuss either return on equity or return on assets for the company. The company should reduce expenses to improve sales profitability to increase return on assets. By increasing sales profitability, the company can subsequently enhance return on equity and return on assets by increasing financial leverage or asset turnover ratio. Equity comprises 89% of the total, and 0.19% constitutes equity profitability, which is lower than the -0.17% return on assets. Therefore, the company can improve return on equity by increasing sales profitability to enhance net profit, effectively utilizing assets to increase asset turnover ratio, and leveraging financial leverage.

4. Conclusion

This study examined TCDD Transportation Inc.'s financial statements and ratios for the years 2018-2022 to evaluate the company's financial position and performance. The analyses in this paper are limited to the data obtained from the financial statements of the case company.

The company's total assets showed a steady increase over the five-year period. Current assets increased by over 250% from 2018 to 2022, while fixed assets also experienced significant growth. The high level of equity indicates that the company has a strong financial structure. However, the high short-term liabilities increase the company's short-term debt repayment risk.

Liquidity ratios assess the company's ability to pay its short-term debts. The acid-test ratio was low at 0.22 in 2018 but exceeded 1 in 2019 and 2021, indicating an improvement in the company's ability to pay short-term debts. Total debt ratios remained below 50%, indicating the company is effectively managing its debts.

Activity ratios such as inventory turnover accounts receivable turnover, and accounts payable turnover were analyzed. Inventory turnover fluctuated from 2018 to 2022 but showed an increasing trend in 2021 and 2022. Accounts receivable turnover increased to 8.46 in 2022, indicating a shorter collection period for the company's receivables. Accounts payable turnover also increased to 7.98 in 2022, demonstrating the company's ability to pay its debts quickly.

The company's profitability ratios showed negative values. Return on equity, gross profit margin, and operating profit margin indicated losses over the years. However, there has been a reduction in the level of negativity in net profit margin ratios in recent years.

The 2022 DuPont analysis revealed that the company's return on equity was negative and highlighted the need for the company to reduce expenses to increase sales profitability and improve its financial performance. Increasing asset turnover and financial leverage ratios could positively impact return on equity.

The results of TCDD Transportation Inc.'s financial analysis indicate that the company's financial structure is generally sound, but improvements are needed in specific areas. Enhancing operational efficiency and implementing effective cost-control measures could further enhance the company's financial performance. Additionally, attention to managing short-term debts and increasing sales profitability could contribute to the company's long-term sustainability. These findings could play a significant role in the company's strategic planning processes and help achieve future growth and development goals.

Acknowledgment

This study is derived from Hüseyin ARI's master's thesis. This study was supported by Eskişehir Technical University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project Number: 24LÖT077).

References

- [1] Ö. Akgüç, *Mali tablolar analizi*. İstanbul, Türkiye: Avcıol Basım Yayın, 2011
- [2] S. Schmidgall & A. Defranco, "Ratio analysis: Financial benchmarks for the club industry," *Journal of Hospitality Financial Management*, vol. 12, no. 1, pp. 1-14, 2004. doi: 10.1080/10913211.2004.10653782
- [3] A. Borodin, I. Mityushina, E. Streltsova, A. Kulikov, I. Yakovenko & A. Namitulina, "Mathematical modeling for financial analysis of an enterprise: Motivating of not open innovation," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 7, no. 1, p. 79, 2021. doi: 10.3390/joitmc7010079
- [4] B. Rees, *Financial analysis*. Hertfordshire, United Kingdom: Prentice Hall, 1995
- [5] G. Friedlob, & L. Schleifer, *Essentials of financial analysis* (Vol. 23). New York, United States of America: John Wiley & Sons, 2003

- [6] K. R. Subramanyam, *Financial statement analysis*. New York, United States of America: McGraw-Hill, 2014
- [7] R. Kaufmann, A. Gadmer & R. Klett, "Introduction to dynamic financial analysis," *ASTIN Bulletin: The Journal of the IAA*, vol. 31, no. 1, pp. 213-249, 2001. doi: 10.2143/AST.31.1.1003
- [8] R. C. Higgins, *Analysis for financial management*. New York, United States of America: McGraw-Hill, 2016
- [9] L. Revsine, D. W. Collins & W. B. Johnson, *Financial reporting & analysis*. New York, United States of America: McGraw-Hill, 2021
- [10] F. J. Fabozzi, & P. P. Peterson, *Financial management and analysis* (Vol. 132). New York, United States of America: John Wiley & Sons, 2003
- [11] A. C. Lee, J. C. Lee & C. F. Lee, *Financial analysis, planning and forecasting: Theory and application*. Singapore City, Singapore: World Scientific Publishing Company, 2009
- [12] A. Çabuk, & İ. Lazol, *Mali tablolar analizi*. Bursa, Türkiye: Ekin Basım Yayın Dağıtım, 2012
- [13] A. A. Karagül, *Oran Analizi*. S. Önce (Ed.) Mali Analiz içinde (s. 69-95). Eskişehir, Türkiye: Anadolu Üniversitesi Yayınları, 2019
- [14] H. Bakır & C. Şahin, *Yöneticiler için finansal tablolar analizi*. Ankara, Türkiye: Detay Yayıncılık, 2009
- [15] S. Bektöre, F. Çömlekçi & H. Sözbilir, *Mali Tablolar Analizi*. Eskişehir Türkiye: Nisan Kitabevi, 2013
- [16] Ü. Gücenme, *Mali tablolar analizi ve enflasyon muhasebesi*. (5. baskı). İstanbul, Türkiye: Aktüel Yayınları, 2005
- [17] M. S. Fridson & F. Alvarez, *Financial statement analysis: a practitioner's guide*. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 2022
- [18] A. Çabuk, *Finansal analiz teknikleri*. S. Önce (Ed.), Finansal tablolar analizi içinde (s. 46-79). Eskişehir, Türkiye: Anadolu Üniversitesi Yayınları, 2019
- [19] T. R. Robinson, E. Henry, W. L. Pirie & M. A. Broihahn, *International financial statement analysis* (Vol. 39). New York, United States of America: John Wiley & Sons, 2012.

Resume



Hüseyin ARI

He was born in Eskişehir in 1978. He completed his undergraduate education in 2001 in the Department of Mechanical Engineering at Pamukkale University. He has served as an executive in various provinces within the General Directorate of Security. He is currently working at the Eskişehir Police Department. He is pursuing his master's degree in the Department of Rail Systems Engineering at Eskişehir Technical University. His research interests include rail systems, logistics, and financial analysis.

E-mail: ari_huseyin@hotmail.com



Ahmet ONAY

He completed his high school education at Malatya Anatolian High School, his undergraduate education at Erciyes University, and his doctoral education at Anadolu University. He worked as a research assistant at Anadolu University from 2013 to 2018 and has been an academic staff member at Eskişehir Technical University since 2018. His research areas include logistics, auditing, financial accounting, international financial reporting standards, sustainability reporting, and accounting education.

E-mail: ahmet_onay@eskisehir.edu.tr

Ethics Statement:

Authors confirm that the article is original, there is no plagiarism issue.

Contribution of authors: Hüseyin ARI: Conceptualization, Methodology, Writing-Original draft preparation. Ahmet ONAY: Supervision, Writing- Reviewing and Editing.



Raylı Araçlarda Kullanılan Auxetic ve Bal Peteği Çekirdek Katmanlı Sandviç Plakaların Titreşim Analizi

Fatih PEHLİVAN*^{ID}, Kerim Gökhan AKTAŞ^{ID}

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

**fatihpehlivan@karabuk.edu.tr*

(Alınış/Received: 17.12.2024, Kabul/Accepted: 09.01.2025, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Bu makale, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine (FSDT) ve sonlu elemanlar metoduna (FEM) dayanan auxetic ve bal peteği çekirdek katmanına sahip sandviç plakaların serbest titreşim analizlerini sunmaktadır. Önerilen plakalar, demiryolu araç gövdelerinin yapımında en yaygın kullanılan malzemelerin başında gelen Al 6005A-T6 alüminyum alaşımdan yapılmış auxetic veya bal peteği çekirdek katmanı yine aynı alüminyum alaşımdan oluşturulmuş yüzey katmanları arasına yerleştirilmiştir. Sandviç plakaların hareket denklemleri için Hamilton prensibi kullanılmış ve çözümleri için ise Navier yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen çözümlerde iki farklı gözeneklilik yapısı, dört farklı gözeneklilik oranı, üç farklı en/boy oranı, üç farklı çekirdek katmanı/yükseklik oranı ve dört farklı sınır koşulları kullanılarak bu parametrelerin serbest titreşime etkileri incelenmiştir. Ele alınan gözeneklilik yapısı, gözeneklilik oranı, en/boy oranı, çekirdek katmanı/yükseklik oranı ve sınır koşulları sandviç plakanın dinamik davranışını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Serbest titreşim analizi, Sonlu elemanlar analizi, Auxetic yapı, Bal peteği yapısı, Sandviç plaka

Analysis of the Vibration of Sandwich Plates with Auxetic and Honeycomb Core Layers used in Rail Vehicles

Abstract: This paper presents free vibration analyses of sandwich plates with auxetic, and honeycomb core layers based on first order shear deformation theory (FSDT) and finite element method (FEM). The proposed plates are made of Al 6005A-T6 aluminum alloy, which is one of the most widely used materials in the construction of railway car bodies, and the auxetic or honeycomb core layer is placed between the surface layers made of the same aluminum alloy. Hamilton's principle is used for the equations of motion of the sandwich plates and Navier's method is applied for their solutions. Two different porosity structures, four different porosity ratios, three different aspect ratios, three different core layer/height ratios and four different boundary conditions were used in the solutions and the effects of these parameters on free vibration were analyzed. It is determined that the porosity structure, porosity ratio, aspect ratio, core layer/height ratio and boundary conditions significantly affect the dynamic behavior of the sandwich plate.

Keywords: Free vibration analysis, Finite element analysis, Auxetic structure, Honeycomb structure, Sandwich plate

1. Giriş

Geleneksel yüksek mukavemetli çelik, demiryolu araç gövdelerinin yapımında en yaygın kullanılan temel malzemedir. Ancak, demiryolu vagonlarında enerji tüketiminin ve tehlikeli gaz emisyonlarının sınırlandırılması gibi önemli kaygılar sektörü alternatif malzemelerin uygulanmasını araştırmaya itmiştir. Bu sorunlar, araç gövde ve şasileri için hafif tasarımlar geliştirilerek çözülebilir [1, 2]. Küresel demiryolu endüstrisi, trenlerin daha güvenilir, verimli ve daha fazla yolcu için daha fazla kapasiteye sahip olmasını talep etmektedir [3, 4]. Bu hedefleri yerine getirmek için, demiryolu araçlarının daha hafif malzemeler ile inşa edilmesi

Atıf için/Cite as: F. Pehlivan, K.G. Aktaş, "Raylı araçlarda kullanılan auxetic ve bal peteği çekirdek katmanlı sandviç plakaların titreşim analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 155-167, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1603016

gerekmektedir. Gözenekli malzemeden oluşan bir çekirdek katmana sahip sandviç yapıları malzemeler, raylı araçların toplam ağırlığını azaltmak için tercih edilen seçeneklerden biridir [5]. Alüminyum alaşımlı sandviç yapılar, son zamanlarda demiryolu endüstrisinde de kullanılmaya başlanmıştır [6]. Düşük ağırlık ve yüksek mukavemet sağlayan bu yapılar genellikle iki yüzey levhası arasına sıkıştırılmış çekirdek katmanından oluşmaktadır [6]. Alüminyum alaşımları, yakıt tüketimini azaltan ve dolayısıyla enerji kullanımını ve kirliliği azaltan hafif özellikleri nedeniyle demir yolu araç gövdelerinde kullanılmaktadır [7]. Alüminyum alaşımlı sandviç sistemler, klasik çelik konstrüksiyonlara göre önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlamakta ve yapısal standartlara uymaktadır [8]. Araştırmacılar, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve işleme kolaylığı gibi avantajlar sunan alüminyum alaşımlarının demir yolu araç gövdesi ve alt şasi gibi kritik bileşenler için uygulanabilirliğini araştırmışlardır [9]. Monolitik alüminyum alaşımlarının kullanımının yanında, alüminyum köpük, auxetic veya bal peteği çekirdeklerinin sandviç yapıya entegre edilmesinin, sistemin hafiflik ve enerji emme özelliklerini artıracığı düşünülmektedir [10]. Sandviç yapı, her bir malzemenin farklı özelliklerini etkin bir şekilde kullanarak hem hafif hem de sağlam bir tasarım ortaya çıkarmaktadır [11]. Genel olarak, raylı taşıt gövdelerinde alüminyum alaşımlı sandviç yapıların kullanılması, sektörün enerji tüketimini azaltma, emisyonları en aza indirme ve yolcu kapasitesini artırma hedefleri için etkili bir strateji olarak görünmektedir.

Raylı araçların dinamik performanslarını anlamak ve raylı araç gövdelerinin yapısal bütünlüğünü sağlamak için kullanılan alüminyum alaşımlı sandviç yapıların serbest titreşim davranışı oldukça önemlidir. Sandviç yapıların malzeme özellikleri ve çekirdek konfigürasyonu gibi faktörler serbest titreşim özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [12]. Araştırmacılar, raylı araç uygulamaları bağlamında sandviç yapıların serbest titreşim davranışını araştırmak için analitik yöntemler, sonlu elemanlar analizi ve deneysel yöntemler gibi çeşitli teknikler kullanmışlardır [13, 14]. Bu çalışmalar, hafif yapıların doğal frekansları, mod şekilleri ve sönümlenme özellikleri hakkında, tasarımın optimize edilmesi ve raylı araçların güvenli bir şekilde çalışmasının sağlanması için gerekli olan değerli bilgiler sağlamıştır.

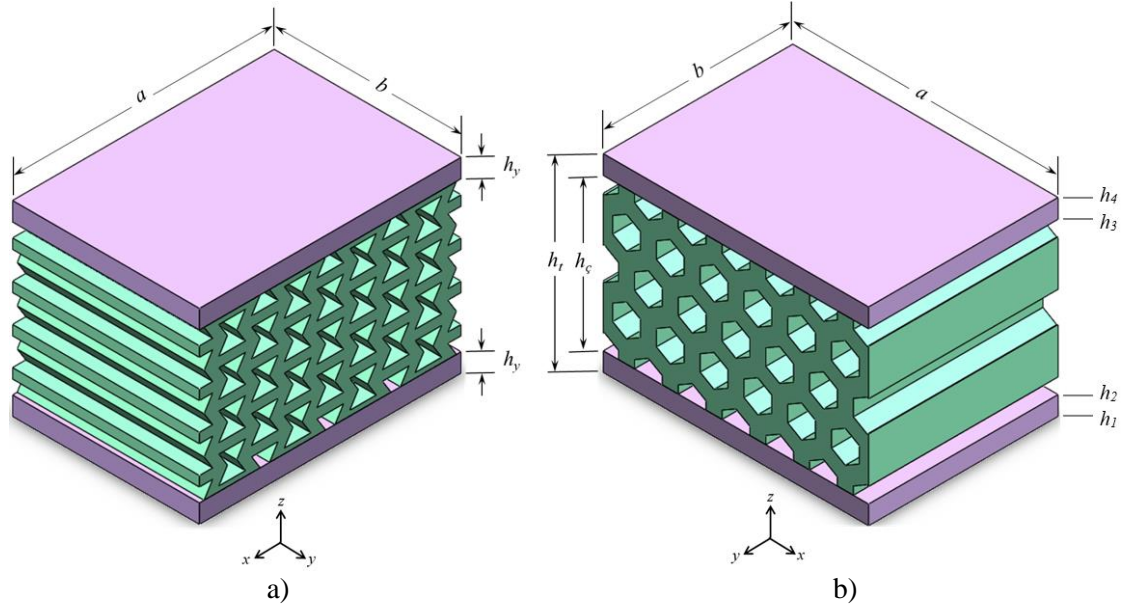
Demiryolu araç gövdelerinde kullanılan plakaların serbest titreşim analizlerinin incelenmesi üzerine çalışmalar olmasına rağmen, alüminyum alaşımlı gözenekli sandviç yapılardan oluşan plakaların analitik ve nümerik yöntemlerle dinamik özelliklerini inceleyen çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, demiryolu araç gövdelerinde kullanılan ve çekirdek katmanı auxetic veya bal peteği yapısından oluşan alüminyum alaşımlı sandviç plakaların doğal frekans üzerindeki etkisini araştırmaktır. Çalışmada belirtildiği üzere, plakanın titreşim tepkilerinin incelenmesinde FSDT ve FEM kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Elde edilen çözümlerde iki farklı gözeneklilik yapısı, dört farklı gözeneklilik oranı, üç farklı en/boy oranı, üç farklı çekirdek katmanı/yükseklik oranı ve dört farklı sınır koşulları kullanılarak bu parametrelerin serbest titreşimlere etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tüm bu parametrelerin demiryolu araç gövdelerinde kullanılan gözenekli sandviç plakaların doğal frekanslarını önemli derecede etkilediği gözlemlenmiştir.

2. Teorik Formülasyon

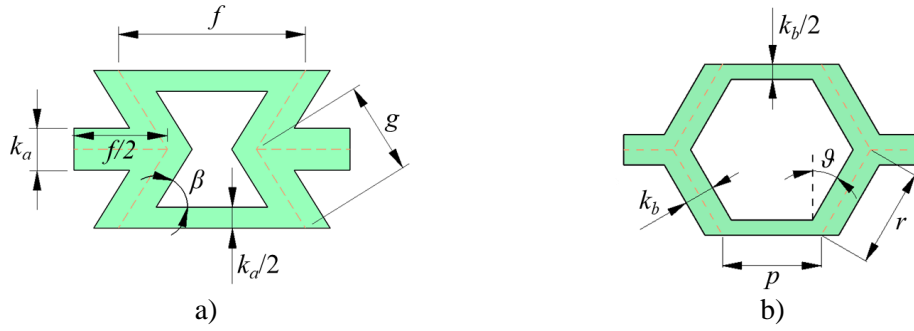
2.1. Önerilen sandviç plaka modelinin tanımlanması

Raylı sistem araçlarının dış duvar panellerinde, gözenekli çekirdek katmanlı sandviç plakaların kullanımının yapının serbest titreşim cevabına etkisinin incelenmesi için iki farklı tasarım sunulmuştur. Şekil 1.'de sunulduğu gibi, birinci model auxetic çekirdek katmanın iki metal alaşımlı plaka arasına sandviç edilmesinden oluşurken, ikinci model bal peteği çekirdek katmanlı sandviç edilmesinden oluşmaktadır. Her iki modelde de a , b , h_c ve h_y sırasıyla plakaların enini, boyunu, çekirdek katmanın yüksekliğini ve yüzey katmanların yüksekliğini ifade etmektedir.

Sandviç plakaların yüzey ve çekirdek katmanı için Al 6005A-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.



Şekil 1. Farklı çekirdek katmanlarına sahip sandviç plakaların şematik gösterimi a) Auxetic b) Bal peteği



Şekil 2. Çekirdek katmanlarının geometri yapısı a) Auxetic b) Bal peteği

2.2. Auxetic çekirdek plaka konfigürasyonu

Şekil 2.'de gösterildiği gibi sandviç plakanın çekirdek katmanı, eğim açısı (β), yatay duvar uzunluğu (f), duvar kalınlığı (k_a) ve eğimli duvar uzunluğu (g) parametreleri ile tanımlanan auxetic hücrelerin belirli bir düzende yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Auxetic katmanın tasarımında, hücrelerin geometrik parametreleri yapıdaki gözeneklilik oranı baz alınarak belirlenmiş ve bal peteği yapı ile aynı gözeneklilik oranına sahip olması sağlanmıştır. Auxetic çekirdek katmanın mekanik özellikleri aşağıdaki gibi hesaplanır [15, 16]:

$$E_{11}^{Aux} = E_{Al} \left[\frac{(\mathcal{F} - \sin \beta) \mathcal{M}^3}{[(\mathcal{F} \sec^2(\beta) + \tan^2(\beta)) \mathcal{M}^2 + 1] \cos^3(\beta)} \right] \quad (1)$$

$$E_{22}^{Aux} = E_{Al} \left[\frac{\mathcal{M}^3}{(\mathcal{M}^2 + \tan^2(\beta)) (\cos(\beta) \mathcal{F} - \cos(\beta) \sin(\beta))} \right] \quad (2)$$

$$G_{12}^{Aux} = G_{Al} \left[\frac{\mathcal{M}^3}{(2\mathcal{F}^2 + \mathcal{F}) \cos \beta} \right] \quad (3)$$

$$G_{13}^{Aux} = G_{Al} \left[\frac{2\sin^2(\beta) + \mathcal{F}}{2(\mathcal{F} - \sin(\beta))} + \frac{-\sin(\beta) + \mathcal{F}}{2\mathcal{F} + 1} \right] \frac{\mathcal{M}}{2\cos(\beta)} \quad (4)$$

$$G_{23}^{Aux} = G_{Al} \left[\frac{\mathcal{M} \cos(\beta)}{\mathcal{F} - \sin(\beta)} \right] \quad (5)$$

$$\rho^{Aux} = \rho_{Al} \left[\frac{(2 + \mathcal{F})\mathcal{M}}{2(\mathcal{F} - \sin(\beta)) \cos(\beta)} \right] \quad (6)$$

$$v_{12}^{Aux} = \frac{(\sin(\beta) - \mathcal{F})(\sin(\beta))(1 - \mathcal{M}^2)}{\cos^2(\beta) [\mathcal{M}^2 (\mathcal{F} \sec^2(\beta) + \tan^2(\beta)) + 1]} \quad (7)$$

$$v_{21}^{Aux} = \frac{(\mathcal{M}^2 - 1) \sin(\beta)}{(\mathcal{F} - \sin(\beta)) (\mathcal{M}^2 + \tan^2(\beta))} \quad (8)$$

burada $\mathcal{F} = f/g$ ve $\mathcal{M} = k_a/g$ olarak tanımlanmıştır.

2.3. Bal peteği çekirdek plaka konfigürasyonu

Ele alınan bal peteği çekirdek katmanı altıgen petek hücrelerinin çeşitli konfigürasyonlarda yerleştirilmesi ile oluşmaktadır. Her bir hücre duvar kalınlığı (k_b), eğim açısı (ϑ), eğimli kenar uzunluğu (r) ve yatay kenar uzunluğu (p) parametreleri ile tanımlanmaktadır. Bal peteği çekirdek katmanı mekanik malzeme özellikleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{11}^{Bp} = \frac{E_{Al} \mathcal{U}^3 \cos \vartheta}{(\mathcal{T} + \sin \vartheta) \sin^2 \vartheta} [1 - \mathcal{U}^2 \cot^2 \vartheta] \quad (9)$$

$$E_{22}^{Bp} = \frac{E_{Al} \mathcal{U}^3 (\mathcal{T} + \sin \vartheta)}{\cos^3 \vartheta} [1 - \mathcal{U}^2 (\mathcal{T} \sec^2 \vartheta + \tan^2 \vartheta)] \quad (10)$$

$$G_{12}^{Bp} = \frac{G_{Al} \mathcal{U}^3 (\mathcal{T} + \sin \vartheta)}{\mathcal{T}^2 (1 + 2\mathcal{T}) \cos \vartheta} \quad (11)$$

$$G_{13}^{Bp} = \frac{G_{Al} \mathcal{U} \cos \vartheta}{\mathcal{T} + \sin \vartheta} \quad (12)$$

$$G_{23}^{Bp} = \frac{G_{Al} \mathcal{U}}{2\cos \vartheta} \left[\frac{\mathcal{T} + \sin \vartheta}{(1 + 2\mathcal{T}) \cos \vartheta} + \frac{\mathcal{T} + 2\sin^2 \vartheta}{2(\mathcal{T} + \sin \vartheta)} \right] \quad (13)$$

$$v_{12}^{Bp} = \frac{\cos^2 \vartheta}{(\mathcal{T} + \sin \vartheta) \sin \vartheta} [1 - \mathcal{U}^2 \csc^2 \vartheta] \quad (14)$$

$$v_{21}^{Bp} = \frac{(\mathcal{T} + \sin \vartheta) \sin \vartheta}{\cos^2 \vartheta} [1 - \mathcal{U}^2 (1 + \mathcal{T}) \sec^2 \vartheta] \quad (15)$$

$$\rho^{Bp} = \frac{\rho_{Al} \mathcal{U} (\mathcal{T} + 2)}{2 \cos \vartheta (\mathcal{T} + \sin \vartheta)} \quad (16)$$

burada $\bar{U} = k_b/r$ ve $\bar{\gamma} = p/r$ olarak tanımlanmıştır.

2.4. Şekil değiştirme ve yer değiştirme

FSDT'ye dayanarak, lokal eksenlerde (x, y, z) plaka elemanının herhangi bir noktasındaki yer değiştirme alanı (u, v, w) aşağıdaki gibi tanımlanabilir [17]:

$$\begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ u_2(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ u_3(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (17)$$

burada u_1, u_2 ve u_3, x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeleri temsil etmektedir. u_0, v_0, w_0, ϕ_x ve ϕ_y sırasıyla orta düzlemin yer değiştirmeleri ve y eksenine ile x eksenine etrafındaki dönme açılardır. Denklem 17.'den normal (ε) ve kayma gerilmeleri (γ) aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial y} = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + z \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

2.5. Bünye denklemleri

Klasik elastisite teorisinde gerilme aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

burada Q_{ii} aşağıdaki gibi tanımlanabilen direngenlik katsayılarıdır [18]:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}^2}; \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}^2}; \quad Q_{12} = \nu_{12} Q_{22}; \\ Q_{44}(z) &= G_{23}; \quad Q_{55} = G_{13}; \quad Q_{66} = G_{12}; \end{aligned} \quad (20)$$

2.6. Hamilton prensibi ile hareket denklemlerinin elde edilmesi

Sandviç plakanın serbest titreşim denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (21)$$

burada δT , δU ve δW sırasıyla kinetik enerjinin, şekil değiştirme enerjisinin ve dış yük tarafından yapılan işin birinci varyasyonunu gösterir. δU ile temsil edilen şekil değiştirme enerjisi şu şekilde elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \delta U = & \int_{\Omega} \left[\int_{h_1}^{h_2} (\sigma_{xx}^y \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^y \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^y \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^y \delta \gamma_{xz} + \sigma_{xy}^y \delta \gamma_{xz}) dz \right. \\ & + \int_{h_2}^{h_3} (\sigma_{xx}^c \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^c \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^c \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^c \delta \gamma_{xz} \\ & + \sigma_{xy}^c \delta \gamma_{xz}) dz + \int_{h_3}^{h_4} ((\sigma_{xx}^y \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^y \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^y \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^y \delta \gamma_{xz} \\ & \left. + \sigma_{xy}^y \delta \gamma_{xz}) dz) \right] dx dy \quad (22) \end{aligned}$$

Kuvvet (N_{ij}) ve moment (M_{ij}) bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$N_{ij} = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_{ij}^y dz + \int_{h_2}^{h_3} \sigma_{ij}^c dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_{ij}^y dz \quad (i = x, y; j = x, y, z) \quad (23)$$

$$M_{ij} = \int_{h_1}^{h_2} z \sigma_{ij}^y dz + \int_{h_2}^{h_3} z \sigma_{ij}^c dz + \int_{h_3}^{h_4} z \sigma_{ij}^y dz \quad (i, j = x, y) \quad (24)$$

Denklem 23. ve Denklem 24.'ün, Denklem 22.'de yerine yazılması ve kısmi integrasyonu ile, şekil değiştirme enerjisinin kuvvet (N_{ij}) ve moment (M_{ij}) bileşenleri cinsinden ilk varyasyonu aşağıdaki gibi elde edilecektir:

$$\begin{aligned} \delta U = & \iint_A \left[\left(\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \right) \delta u_0 + \left(\frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) \delta v_0 \right. \\ & + \left(\frac{\partial N_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xz}}{\partial x} \right) \delta w_0 + \left(\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + N_{xz} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) \delta \phi_x \\ & \left. + \left(\frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + N_{yz} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} \right) \delta \phi_y \right] dA \quad (25) \end{aligned}$$

Hamilton prensibinin kinetik enerji bileşeninin varyasyonu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \delta T = & \int_{\Omega} \left[\int_{h_1}^{h_2} \rho^y (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz + \int_{h_2}^{h_3} \rho^c (z) (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz \right. \\ & \left. + \int_{h_3}^{h_4} \rho^y (z) (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz \right] dx dy \quad (26) \end{aligned}$$

Denklem 17.'deki u_1 , u_2 ve u_3 fonksiyonlarının Denklem 26.'da yerine yazılması ve ardından elde edilen denklemin integralinin alınması ile δT 'nin nihai formu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \delta T = \iint_A \left[\left(I_0 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \right) \delta u_0 + \left(I_0 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \right) \delta v_0 \right. \\ \left. + \left(I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \right) \delta w_0 + \left(I_1 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_2 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \right) \delta \phi_x \right. \\ \left. + \left(I_1 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_2 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \right) \delta \phi_y \right] dA \end{aligned} \quad (27)$$

$$(I_0, I_1, I_2) = \int_{h_1}^{h_2} (1, z, z^2) \rho^y dz + \int_{h_2}^{h_3} (1, z, z^2) \rho^c dz + \int_{h_3}^{h_4} (1, z, z^2) \rho^y(z) dz \quad (28)$$

Dış yüklerin plaka üzerindeki sanal işleri Denklem 29. ile elde edilir.

$$\delta W = \int_A \left[N_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right] \delta w_0 dA \quad (29)$$

Denklem 25., Denklem 27. ve Denklem 29.'daki δU , δT ve δW 'nin Denklem 21.'de yerine yazılmasıyla, sandviç plakanın diferansiyel denklemleri elde edilir.

2.7. Hareket denklemlerinin çözüm prosedürü

Bu çalışma ile, önerilen auxetic çekirdek katmanlı ve pal peteği çekirdek katmanlı sandviç yapıların serbest titreşim cevabının elde edilmesinde sonlu elemanlar yöntemi ve Navier yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem sunulmuştur. Nümerik çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar analizi için ANSYS yazılımı kullanılırken, analitik Navier yöntemi için Matlab yazılımı kullanılmıştır. Sandviç yapının titreşim cevabının elde edilmesinde basit mesnet (S), ankastre mesnet (C) ve serbest uç (F) olmak üzere üç farklı sınır koşulunun çeşitli varyasyonları tercih edilmiştir. Navier yaklaşımı kullanılarak, yer değiştirme bileşenleri çeşitli sınır koşulları dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir [19, 20]:

$$\begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \phi_x \\ \phi_y \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \begin{pmatrix} U_{mn} X'_m(x) Y_n(y) e^{i\omega_n t} \\ V_{mn} X_m(x) Y'_n(y) e^{i\omega_n t} \\ W_{mn} X_m(x) Y_n(y) e^{i\omega_n t} \\ \phi_{xmn} X'_m(x) Y_n(y) e^{i\omega_n t} \\ \phi_{ymn} X_m(x) Y'_n(y) e^{i\omega_n t} \end{pmatrix} \quad (30)$$

burada U_{mn} , V_{mn} , W_{mn} , θ_{xmn} ve θ_{ymn} yer değiştirme katsayılarını ifade etmektedir. Sandviç plakanın farklı sınır koşulları için X_m ve Y_n fonksiyonları Tablo 1.'de sunulmuştur. Ayrıca, ω_n doğal frekansı ifade etmektedir.

Denklem 30.'daki yer değiştirme değişkenleri matris olarak Denklem 31.'deki gibi yazılabilir.

$$\{\Delta\} = [U_{mn} \quad V_{mn} \quad W_{mn} \quad \theta_{xmn} \quad \theta_{ymn}]^T \quad (31)$$

Tablo 1. Plakanın farklı sınır koşulları için X_m ve Y_n fonksiyonları [20]

Sınır koşulları (SK)	X_m ve Y_n fonksiyonları
----------------------	------------------------------

	$x = 0, a$	$y = 0, b$	X_m	Y_n
SSSS	$X_m(0) = X_m''(0) = 0$ $X_m(a) = X_m''(a) = 0$	$Y_n(0) = Y_n''(0) = 0$ $Y_n(b) = Y_n''(b) = 0$	$\sin(\lambda x)$	$\sin(\eta y)$
SSCC	$X_m(0) = X_m''(0) = 0$ $X_m(a) = X_m'(a) = 0$	$Y_n(0) = Y_n''(0) = 0$ $Y_n(b) = Y_n'(b) = 0$	$\sin(\lambda x)$	$\sin^2(\eta y)$
CCCC	$X_m(0) = X_m''(0) = 0$ $X_m(a) = X_m'(a) = 0$	$Y_n(0) = Y_n''(0) = 0$ $Y_n(b) = Y_n'(aB) = 0$	$\sin^2(\lambda x)$	$\sin^2(\eta y)$
CSCS	$X_m(0) = X_m'(0) = 0$ $X_m(a) = X_m''(a) = 0$	$Y_n(0) = Y_n'(B) = 0$ $Y_n(b) = Y_n''(B) = 0$	$\sin(\lambda x)[\cos(\lambda x) - 1]$	$\sin(\eta y)[\cos(\eta y) - 1]$

Burada $\lambda = \frac{m\pi}{a}$ ve $\eta = \frac{n\pi}{b}$ olarak tanımlanmıştır. Sandviç plakanın serbest titreşimi için hareket denklemleri düzenlenerek matris ve vektör gösterimi ile aşağıdaki gibi türetilir:

$$\{[K] - \omega_{mn}^2[M]\}\{\Delta\} = 0 \quad (32)$$

burada $[K]$ ve $[M]$ sırasıyla direngenlik ve kütle matrisini ifade etmektedir.

3. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, auxetic ve bal peteği çekirdek katmanlı sandviç plakaların serbest titreşim analizi gözeneklilik oranı, en/boy oranı, kalınlık oranı ve kenar sınır koşulları parametreleri ile hem analitik hem de nümerik yöntemle incelenmiştir. Hem analitik hem de nümerik yöntemin kullanılması, uygulanan yöntemin doğruluğunun tespit edilmesine yardımcı olmuştur. Auxetic ve bal peteği çekirdek katmanlarının gözenek oranı aynı olacak şekilde tasarımları yapılmıştır. Böylelikle tasarımların sandviç yapının doğal frekansına etkisinin daha efektif şekilde karşılaştırılması sağlanmıştır. Analiz çalışmalarında, plakanın geometrik parametreleri $a = b = 0,1$ m, $h_t = a/10$, $h_c = 0,8h$ ve $h_y = 0,1h$ olarak alınmıştır. Burada h_t sandviç plakanın toplam kalınlığını ifade etmektedir ve $h_t = h_c + 2h_y$ ile hesaplanır. Sandviç plakanın hem çekirdek katmanında hem de yüzey katmanlarında raylı sistem araçlarında tercih edilen Al 6005A-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri Tablo 2. ile sunulmuştur.

Tablo 2. Al 6005A-T6'nın mekanik özellikleri [21]

Malzeme	Young Modülü (E)	Poisson oranı (ν)	Yoğunluk (ρ)
Al 6005A-T6	69 GPa	0,33	2700 kg/m ³

3.1. Serbest titreşim analizi

Bu bölümde, auxetic ve bal peteği çekirdekli sandviç plakaların ilk altı titreşim modu için doğal frekans değerlerinin değişimi dört farklı gözeneklilik oranı ($\alpha = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$), dört farklı sınır koşulu (CCCC, CFFF, CFCF ve SSSS), üç farklı en/boy oranı ($a/b = 0,5; 1; 2$) ve üç farklı çekirdek katmanı/yükseklik oranı ($h_c/h_t = 0,6; 0,7; 0,8$) dikkate alınarak hem FEA metodu hem de Navier metodu ile incelenmiştir. Çekirdek katmanların tasarımında gözenek oranı temel parametre olarak ele alınmış, böylelikle her iki modelde de gözenek oranı aynı olacak şekilde auxetic ve bal peteği hücrelerinin geometrik parametreleri belirlenmiştir. Tablo 3., önerilen sandviç plakanın ilk üç titreşim modu serbest titreşim cevabının çekirdek tipi ve gözenek oranına göre değişimini analitik ve nümerik sonuçlar ile göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere, auxetic çekirdek tipi için ilk üç titreşim moduna ait doğal frekans değerleri, $\alpha = 0,3$ ile $\alpha = 0,5$

arasında %7,76 oranında artış göstermiş, ancak $\alpha = 0,5$ 'ten $\alpha = 0,6$ 'ya kadar %21,11 oranında azalma kaydetmiştir. Bal peteği çekirdek tipinde ise doğal frekans değerleri $\alpha = 0,3$ ile $\alpha = 0,4$ arasında %5,77 oranında artış göstermiş, ancak $\alpha = 0,4$ 'ten $\alpha = 0,6$ 'ya kadar %7,62 oranında azalma kaydetmiştir. Doğal frekanstaki bu artış ve azalış auxetic çekirdekte $\alpha = 0,5$ 'e kadar, bal peteğinde ise $\alpha = 0,4$ 'e kadar sandviç yapının kütlelesinin direngenlik katsayısına göre daha fazla azalması ve bu noktalardan sonra direngenliğin hızlı bir şekilde azalmasıdır. Aynı gözeneklilik oranları dikkate alındığında bal peteği çekirdek tipinde daha yüksek doğal frekans değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, FEA ve Navier çözümünden elde edilen değerler kıyaslandığında sonuçların oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3. Sandviç plakanın doğal frekans değerlerinin çekirdek tipi ve gözeneklilik oranına göre değişimi ($a/b=1$; $h_c/h_t=0,8$; CCCC)

Çekirdek tipi	α	w_n (Hz)					
		Mod 1		Mod 2		Mod 3	
		FEA	FSDT	FEA	FSDT	FEA	FSDT
Auxetic	0,3	6736,4	6738,7	10334	10337,3	13688	13694,2
	0,4	6930,8	6933,9	11055	11058,8	13833	13839,7
	0,5	7259,3	7264,2	12023	12028,3	14065	14072,6
	0,6	5726,7	5729,4	7319,4	7325,8	9537,4	9531,1
Bal Peteği	0,3	7814,3	7816,5	14365	14369,4	14931	14938,3
	0,4	8265,3	8268,9	15184	15188,8	15557	15563,7
	0,5	7994,8	7997,2	14515	14521,4	14882	14891,0
	0,6	7635,1	7638,0	12948	12955,9	14439	14460,3

Tablo 4. Sandviç plakanın doğal frekans değerlerinin sınır koşulları ve çekirdek tipine göre değişimi ($\alpha=0,4$; $a/b=1$; $h_c/h_t=0,8$)

SK	Çekirdek tipi	w_n (Hz)					
		Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
CCCC	Auxetic	6930,8	11055	13833	16451	16940	21410
	Bal Peteği	8265,3	15184	15557	21254	24469	25385
CFFF	Auxetic	897,9	1887,6	4646,8	4998,6	5648,1	6549,4
	Bal Peteği	947,6	1982,8	5010,1	5085,5	6075,5	6916,2
CFCF	Auxetic	5151,3	5758,9	8475,3	11472	12596	13301
	Bal Peteği	5207,8	5920,9	9136,7	12844	12917	13728
SSSS	Auxetic	1324,4	1941,5	2416,6	3116,1	8009,12	8332,3
	Bal Peteği	1551,4	2529,1	3455,6	4384,8	10016	10722

Sandviç plakanın ilk altı titreşim modunun serbest titreşim cevabının farklı sınır koşulları ve çekirdek tipine göre değişimi Tablo 4.'de sunulmuştur. Tablodan görüldüğü gibi her iki çekirdek tipi doğal frekans değerleri sınır koşullarından önemli derecede etkilenmektedir. En büyük doğal frekans değerleri CCCC sınır koşulları ile elde edilirken, en düşük doğal frekans değerleri CFFF sınır koşulu için elde edilmiştir. Birinci doğal frekans değerleri incelendiğinde, auxetic yapıda CCCC ve CFFF sınır koşulları arasındaki azalma miktarının %87,04, bal peteği yapısında ise %88,53 olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bal peteği ve auxetic çekirdek tipleri karşılaştırıldığında

CFFF sınır koşulunda doğal frekans değerlerinin oldukça yakın olduğu, CCCC sınır koşulunda ise farkın arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 5., sandviç plakanın doğal frekans değerlerinin çekirdek tipine ve plakanın en/boy oranına göre değişimini CFFF sınır koşullarına göre incelenmesini sunmaktadır. Üç farklı en/boy oranına göre sandviç plakanın ilk altı titreşim modu doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, en/boy oranı 0,5'ten 2'ye yükseldiğinde, doğal frekans auxetic çekirdek için 194,0'dan 3475,4'e, bal peteği çekirdek için ise 224,5'ten 3488,4'e artmıştır. Bu artışın sebebi artan en/boy oranı ile plakanın özellikle eğilme direngenliğinin önemli derecede artmasıdır. Tablodan $a/b = 0,5$ ve $a/b = 2$ değerleri için doğal frekanslardaki artış incelendiğinde, özellikle Mod 1 doğal frekans değerlerindeki artışın diğer modlara göre çok daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5. Sandviç plakanın doğal frekans değerlerinin çekirdek tipi ve en/boy oranına göre değişimi ($\alpha=0,4$; SK=CFFF; $h_c/h_t=0,8$)

Çekirdek tipi	a/b	w_n (Hz)					
		Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
Auxetic	0,5	194,0	836,3	1374,2	1644,4	2678,6	3720,8
	1	897,9	1887,6	4646,8	4998,6	5648,1	6549,4
	2	3475,4	4574,9	7735,2	10879	12718	17026
Bal Peteği	0,5	224,5	872,3	1373,6	1706,2	2814,3	3734,9
	1	947,6	1982,8	5010,1	5085,5	6075,5	6916,2
	2	3488,4	4832,7	8491,5	12091	14948	17393

Tablo 6. Sandviç plakanın doğal frekans değerlerinin çekirdek tipi ve kalınlık oranına göre değişimi ($\alpha=0,4$; $a/b=1$; SK=CFFF)

Çekirdek tipi	h_c/h_t	w_n (Hz)					
		Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
Auxetic	0,6	853,5	1996,5	4911,5	5112,2	6042,6	6773,2
	0,7	879,3	1932,1	4878,5	5022,6	5876,2	6649,8
	0,8	897,9	1887,6	4646,8	4998,6	5648,1	6549,4
Bal Peteği	0,6	912,6	2076,3	5128,5	5213,3	6471,1	7168,2
	0,7	923,6	2054,5	5067,1	5199,7	6431,9	7075,9
	0,8	947,6	1982,8	5010,1	5085,5	6075,5	6916,2

Sandviç plakanın ilk altı titreşim modu serbest titreşim cevabının kalınlık oranı ve çekirdek tipine göre değişimi Tablo 6.'da sunulmuştur. Tablodan görüldüğü üzere, çekirdek katmanının yüksekliğinin artmasıyla, birinci titreşim modunun doğal frekansı auxetic çekirdek için yaklaşık %5, bal peteği çekirdek için ise yaklaşık %4 oranında artış göstermiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bal peteği ve auxetic çekirdekli sandviç plakaların serbest titreşim davranışları FSDT kullanılarak incelenmiştir. Sandviç plakanın hem çekirdek katmanında hem de yüzey katmanlarında raylı sistem araçlarında tercih edilen Al 6005A-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Sandviç plakaların serbest titreşim analizi gözeneklilik yapısı, gözeneklilik oranı, en/boy oranı, çekirdek katmanı/yükseklik oranı ve sınır koşullarına göre incelenmiştir. Yapılan

analiz çalışmaları neticesinde bazı önemli çıkarımlar yapılmıştır. Auxetic çekirdek tipinde doğal frekans değerleri $\alpha=0,5$ gözeneklilik oranına kadar artış gösterirken, $\alpha = 0,5$ 'den sonra azalışa geçmiştir. Bal peteği çekirdek tipinde ise doğal frekans değerleri $\alpha = 0,4$ 'e kadar artış gösterirken, $\alpha = 0,4$ 'ten sonra azalışa geçmiştir. Yani genel olarak gözeneklilik oranı plakanın doğal frekansını artırırken, direngenliğin kütleyle göre daha fazla azaldığı noktadan sonra azalmaya geçmektedir. Her iki çekirdek tipi doğal frekans değerleri sınır koşullarından önemli derecede etkilenmektedir. En büyük doğal frekans değerleri CCCC sınır koşulları ile elde edilirken, en düşük doğal frekans değerleri CFFF sınır koşulu için elde edilmiştir. Bal peteği ve auxetic çekirdek tipleri karşılaştırıldığında CFFF sınır koşulunda doğal frekans değerlerinin oldukça yakın olduğu, CCCC sınır koşulunda ise farkın arttığı tespit edilmiştir. Artan en/boy oranı ile doğal frekans değerlerinde önemli derecede artış meydana gelmiştir. Auxetic ve bal peteği çekirdek katmanlı sandviç plakaların birinci doğal frekansları aynı gözeneklilik oranı ($\alpha = 0,4$), sınır koşulu (CCCC), en/boy oranı ($a/b = 1$) ve yükseklik oranı ($h_c/h_t = 0,7$) için kıyaslandığında bal peteği yapıda bütün parametrelerde daha yüksek doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler gözeneklilik oranı için %19,26, sınır koşulu için %16,14, en/boy oranı için %5,53 ve yükseklik oranı için %5,03 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, FEA ve Navier çözümünden elde edilen değerler kıyaslandığında sonuçların oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ile bal peteği ve auxetic çekirdekli sandviç plakaların serbest titreşim davranışları hakkında önemli çıkarımlar elde edilmiştir. Raylı sistem araçlarında tercih edilen Al 6005A-T6 alüminyum alaşımının malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılan analizler ile literatürdeki boşluğa referans sağlanacağı düşünülmektedir. Raylı sistemlerdeki ağırlık azaltma, enerji verimliliği ve güvenlik gereksinimlerinin artması, bu iki yapının daha geniş kullanımını teşvik etmektedir. Özellikle auxetic yapıların üretim süreçlerinde sağlanacak iyileştirmeler, bu yapıların raylı sistem araçlarının farklı bileşenlerinde daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlayabileceği düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] F. Arifurrahman, B. A. Budiman, and M. Aziz, "On the lightweight structural design for electric road and railway vehicles using fiber reinforced polymer composites," *Int. J. Sustain. Transp. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–29, Apr. 2018, doi: 10.31427/IJSTT.2018.1.1.4
- [2] M. Nagai, H. Yoshida, T. Tohtake, and Y. Suzuki, "Coupled vibration of passenger and lightweight car-body in consideration of human-body biomechanics," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 44, no. 1, pp. 601–611, Jan. 2006, doi: 10.1080/00423110600879361
- [3] M. Khadem Sameni and A. Moradi, "Railway capacity: A review of analysis methods," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 24, p. 100357, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jrtpm.2022.100357
- [4] Z. Wu et al., "Structural integrity issues of additively manufactured railway components: Progress and challenges," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 149, p. 107265, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107265
- [5] A. Önder and M. Robinson, "Investigating the feasibility of a new testing method for GFRP/polymer foam sandwich composites used in railway passenger vehicles," *Compos. Struct.*, vol. 233, p. 111576, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111576
- [6] A. Sakly, A. Laksimi, H. Kebir, and S. Benmedakhen, "Experimental and modelling study of low velocity impacts on composite sandwich structures for railway applications," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 68, pp. 22–31, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.001
- [7] V. Sharma et al., "Multi-criteria decision making methods for selection of lightweight material for railway vehicles," *Materials*, vol. 16, no. 1, p. 368, Dec. 2022, doi: 10.3390/ma16010368
- [8] O. F. Hosseinabadi and M. R. Khedmati, "A review on ultimate strength of aluminum structural elements and systems for marine applications," *Ocean Eng.*, vol. 232, p. 109153, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109153
- [9] X. Sun, X. Han, C. Dong, and X. Li, "Applications of aluminum alloys in rail transportation," *Advanced Aluminum Composites and Alloys*, L. A. Dobrzański, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2021, doi: 10.5772/intechopen.96442
- [10] Y. Zhao, Z. Yang, T. Yu, and D. Xin, "Mechanical properties and energy absorption capabilities of aluminum foam sandwich structure subjected to low-velocity impact," *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, p. 121996, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121996

- [11] H. Junaedi, T. Khan, and T. A. Sebaey, "Characteristics of carbon-fiber-reinforced polymer face sheet and glass-fiber-reinforced rigid polyurethane foam sandwich structures under flexural and compression tests," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 14, 2023, doi: 10.3390/ma16145101
- [12] V. Pourriahi, M. Heidari-Rarani, and A. T. Isfahani, "Influence of geometric parameters on free vibration behavior of an aluminum honeycomb core sandwich beam using experimentally validated finite element models," *J. Sandw. Struct. & Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 1449–1469, 2022, doi: 10.1177/10996362211053633
- [13] V. S. Sokolinsky, H. F. Von Bremen, J. A. Lavoie, and S. R. Nutt, "Analytical and experimental study of free vibration response of soft-core sandwich beams," *J. Sandw. Struct. & Mater.*, vol. 6, no. 3, pp. 239–261, 2004, doi: 10.1177/1099636204034634
- [14] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, and L. Guillaumat, "Experimental and finite elements analysis of the vibration behavior of a bio-based composite sandwich beam," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 466–475, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.045
- [15] F. Li and W. Yuan, "Free vibration and sound insulation of functionally graded honeycomb sandwich plates," *J. Sandw. Struct. & Mater.*, vol. 24, no. 1, pp. 565–600, 2022, doi:10.1177/10996362211020440
- [16] M. Nouraei, V. Zamani and Ö. Civalek, "Vibration of smart sandwich plate with an auxetic core and dual-FG nanocomposite layers integrated with piezoceramic actuators," *Compos. Struct.*, vol. 315, vol. 315, pp. 117014, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117014
- [17] V. K. Tran, T. T. Tran, M. Van Phung, Q. H. Pham, and T. Nguyen-Thoi, "A finite element formulation and nonlocal theory for the static and free vibration analysis of the sandwich functionally graded nanoplates resting on elastic foundation," *J. Nanomater.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8786373
- [18] M. Nouraei, P. Haghi, and F. Ebrahimi, "Modeling dynamic characteristics of the thermally affected embedded laminated nanocomposite beam containing multi-scale hybrid reinforcement," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 34, no. 5, pp. 4122–4151, Sep. 2024, doi: 10.1080/17455030.2021.1988758
- [19] I. Esen and R. Özmen, "Free and forced thermomechanical vibration and buckling responses of functionally graded magneto-electro-elastic porous nanoplates," *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, pp. 1–38, 2022, doi: 10.1080/15397734.2022.2152045
- [20] M. Sobhy, "Buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates resting on elastic foundations under various boundary conditions," *Compos. Struct.*, vol. 99, pp. 76–87, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.11.018
- [21] X. Yin, R. Song, Y. Song and G. Yin, "A new cross-section layout method and geometrical parameter optimization for floor beams of rack car body considering modal factors," *Struct. Multidisc. Optim.*, vol. 67, no. 72, 2024, doi: 10.1007/s00158-024-03794-y

Özgeçmiş



Fatih PEHLİVAN

İstanbul, 1986 doğumludur. Marmara, Politecnico di Milano ve Karabük Üniversitesi'nde sırasıyla lisans, yüksek lisans ve doktora Makine Mühendisliği eğitimini tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: fatihpehlivan@karabuk.edu.tr

**Kerim Gökhan AKTAŞ**

1989, Nevşehir doğumludur. Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Karabük Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır. Çalışma konuları, mekanik titreşimler, akıllı malzemeler, sandviç nano yapılar, sensörler ve eyleyicilerdir.
E-Posta: kerimgokhanaktas@karabuk.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Fatih PEHLİVAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Görselleştirme.

Kerim Gökhan AKTAŞ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama.



SOM ve K-Ortalama Kümeleme Algoritmaları Kullanarak Vagon Tamire Tutma Verilerinin İncelenmesi

Ender GÜNHER^{ORCID}, Mehmet FİDAN*^{ORCID}, Ömür AKBAYIR^{ORCID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı,
Eskişehir, Türkiye

*mfidan@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 06.08.2024, Kabul/Accepted: 24.01.2025, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Bu çalışma, Türkiye demiryolu bakım süreçlerinin optimizasyonu için Kendini Organize Eden Haritalar (SOM) ve K-Ortalama algoritmalarının karşılaştırmalı performanslarını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla vagon tamire tutulma yeri (TTY) tespitinde kullanılan SOM ve K-Ortalama kümeleme algoritmalarının performansları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti, Türkiye'deki vagon arıza kayıtlarından elde edilmiş olup, Tamire Tutulma Nedeni (TTN), Komponent Adı (KA) ve Vagon Tipi (VT) gibi öznitelikleri içermektedir. SOM ve K-Ortalama algoritmaları, Tamire Tutulma Nedeni (TTN), Komponent Adı (KA) ve Vagon Tipi (VT) özniteliklerinin kullanıldığı veri seti üzerinde uygulanmıştır. SOM, yüksek boyutlu verilerin iki boyutlu bir harita üzerinde görselleştirilmesini sağlayarak benzer özelliklere sahip verilerin aynı kümede toplanmasına imkân tanır. K-Ortalama algoritması ise veri noktalarını belirli sayıda küme merkezine atayarak bu merkezlere en yakın veri noktalarını aynı kümede toplar. Analiz sonuçları, SOM ve K-Ortalama algoritmalarının vagon bakım süreçlerini optimize etme açısından etkili olduğunu göstermektedir. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, vagon bakım süreçlerinin daha verimli ve sistematik bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyacaktır. Doğru arıza tespiti ve uygun atölyelere yönlendirme, bakım süreçlerinin hızlanmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Vagon Arızaları, Veri Analizi, Kümeleme Yöntemleri, Kendini Organize Eden Haritalar, K-Ortalama

Analysis of Wagon Repair Data Using SOM and K-Means Clustering Algorithms

Abstract: This study aims to investigate the comparative performances of Self Organizing Maps (SOM) and K-Means algorithms for the optimization of railway maintenance processes in Turkey. For this purpose, the performances of SOM and K-Means clustering algorithms used in the determination of the railcar repair location (TTY) were investigated. The dataset used in the study was obtained from railcar failure records in Turkey and includes attributes such as Reason for Repair (TTN), Component Name (KA) and Railcar Type (VT). SOM and K-Means algorithms were applied on the dataset where the attributes of Reason for Repair (TTN), Component Name (KA) and Wagon Type (VT) were used. SOM enables the visualization of high-dimensional data on a two-dimensional map and enables the collection of data with similar characteristics in the same cluster. The K-Means algorithm assigns data points to a certain number of cluster centers and collects the data points closest to these centers in the same cluster. The analysis results show that SOM and K-Means algorithms are effective in optimizing the wagon maintenance processes. Using these methods together will allow the management of wagon maintenance processes in a more efficient and systematic way. Correct fault detection and directing to the appropriate workshops will contribute to the acceleration of maintenance processes and the reduction of costs.

Keywords: Wagon Failures, Data Analysis, Clustering Methods, Self-Organizing Maps, K-Means

1. Giriş

Kümeleme, veri madenciliği, makine öğrenimi, örüntü tanıma ve biyoinformatik gibi birçok alanda kullanılan önemli bir veri analiz yöntemidir [1]. Bu çalışmanın amacı, vagon arıza

Atıf için/Cite as: E. Günher, M. Fidan, Ö. Akbayır, "SOM ve K-ortalama kümeleme algoritmaları kullanarak vagon tamire tutma verilerinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 168-177, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1529040

verilerini kullanarak tamire tutulma yerlerini (TTY) tespit etmektir. Bu amaçla, Kendini Organize Eden Haritalar (SOM) ve K-Ortalama kümeleme algoritmaları kullanılarak çeşitli özneliklere göre vagonların hangi atölyelerde tamir edilmesi gerektiği belirlenmeye çalışılacaktır [2].

Vagon tamir süreçleri, demiryolu taşımacılığında operasyonel verimliliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Vagonların tamire tutulma yerlerinin doğru belirlenmesi, bakım süreçlerinin hızlanmasını ve maliyetlerin düşürülmesini sağlar. Bu çalışma, Tamire Tutulma Nedeni (TTN), Komponent Adı (KA) ve Vagon Tipi (VT) özneliklerinin kullanıldığı veri seti üzerinde SOM ve K-Ortalama kümeleme algoritmalarının uygulanmasını ve sonuçlarının karşılaştırılmasını içermektedir [3]. Literatürde, SOM ve K-Ortalama algoritmalarının veri kümelemede etkin olduğu bilinmektedir ve bu çalışmada da bu iki yöntem arasındaki farklar ve benzerlikler incelenmiştir [4].

Demiryolu bakım süreçlerinin optimize edilmesi üzerine yapılan çalışmalar, taşımacılık sistemlerinde operasyonel verimliliğin artırılmasında önemli rol oynamaktadır [5], [6]. Benzer şekilde, SOM ve K-Ortalama algoritmaları, sağlık sektöründe hastane kaynaklarının yönetimi [7], veri madenciliği alanında müşteri segmentasyonu [8] ve endüstriyel süreçlerde bakım operasyonlarının optimizasyonu [9] gibi farklı uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, özellikle yüksek boyutlu verilerin kümeleme ve görselleştirilmesinde SOM algoritmasının, veri merkezli tahminlerde ise K-Ortalama algoritmasının öne çıktığı görülmüştür. Örneğin, Zhang ve arkadaşları, EMU parçalarının BOM'una ve bakım sürecinin topolojisine dayalı optimizasyon modelleri geliştirerek bakım süreçlerini verimli hale getirmiştir [10]. Wang ve arkadaşları, bakım operasyonlarının ve iş yükü tahsisinin entegre planlamasıyla atölyelerdeki makinelerin kullanım sürelerini maksimize etmeye yönelik çalışmalar yapmıştır [11]. Ayrıca, Sivaraju ve Kumar, kablosuz sensör ağlarının performansını iyileştirmek için zamanlama algoritmaları geliştirmiştir [12].

Güvenlik kritik kablosuz sensör ağlarının performansını iyileştirmek için geliştirilen zamanlama algoritmaları da bakım süreçlerine benzer şekilde uygulanabilir [13]. Shadroo ve arkadaşları, derin öğrenme tabanlı iki aşamalı zamanlama yöntemleri kullanarak IoT ortamlarında etkinlik sağlamıştır [14]. Ayrıca, Ullah ve Youn, kenar hesaplama platformlarında görevlerin etkin sınıflandırılması ve dağıtımı için K-Ortalama kümeleme algoritması tabanlı bir zamanlama şeması önermiştir [15].

Çin'in yüksek hızlı demiryolu inşaatındaki dikkate değer başarıları ve artan EMU'lar mevcut revizyon üslerine büyük baskı getirmektedir [10]. EMU parçalarının BOM'una ve bakım sürecinin topolojisine dayalı optimizasyon modelleri, bakım süreçlerini verimli hale getirmektedir [10]. Ayrıca, bakım operasyonlarının ve iş yükü tahsisinin entegre planlaması, atölyelerdeki makinelerin kullanım sürelerini maksimize etmeye yardımcı olmaktadır [11]. Bunun yanında, taşımacılık sistemlerinde bakım süreçlerinin optimize edilmesi, filo kullanılabilirliğini artırmak için önemlidir [16]. Demiryolu bakım süreçlerinde SOM ve K-Ortalama algoritmalarının birlikte kullanıldığı kapsamlı bir analiz çalışmasına rastlanmamıştır.

Girişte vagonların tamire tutulma yerlerinin belirlenmesi probleminin çözümünde SOM ve K-Ortalama algoritmalarının kullanılmasının önemine değinilmiştir. Bu iki yöntemin farklı veri setleri üzerindeki performansları ve etkinlikleri literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışma, Türkiye'deki vagon bakım verilerini kullanarak bu iki yöntemin performansını karşılaştırmayı ve optimal tamire tutulma yerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. Metot

Çalışmada kullanılan veriler, Türkiye'deki vagon arıza kayıtlarından elde edilmiştir. Bu verilerde, her bir vagonun arıza nedeni, komponent adı ve vagon tipi bilgileri yer almaktadır. Veriler, vagonların hangi atölyelerde tamir edilmesi gerektiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 1, tamire tuttukları vagon adetine göre en çok vagon tamire tutan 20 yeri göstermektedir. Bu tablo, tamire en çok ihtiyaç duyulan yerleri belirlemekte ve bakım planlaması için önemli bilgiler sunmaktadır. Verilerin analizi sonucunda Demirbağ ve Kayseri gibi yerlerin en çok tamire tutulan vagonlara sahip olduğu görülmüştür. Bu yerler, demiryolu ağının kritik noktalarında bulunmakta ve yoğun trafik nedeniyle daha fazla bakım gerektirmektedir.

Tablo 1. Tamire tuttukları vagon adetine göre en çok vagon tamire tutan 20 yer

Yer	Tamire Tutulma Sayısı
Kayseri	11060
Demirbağ	8645
Eskişehir	6638
Çatalağzı	3952
Malatya	3811
Afyon	3792
İskenderun	3426
Halkalı	2918
Alsancak	2664
Mersin	2657
Balıkesir	2528
Sivas	2472
Soma	2431
Yakacık	2320
Arifiye	1845
Van	1724
Ülkü	1192
Tavşanlı	1137
Konya	1067
Kapıkule	973

Tablo 2, tamire tutulan vagon adetine göre en çok tamire tutulma nedenlerini göstermektedir. Bu tablo, en yaygın arıza nedenlerini ve bu nedenlerin tamir sıklığını ortaya koymaktadır. Fren Pnömatik Kısım ve Tekerleğin Bandaj Kısmı gibi nedenlerin en yaygın tamire tutulma nedenleri olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler, bakım ekiplerinin hangi arızalara öncelik vermesi gerektiği konusunda rehberlik edebilir.

Tablo 2. Tamire tutulan vagon adetine göre en çok tamire tutulma nedenleri

Tamire Tutulma Nedeni	Tamire Tutulma Sayısı
Boden Kalınlığı 22mm Altında	6616
Tekerlek Apleti	5711
Dikme/Dikme Desteği Hasarlı/Noksan	5146
Kapı Açık/Hasarlı	4574
Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak	4381
Yan Duvar Açık/Hasarlı(Açık Vagon)	3956
Fren Hava Hortumu Hasarlı/Noksan/Sarkıyor	3116
Vagon Gövdesi Yan Duvar Hasarlı	2542

Tablo 3, vagonların tip bazında adetlerini göstermektedir. Bu tablo, demiryolu ağında hangi tip vagonların daha yaygın olduğunu ve bu vagonların bakım ihtiyaçlarını anlamaya yardımcı olur. Fals tipi vagonların en yaygın olan vagon tipi olduğu ve diğer vagon tiplerine göre daha sık tamire tutulduğu görülmüştür. Bu bilgi, bakım kaynaklarının etkili bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olabilir.

Tablo 3. Vagonların tip bazında adedi

Vagon Tipi	Tamire Tutulma Sayısı
Fals (665 0 331/2708)	2188
Ks (330 1 001/2650)	1206
Hbbillnss (246 1 001/999)	975
Eanoss (TSI) (537 9 192/80066)	871
Sgss (456 8 923/9772)	828

Tablo 4, tip bazında tamire tutulan vagon adedini göstermektedir. Fals ve Ks tipleri en çok tamire tutulan vagon tipleri olarak öne çıkmaktadır. Bu tablo, hangi vagon tiplerinin daha fazla bakım gerektirdiğini ve bu bakım ihtiyaçlarının nasıl karşılanabileceğini belirlemek için kullanılabilir.

Tablo 4. Tip Bazında Tamire Tutulan Vagon Adedi

Vagon Tipi	Tamire Tutulma Sayısı
Fals (665 0 331/2708)	19973
Ks (330 1 001/2650)	6370
Hbbillnss (246 1 001/999)	4470
Eanoss (TSI) (537 9 192/80066)	3364
Sgss (456 8 923/9772)	3167

Bu çalışmada iki farklı kümeleme algoritması kullanılmıştır: Kendini Organize Eden Haritalar (SOM) ve K-Ortalama kümeleme.

2.1. Kendini organize eden haritalar (SOM)

SOM, yüksek boyutlu verilerin iki boyutlu bir harita üzerinde görselleştirilmesini sağlayan bir yapay sinir ağı algoritmasıdır. SOM, benzer özelliklere sahip verilerin aynı kümede toplanmasına olanak tanır ve veri setlerini görselleştirerek analiz edilmesini kolaylaştırır [11].

SOM algoritmasının temel adımları şunlardır:

1. Ağın Başlatılması: Rastgele ağırlık değerleri ile ağ başlatılır.
2. Veri Noktasının Seçilmesi: Eğitim veri setinden rastgele bir veri noktası seçilir.
3. En Yakın Düğümün Bulunması: Seçilen veri noktasına en yakın düğüm (kazanan düğüm) belirlenir.
4. Ağırlıkların Güncellenmesi: Kazanan düğüm ve komşularının ağırlıkları güncellenir.
5. Tekrarlama: Adım 2'den 4'e kadar olan işlemler belirli bir iterasyon sayısına kadar tekrarlanır [12].

2.2. K-ortalama kümeleme metodu

K-Ortalama kümeleme, veri noktalarını belirli sayıda (K) küme merkezine atayan bir algoritmadır. Her bir veri noktası, en yakın küme merkezine atanarak aynı kümede toplanır. K-Ortalama kümeleme algoritması, veri noktalarını belirli sayıda küme merkezine atar ve bu merkezlere en yakın veri noktalarını aynı kümede toplar. Bu yöntem, yük dengelemesi ve görev zamanlaması gibi çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır [15].

K-Ortalama algoritmasının temel adımları şunlardır:

1. Küme Merkezlerinin Başlatılması: K adet küme merkezi rastgele seçilir.
2. Veri Noktalarının Atanması: Her bir veri noktası en yakın küme merkezine atanır.
3. Küme Merkezlerinin Güncellenmesi: Her bir küme merkezi, kümesine atanan veri noktalarının ortalaması alınarak güncellenir.
4. Tekrarlama: Adım 2 ve 3 belirli bir iterasyon sayısına kadar veya küme merkezleri sabitlenene kadar tekrarlanır [14].

3. Bulgular

Bu bölümde, SOM ve K-Ortalama algoritmaları kullanılarak elde edilen bulgular sunulmaktadır.

3.1. SOM bulguları

Tablo 5 ve Tablo 6'da SOM ile elde edilen küme istatistikleri verilmiştir. SOM algoritması ile elde edilen kümelerde, VT, KA ve TTN öznitelikleri arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Özellikle VT özneliğinde Fals tipi vagonların diğer özniteliklere göre daha yaygın olduğu görülmüştür.

Tablo 5. SOM ile elde edilen küme istatistikleri

Küme No	VT Ortalama	VT Std	VT Mod	KA Ortalama	KA Std	KA Mod	TTN Ortalama	TTN Std	TTN Mod
1	9,86	0,83	10	4,98	0,35	5	27,96	1,46	28
2	9,90	0,60	10	48,98	0,16	49	104,96	0,30	105
3	20,47	0,86	20	10,99	0,22	11	51,07	0,49	51
4	10,06	0,40	10	21,51	0,50	22	66,49	2,84	68
5	11,64	1,20	12	24,35	2,18	23	55,84	3,17	56
6	14,55	1,35	15	39,62	1,14	38	85,71	4,15	88
7	10,23	0,95	10	17,78	1,19	18	42,34	2,37	41
8	13,45	1,05	14	35,22	1,56	34	76,84	3,89	77
9	9,96	0,60	10	24,56	0,85	25	57,28	1,78	56
10	10,03	0,85	10	29,12	1,35	28	67,34	2,75	66

Tablo 6, SOM ile elde edilen küme içi korelasyonları göstermektedir. Bu korelasyonlar, her küme için VT, KA, ve TTN özniteliklerinin birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 6. SOM ile elde edilen küme içi korelasyonlar

Küme No	VT-KA	KA-TTN	VT-TTN
1	-0,1426	0,8283	-0,2182
2	0,3364	0,9084	0,3687
3	0,4837	0,9146	0,6186
4	0,1154	0,5288	0,0151
5	0,3269	0,5525	-0,2096
6	-0,0222	-0,1781	0,05
7	-0,0661	0,2007	0,0092
8	-0,0917	0,0644	-0,1892
9	0,0204	0,9813	0,055
10	0,9766	0,9822	0,3878

Bu tablolar, SOM algoritması ile elde edilen kümelerde öznitelikler arasındaki korelasyonların analiz edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, birinci kümede VT ile KA arasında negatif bir

korelasyon varken, KA ile TTN arasında pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu, KA ve TTN özneliklerinin birlikte hareket etme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Tablo 7’de Tablo 5’teki modların açıklamaları verilmiştir.

Tablo 7. SOM ile elde edilen modların tanımları

Küme No	VT Mod	KA Mod	TTN Mod
1	Fals (665 0 331/2708)	Boden	Boden Kalınlığı 22mm Altında
2	Fals (665 0 331/2708)	Yan veya Alın Duvar (Açık Vagon)	Yan veya Alın Duvarlar Hasarlı (Açık Vagon)
3	Ks (330 1 001/2650)	Dikme (Platform Vagon)	Dikme - Muhtelif Arızalar (Platform Vagon)
4	Fals (665 0 331/2708)	Fren Pnömatik Kısım	Fren Hava Hortumu Hasarlı/Noksan
5	Sgss (456 8 923/9772)	Tekerleğin Bandaj Kısım	Tekerlek Apleti
6	Ks (330 1 001/2650)	Yan Duvar Kapağı (Platform Vagon)	Yan Duvar Kapağı - Muhtelif (Platform Vagon)
7	Ks (330 1 001/2650)	Fren Pnömatik Kısım	Fren Mekanik Parçası Sarkık veya Kırık
8	Fals (665 0 331/2708)	Kapı ve Sürme Duvar	Kapı Çerçevesi, Menteşe, Kilit, Mandal Kancası, Tutamak vb Noksan/Kırık/Hasarlı
9	Fals (665 0 331/2708)	Duvar	Duvar Hasarlı
10	Falns (644/664 1 001/531)	Tekerleğin Bandaj Kısım	Tekerlek Apleti

3.2. K-ortalama bulguları

Tablo 8, 9 ve 10’da K-Ortalama yöntemi ile elde edilen küme istatistikleri verilmiştir. K-Ortalama yöntemi ile elde edilen kümelerde, VT, KA ve TTN öznelikleri arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. VT özneliğinde en yaygın vagon tipi yine Fals tipi vagonlardır ve KA özneliğinde en yaygın komponentler fren ve tekerlek bileşenleridir.

Tablo 8. K-ortalama ile elde edilen küme istatistikleri

Küme No	VT Ortalama	VT Std	VT Mod	KA Ortalama	KA Std	KA Mod	TTN Ortalama	TTN Std	TTN Mod
1	12,53	5,32	10	29,53	3,29	27	77,50	5,19	81
2	13,74	5,87	10	48,36	1,66	49	104,12	1,87	105
3	32,34	6,05	39	7,84	7,73	5	32,92	20,51	28
4	31,32	5,86	34	35,47	6,34	38	86,67	13,81	91
5	9,90	1,98	10	5,16	1,13	5	32,43	8,04	28
6	13,02	7,27	10	21,05	4,44	19	9,66	2,34	9
7	23,97	5,93	20	11,13	4,63	11	53,88	11,03	51
8	14,51	9,71	10	20,26	4,84	22	71,29	6,84	70
9	14,58	9,49	10	46,05	5,86	51	28,17	4,64	32
10	7,73	4,64	7	37,07	1,73	38	89,31	6,81	91

Tablo 9, VT, KA ve TTN öznelikleri için K-Ortalama yöntemi sayısal sonuçlarını açıklamaktadır. Bu sonuçlar, her küme için en yaygın öznelik değerlerini (mod) göstermektedir.

Tablo 9. K-ortalama ile elde edilen modların tanımları

Küme No	VT Mod	KA Mod	TTN Mod
1	Fals (665 0 331/2708)	Kapı ve Sürme Duvar	Kompozit Sabo İnce/Noksan/Çatlak
2	Fals (665 0 331/2708)	Yan veya Alın Duvar	Yan veya Alın Duvarlar Hasarlı
3	Talns (TSI)(066 5 001/300)	Boden	Boden Kalınlığı 22mm Altında
4	Sgss (456 8 923/9772)	Tekerleğin Bandaj Kısmı	Tekerlek Apleti
5	Fals (665 0 331/2708)	Boden	Boden Kalınlığı 22mm Altında
6	Fals (665 0 331/2708)	Duvar	Duvar Hasarlı
7	Ks (330 1 001/2650)	Dikme (Platform Vagon)	Dikme - Muhtelif Arızalar
8	Fals (665 0 331/2708)	Fren Pnömatik Kısım	Fren Mekanik Parçası Sarkık/Kırık
9	Fals (665 0 331/2708)	Yarı Otomatik Koşum Takımı	Yarı Otomatik Koşum Takımı Hasarlı
10	Falns (644/664 1 001/531)	Tekerleğin Bandaj Kısmı	Tekerlek Apleti

Tablo 10, K-Ortalama yöntemi ile elde edilen küme içi korelasyonları göstermektedir. Bu korelasyonlar, her küme için VT, KA ve TTN özniteliklerinin birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 10. K-ortalama ile elde edilen küme içi korelasyonlar

Küme No	VT-KA	KA-TTN	VT-TTN
1	0,1232	0,1818	0,1221
2	-0,3414	0,1637	-0,0198
3	0,2936	0,6391	0,2053
4	-0,3794	0,9887	-0,3698
5	-0,1801	-0,498	-0,1494
6	-0,0278	0,0092	-0,1792
7	0,008	-0,1867	0,0799
8	0,0716	0,3403	0,0052
9	0,0207	0,7897	0,0319
10	0,2796	0,5754	0,2797

Bu tablolar, K-Ortalama algoritması ile elde edilen kümelere öznitelikler arasındaki korelasyonların analiz edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, dördüncü kümede KA ile TTN arasında güçlü bir pozitif korelasyon varken, VT ile TTN arasında negatif bir korelasyon bulunmaktadır. Bu, KA ve TTN özniteliklerinin birlikte hareket etme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, SOM algoritmasının yüksek boyutlu verilerin görselleştirilmesi ve anlamlandırılmasında etkinliğini ortaya koyarken, K-Ortalama algoritmasının ise daha hızlı ve belirgin kümeleme sağladığını göstermektedir. Literatürde, Wang demiryolu bakım süreçlerindeki benzer çalışmaları ile karşılaştırıldığında[17], bu çalışma, SOM'un verilerin görselleştirilmesindeki katkısını vurgulaması açısından farklılık göstermektedir. Ayrıca, K-Ortalama algoritmasının literatürde diğer endüstriyel bakım süreçlerinde kullanılan uygulamaları

ile paralellik taşıdığı, ancak bu çalışmada demiryolu sektörüne özel verilerle test edilerek özgün bir yaklaşım sunduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, vagon tamire tutulma yeri tespiti için SOM ve K-Ortalama kümeleme algoritmaları kullanılmıştır. Her iki yöntemin de vagon bakım süreçlerinin daha verimli yönetilmesine katkı sağladığı görülmüştür. SOM, veri setlerinin görselleştirilmesini sağlarken, K-Ortalama algoritması verileri belirli küme merkezlerine atayarak analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, her iki yöntemin de vagonların tamire tutulma yerlerinin tespitinde etkin olduğunu göstermektedir.

Tablo analizleri, farklı vagon tipleri, tamire tutulma nedenleri ve komponent adları arasındaki ilişkileri anlamamıza yardımcı olmuştur. Özellikle, Fals tipi vagonların ve belirli komponent arızalarının daha yaygın olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler, bakım kaynaklarının etkili bir şekilde dağıtılmasına ve arıza önleme stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır.

Bu çalışma, Türkiye demiryolu bakım süreçlerinin sistematik bir şekilde optimize edilmesi için değerli bir model sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, daha karmaşık veri setleri ve farklı kümeleme algoritmaları ile bu modellerin performansını değerlendirmelidir.

Bu çalışma, SOM ve K-Ortalama algoritmalarının demiryolu bakım süreçlerinde kullanımı açısından önemli sonuçlar sunmaktadır. Gelecekte, bu algoritmaların bakım önceliklendirmesi, arıza tahmini ve bakım kaynaklarının optimizasyonu gibi demiryolu sektöründe kritik öneme sahip farklı alanlarda da uygulanması önerilmektedir. Ayrıca, bu algoritmaların sağlık sektöründe hastane kaynaklarının yönetimi, veri madenciliği alanında müşteri segmentasyonu ve enerji sektöründe ekipman bakımının optimize edilmesi gibi diğer endüstriyel alanlarda test edilmesi, yöntemlerin genel uygulanabilirliği ve etkinliğini artırabilir. SOM'un yüksek boyutlu verilerin görselleştirilmesi avantajı, büyük veri setlerinin analizi için kullanılabilirken, K-Ortalama algoritmasının hızlı kümeleme yetenekleri, gerçek zamanlı uygulamalarda önemli faydalar sağlayabilir. Bu yöntemlerin farklı sektörlerdeki uygulamalarının karşılaştırmalı analizleri, algoritmaların sektörel avantajlarını ve sınırlamalarını daha iyi anlamak için önemli bir katkı sunacaktır.

Gelecekte, bu yöntemlerin daha büyük ve karmaşık veri setleri üzerinde test edilmesi ve diğer kümeleme algoritmaları ile karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, veri setine eklenebilecek yeni özniteliklerle algoritmaların performansı daha da artırılabilir. SOM ve K-Ortalama algoritmalarının birlikte kullanılması, vagon bakım süreçlerinin daha verimli ve sistematik bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyacaktır. Bu sayede, demiryolu işletmelerinin operasyonel verimliliği artacak ve bakım planlaması daha etkili bir şekilde yapılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TCDD Taşımacılık AŞ'nin 04.10.2021 tarih ve E-30614766-204.02.99-128179 sayılı onayı ile yapılmıştır.

Kaynakça

- [1] F. Feuillet, vd. "Psikotrop ilaçların tüketimi ve istatistiksel metodlar," *Journal of Health Studies*, vol. 45, no. 3, pp. 123-135, 2012
- [2] T.S. Madhulatha, "Kümeleme algoritmaları ve veri madenciliği," *Data Mining Journal*, vol. 34, no. 2, pp. 67-89, 2012

- [3] W. Zhang, Z. Wang, Z. Jia, H. Wang, "Optimization model for collaborative overhaul workshop scheduling problem of multiple EMUs," in *2021 IEEE 23rd Int Conf on High Performance Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science & Systems; 19th Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor Cloud & Big Data Systems & Application*, 2021, doi: 10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys53884.2021.00181
- [4] Z. Wang, Q. Deng, L. Zhang, H. Li, F. Li, "Joint optimization of integrated mixed maintenance and distributed two-stage hybrid flow-shop production for multi-site maintenance requirements," *Expert Systems with Applications*, 215, 119422, 2023
- [5] M. Rodoplu, S. Dauzère-Pérès, P. Vialletelle, "Integrated planning of maintenance operations and workload allocation," *International Journal of Production Research*, vol. 61, no. 23, pp. 8291-8308, 2023
- [6] Y. Zhang, C. Li, X. Su, R. Cui, B. Wan, "A baseline-reactive scheduling method for carrier-based aircraft maintenance tasks," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 367-397, 2023
- [7] W. T. Lin, Y. C. Wu, J. S. Zheng, M. Y. Chen, "Analysis by data mining in the emergency medicine triage database at a Taiwanese regional hospital," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 9, pp. 11078-11084, 2011.
- [8] K. R. Kashwan, C. M. Velu, "Customer segmentation using clustering and data mining techniques," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 856, 2013.
- [9] L. Pinciroli, P. Baraldi, E. Zio, "Maintenance optimization in industry 4.0," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 234, pp. 109204, 2023.
- [10] I. Al-Nader, A. Lasebae, R. Raheem, "A novel scheduling algorithm for improved performance of multi-objective safety-critical WSN using spatial self-organizing feature map," *Electronics*, vol. 13, no. 1, 19, 2023
- [11] S. Sivaraju, C. Kumar, "Energy enhancement of WSN with deep learning based SOM scheduling algorithm," *Journal of Information Technology and Digital World*, vol. 4, no. 3, pp. 238-249, 2022
- [12] S. Shadroo, A.M. Rahmani, A. Rezaee, "The two-phase scheduling based on deep learning in the Internet of Things," *Computer Networks*, 185, 107684, 2021
- [13] A. Singh, G.S. Aujla, R.S. Bali, P.K. Chahal, M. Singh, "A self organised workload classification and scheduling approach in IoT-edge-cloud ecosystem," *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, pp. 1-5, 2020
- [14] S.M. Mostafa, H. Amano, "Dynamic round robin CPU scheduling algorithm based on K-means clustering technique," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, 5134, 2020
- [15] M. Belhor, A. El-Amraoui, A. Jemai, F. Delmotte, "Multi-objective evolutionary approach based on K-means clustering for home health care routing and scheduling problem," *Expert Systems with Applications*, 213, 119035, 2023
- [16] I. Ullah, H.Y. Youn, "Task classification and scheduling based on K-means clustering for edge computing," *Wireless Personal Communications*, vol. 113, no. 4, pp. 2611-2624, 2020
- [17] J. Wang, "Maintenance scheduling at high-speed train depots: An optimization approach," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, pp.109809, 2024.

Özgeçmiş



Ender GÜNER

Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2024 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2018 yılından beridir Eskişehir Valiliği, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nde Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır. E-Posta: endergunh@gmail.com

**Mehmet FİDAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden 2004 yılında mezun oldu. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde 2006 ve 2015 yıllarında tamamladı. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksek Okulu Raylı Sistemler Elektrik-Elektronik Programında doktor öğretim üyesi olarak çalışmakta ve yine aynı alanda akademik çalışmalarına devam etmektedir.

E-Posta: mfidan@eskisehir.edu.tr

**Ömür AKBAYIR**

Lise eğitimini Demiryolu Meslek Lisesinde, lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde, doktora eğitimini Gazi Üniversitesi'nde tamamlamıştır. 1999-2015 yıllarında TCDD'den Teknisyen ve Mühendis olarak, 2015-2018 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmıştır. 2018 yılından bu yana Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde çalışmakta olup Doç. Dr. unvanını 2022 yılında almıştır.

E-Posta: omurakbayir@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ender GÜNHİR: Metodoloji, Yazma, Yazılım. Mehmet FİDAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Görselleştirme, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Ömür AKBAYIR: Kavramsallaştırma, İnceleme, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Demiryolu Sistemlerinin Kritik Bileşenleri Olarak Organizasyonlar Arası Lojistik Bilgi Sistemleri: Bir Yazın Taraması

Aykan UNCU^{ORCID}, İbrahim Müjdat BAŞARAN*^{ORCID}

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Zonguldak, Türkiye

*imbasaran@beun.edu.tr

(Alınış/Received: 10.08.2024, Kabul/Accepted: 02.11.2024, Yayınlanma/Published: 31.01.2025)

Öz: Ağ şeklinde yapılan tedarik zincirleri, ürün ve malzeme akışlarının yanı sıra stok yönetim süreçleri için gerekli olan bilgi akışlarına destek veren kritik organizasyonel yapılardır. Tedarik zincirlerinde 2000'li yılların başından itibaren elektronik ticaretin etkisiyle şekillenen tedarik zinciri entegrasyon eğilimlerinin temel destekleyici unsurları olan organizasyonlar arası sistemler (OAS) 2010'lu yılların başına kadar büyük ölçüde ikili sistem entegrasyonlarına dayalı olarak yönetilirken, 2010'lu yılların başından 21. yüzyılın ilk çeyreğine kadar olan dönemde web teknolojilerinin gelişimiyle birlikte büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Bu çalışmanın temel amacı OAS yazınına ilişkin sistematik bir yazın taraması yürüterek alana ilişkin dönüşümü teorik temelleriyle birlikte incelemektir. Sistematik yazın taraması kapsamında incelenen bilimsel araştırmalar bilimsel araştırma metodolojisinin temel özellikleri, kullanılan yöntemler, araştırmaların yoğunlaştığı alanlar, veri toplama yöntemleri ve bağımlı-bağımsız değişken ilişkileri açısından incelenmiştir. Bunların yanı sıra alan yazında ön plana çıkan çalışmalardan farklı olarak; OAS'ler üzerindeki etkileri, genellikle açıklayıcı araştırma metodolojisine dayanan çok değişkenli istatistiksel yöntemler ve matematiksel modellerle incelenen ve OAS'lerin etki alanlarını temsil eden kavramlar sistematik olarak sınıflandırılarak tematik yoğunlaşma alanları ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar kelimeler: Organizasyonlar Arası Sistemler, Tedarik Zinciri Yönetimi, Ağ Teorisi, Ağların Teorisi

Inter-Organizational Systems as Critical Components of Railway Systems: A Literature Review

Abstract: Networked supply chains are critical organizational structures that support product, and material flows as well as the information flows required for inventory management processes. While inter-organizational systems (IOS), which are the main supporting elements of supply chain integration trends shaped by the impact of e-commerce since the early 2000s, were largely managed based on bilateral system integrations until the early 2010s, they have undergone a major transformation with the development of web technologies from the early 2010s into the first quarter of the 21st century. The main purpose of this study is to conduct a systematic review of the OAS literature and to examine the transformation of the field with its theoretical underpinnings. The scientific studies examined in the systematic literature review were analyzed in terms of the basic features of scientific research methodology, the methods used, the areas of research focus, the data collection methods, and the relationships between dependent and independent variables. In addition, in contrast to the prominent studies in literature, the thematic areas of concentration were revealed by systematically classifying the concepts that represent the impact areas of the OAS, whose effects on the OAS are generally studied with multivariate statistical methods and mathematical models based on explanatory research methodology.

Keywords: Interorganizational Systems, Supply Chain Management, Network Theory, Theory Of Networks

Atıf için/Cite as: A. Uncu, İ.M. Başaran, "Demiryolu sistemlerinin kritik bileşenleri olarak organizasyonlar arası lojistik bilgi sistemleri: bir yazın taraması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 178-230, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1531456

1. Giriş

Stigler 'e göre [1] “bir piyasada monopol gücün olmaması” olarak tanımlanan rekabet kavramı, serbest piyasa ekonomisinin temel unsurudur [2]. Tarihsel bakış açısından uzaklaşarak, konuya ekonomik bir perspektiften yaklaşan McNulty (1968), söz konusu kavramın belirli ve ideal bir durumu tanımlama özelliğine vurgu yaparak, “Kaynakları en etkin kullanım yerlerine göre organize eden, fiyatları uzun dönemde ve sürdürülebilir biçimde en düşük seviyeye getiren bir tür düzenleyici güç” olarak ele almıştır [3]. Diğer taraftan işletme organizasyonlarının stratejik yönelimine dair temel perspektiflerden birini temsil eden kaynak temelli görüş, rekabetçiliğe katkı sağlayan, sık karşılaşılmayan, taklidi ve ikamesi mümkün olmayan değerli kaynakların organizasyonlar arasında eşit dağılmadığını; bu nedenle rekabetçi bir ortamda başarılı olmak isteyen organizasyonların bu kaynakları elde etmesi gerektiğini savunmaktadır [4]. Ancak tedarik zinciri aktörlerinden herhangi birinin veya bazılarının rekabetçi dinamiklerin işleyişi için gerekli tüm kaynaklara sahip olmasının ve bunları koruyabilmesinin güçlüğü dikkate alındığında, tedarik zincirlerinin işleyişi için, üretim birimlerinin gerekli kaynaklara sahip olan diğer organizasyonlarla sistematik ve stratejik iş birlikleri geliştirmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu durum işletme organizasyonlarının rekabet stratejilerinin çevresel dinamikler hakkında bilgi sahibi olmadan anlaşılmasını olanaksız hale getirmektedir [5]. Organizasyonlar arası bağımlılıkları ve kısıtları bu bakış açısıyla anlamaya çalışan kaynak bağımlılığı yaklaşımı, organizasyonları “açık sistemler” olarak ele almaktadır. Buna göre kaynak elde etmek ve elde edilen çıktıları piyasa fiyatları üzerinden mal ve hizmet olarak sunabilmek için çevreleriyle etkileşime giren örgütler diğer tedarik zinciri aktörleriyle iletişim kurabilmek için etkin işleyen bilgi sistemlerine ihtiyaç duymaktadır [6].

Organizasyonlar arası ilişkilere yönelik teoriler organizasyonları buldukları çevreyle etkileşim halinde olan daha büyük sosyal sistemlerin alt sistemleri olarak ele almaktadır. Başka bir deyişle bu teoriler, organizasyonları ve organizasyon gruplarını çevrelerindeki ağlarla etkileşimleri, karmaşık roller ve rol ilişkileri açısından incelemektedir [7]. Organizasyonlar arası ilişkiler politik açıdan kolektif eylem ve birliklerin oluşumuna destek olurken; yasallaşma açısından toplumsal kabule, kaynak dağılımı açısından çevresel belirsizlik ve güç bağımlılığı teorilerine dayanmaktadır. Bu yaklaşıma göre gerekli kaynaklara sahip organizasyonlar dikey karşılıklı bağımlılıklarla güçlenirken, kaynak yetersizliklerinden kaynaklanan belirsizliklerle birlikte faaliyet gösteren örgütler rekabet stratejilerini yatay ve dikey ilişkilerle birlikte geliştirmektedir [8]. İlişkisel görüş, analiz edilen birimler ve kaynak kontrolüne dair genel perspektifler açısından farklılaşsa da kaynak temelli yaklaşımı tamamlayan bir yol izlemektedir. Buna göre organizasyonlar arası süreçleri ve rutinleri inceleyen ilişkisel yaklaşım; önemi yüksek kaynak ve yeteneklerin paylaşılmasını sağlayan ilişkisel süreçlerin rekabetçi avantaj sağlayacağı görüşünü savunmaktadır [9].

Kaynak bağımlılığı teorisi, organizasyonel çıktıları açıklarken, etkinliğe vurgu yapmakla birlikte esas olarak güce odaklanmaktadır. Diğer taraftan kaynaklara sahip olma yeteneği ile doğrudan ilişkilendirilen güç kavramının elde edilme biçimi ve güç kaybına dair sorunlara verimlilik perspektifiyle açıklama getirmek, işlem maliyetleri yaklaşımı sayesinde mümkün olmaktadır [10]. Bu yaklaşımın temeli, işletmelerin ihtiyaçlarını dışarıdan veya iç kaynaklarla karşılamalarına yönelik seçim stratejilerine dayanmaktadır [11], [12], [13]. İşlem kavramı, mal ve hizmetlerin, teknolojik olarak ayrılabilen birimler arasındaki transferine ilişkin etkinlikleri; işlem maliyetleri, üretim sistemlerindeki kaynak kullanımlarını; işlem maliyetlerinin analizi ise bir görevin planlanmasına, adaptasyonuna ve kontrol edilmesine dair maliyetlerin kıyaslamalı bir biçimde analiz edilme sürecini ifade etmektedir [10], [14]. Adaptasyonu temel alan işlem maliyetleri yaklaşımı, işletmeleri, bir üretim fonksiyonundan çok bir yönetim yapısı olarak ele almaktadır. Buna göre işlem maliyetleri yaklaşımı açısından üretim birimleri olan örgütler; farklı özellikteki işlemlerden kaynaklanan maliyetler, yetenekler, güçlü yönler ve zayıflıklar bakımından farklılaşan yönetim yapılarıyla birlikte çevreye uyum göstermesi gereken yapılar

olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, işlem maliyetlerinin azaltılması için kurulan ilişkilerin, verimlilik temelli performans göstergelerinde iyileşme sağlayabileceğini ve bu sayede örgüt faaliyetlerinin kapsamına ilişkin etkin sınırların belirlenebileceğini öne sürmektedir [10], [11], [12], [13], [14], [15]. Diğer taraftan kısıtlı rasyonellikten ve fırsatçı davranış ihtimalinden dolayı anlaşmaların hatalı olabileceğini varsayan bu teori; işlemleri belirsizlik, gerçekleşme sıklığı ve yapılan yatırımların özgünlüğü açısından değerlendirmektedir. Buna göre özgün yatırımların bir sonucu olarak karşılıklı bağımlılık, işlemler için gerekli yönetim yapısını belirleyen temel unsurlardan biridir [10], [11], [12], [13], [14], [15]. Özgün yatırımlar ve karşılıklı bağımlılık arttıkça; otonom adaptasyonun, zayıf yönetsel kontrolün ve yasal düzenlemelere dayalı kuralların ön planda olduğu piyasa tipi yönetimden; işbirlikçi uyum stratejilerinin, yüksek yönetsel kontrolün ve özel düzenlemelerin öne çıktığı hiyerarşik bir işleyiş biçimine geçilmekte; bu iki uç nokta arasında ise güvenilir desteklere, maliyet etkililiğe, uzun vadeli ve sistematik işbirliklerine odaklı hibrid yöntem yer almaktadır [10], [11], [12], [13], [14], [15]. İlişkisel değişim teorisine göre, tek seferlik ayrık işlemleri yönlendiren normlarla, uzun dönemli ilişkisel değişimi yönlendiren normlar birbirlerinden farklıdır. Uzun dönem ilişkisel değişimde, normları içselleştiren taraflar; çeşitli işlemlerin yer aldığı, farklı konuları içeren karmaşık rollerin belirlenebildiği, eşsiz ve devamlı bir ilişkiye önem vererek karşılıklı, farklılaşmamış ve sürekli bir getiri anlayışına odaklanabilmektedir [16]. Kaynak bağımlılığı yaklaşımının ilişki yönetimi için güçlü bir altyapı sunma konusundaki yetersizliğine odaklanan Heide [17], bir ilişkinin kurulması, korunması ve sonlandırılması açısından farklılık gösteren üç temel ilişkisel yaklaşım olduğunu ileri sürmektedir: “(i) piyasa tipi ilişkiler, (ii) piyasa dışı, hiyerarşik ve tek yönlü ilişkiler, (iii) piyasa dışı karşılıklı çift yönlü ağlar”. Bu yaklaşıma göre bahsi geçen üç ilişkisel yaklaşım birbirlerinin ikamesi gibi görünseler de bu yöntemlerin birbirini tamamlayacak biçimlerde kullanılması mümkündür.

Piyasa tipi yaklaşım; mal ve hizmet akışının, arz-talep dengesiyle ve organizasyonlar arası işlemlerle koordine edildiği; ürün fiyatı, miktarı, tasarımı ve teslimatına ilişkin kararların piyasa güçlerince belirlendiği; üretim maliyetlerinin koordinasyon maliyetlerine kıyasla daha az olduğu ilişkisel yapıları ifade etmektedir [18]. Diğer taraftan hiyerarşik yapılarda ürün akış koordinasyonuna ilişkin kararlar bir üst yönetim tarafından sağlanmakta; bununla birlikte koordinasyon maliyetlerinin üretim maliyetlerine göre daha düşük kaldığı görülmektedir [18]. Ağlar ise bireylerin ve organizasyonların, çeşitli sebepler doğrultusunda bir araya gelerek birbirleriyle etkileşim kurması sonucunda oluşmaktadır [19]. Ağlar, geniş bir çerçeveden bakıldığında, “bir dizi düğüm ve bu düğümlerin belirli ilişkiler içerisindeki bağlanma biçimleri” şeklinde tanımlanabilmektedir [20]. Bu durumda, hiyerarşik pozisyonları ifade eden bürokrasi kavramı da özel bir ağ tipi olarak değerlendirilebilmektedir. Diğer taraftan yapısal bakış açısı, piyasa tipi ilişkiler ve hiyerarşiler de dahil olmak üzere her organizasyon şeklinin farklı bir ağ formunu ifade ettiğini kabul etse de ağlara yönetim biçimi olarak bakıldığında ağ tipi organizasyonların daha net bir tanımı şu şekilde yapılabilmektedir [21]: “Bir ilişkideki çatışmaları yönetebilecek ve çözebilecek yasal otoriteden yoksun olmakla beraber, tekrarlı ve dayanıklı ilişkileri takip eden iki ve daha fazla tarafın, bir araya gelerek oluşturdukları organizasyon biçimi.”

Piyasaların yaşadıkları sorunlarla beraber geçirdikleri dönüşüm evrelerini karşılaştırmalı olarak inceleyen Williamson [22] ; işlemsel faktörlere dair bireysel tutumlardan kaynaklanan sorunlara işaret etmektedir. Ancak, piyasa ve hiyerarşi tipi yapıları, özellikle kronolojik anlamda, devamlılığı olan bir düzlemin iki uç noktası olarak görmek, hem ekonomik gelişimi ve ticaretin karmaşık gerçekliğini anlamayı hem de iş birliğini ve karşılıklılığı alternatif bir yönetim biçimi olarak değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle piyasa, hiyerarşi ve ağ tipi organizasyonların ayrı biçimde ele alınması gerekmektedir [23]. Bu açıdan bakıldığında, diğerlerinden farklı olarak, ağ tipi yapılanma; bir etkileşim ortamında sürekli ve sıralı işlemleri, karşılıklı destekleyici eylemleri, taraflar arası dengeyi, kar-zarar paylaşımını, karşılıklı oryantasyonu, kaynak bağımlılığını ve tamamlayıcı güçlerin uzun dönemli ilişkilere güvenerek

bir araya getirilmesini gerektirmektedir. Piyasa tipi ilişki formlarına göre daha az, hiyerarşilere göre daha fazla esneklik sağlayan ağlar, hem yeni bilgi ve yeteneklerin öğrenilip aktarılmasına hem de değeri kolayca ölçülemeyen birimler arasındaki karşılıklı değişim faaliyetlerine daha uyumlu örgütsel yapılardır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte bahsi geçen teori ve kavramların etki alanı elektronik bağlama taşınmıştır. Bakos'a göre (1991) alıcı ve satıcı yapıları buluşturan elektronik piyasalar, “*Çok sayıda organizasyonun ürün ve fiyat bilgilerini paylaşarak bilgi edinme maliyetlerini azalttıkları ve bu sayede rekabet ortamında fiyat düşüşü elde ettikleri bir piyasa ortamı*” olarak tanımlanmaktadır. Entegrasyon düzeyini belirleyen temel altyapı bileşeni olarak enformasyon ağları, tedarik zinciri aktörleri arasında sistematik olarak yürütülen bilgi paylaşımları sayesinde koordinasyon maliyetlerini azaltarak genel etkinlik düzeyini artırmaktadır [24]. Teknolojik açıdan karşılıklı bağımlılıklardan farklı olarak; elektronik piyasaları da kapsayan havuz tipi bir ilişki, rekabet eden veya iş birliği halindeki ekonomik aktörlerin etkinlik düzeyini etkilemektedir. Bu iş birlikleri değer zincirlerinde birimler arası sıralı bağımlılığa dayalı etkileşimlerle birlikte tedarik, üretim, dağıtım, stok ve fiyat gibi temel politikalara yansıyan belirsizlikleri azaltmaktadır. Böyle bir ortamda ağ tipi organizasyonel yapılar ise karşılıklı bağımlılığa dayalı, kısa veya uzun dönem ilişkileri kullanarak farklı aktörlerden gelen tamamlayıcı yetenekleri bir araya getirmektedir [25], [26]. Bu açıdan bakıldığında organizasyonlar arasındaki ilişkileri bütüncül bir bakış açısıyla inceleyen yaklaşımların, ağ kuramı ve ağların kuramı gibi iki temel araştırma zemininin ortaya çıkmasında etkili olduğu kabul edilebilir.

Müşteri istek ve beklentilerinin karşılanabilmesi için farklı organizasyonların, tedarik zincirleri üzerinde farklı süreçleri üstlenerek birlikte hareket etmesi gerekmektedir. Bu durum tedarik zincirlerinin genel etkinlik ve verimlilik düzeyini artırmak isteyen organizasyonları tedarik zinciri entegrasyonuna yöneltilmektedir. Sanal sinir ağları formunda ortaya çıkan entegre enformasyon sistemleri tedarik zincirlerinin her aşamasında katma değer yaratan faaliyetlere dair bilgilerin etkin işleyen enformasyon sistemleri sayesinde paylaşılmasını mümkün kılmaktadır [27]. Cash ve Konsynski'ye göre [28], organizasyonlar arası sistem (OAS) kavramı “*firmalar arasındaki ortak enformasyon sistemleri*” olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, ilişki alternatiflerinin sayısı ve kalitesindeki artışı mümkün kılarak enformasyon akışının ve süreç entegrasyonunun daha kolay, ucuz, hızlı ve etkin biçimde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu sayede yetersiz enformasyon ve bunların işlenmesinden kaynaklanan işlem maliyetleri azalmaktadır [29]. Tedarik zinciri yöneticilerini OAS kullanmaya iten en temel nedenler iletişim maliyetlerini azaltmak, envanter politikalarına yön vermek, otomasyon seviyelerini ve standart prosedürleri iyileştirmek, bilgi, malzeme ve ürün akış hızlarını artırmaktır. Bununla birlikte, OAS'ler ilk yatırım maliyetlerinin büyüklüğü, örgütsel etki alanı ve işletmelerin stratejik amaçlarına olan katkıları dikkate alındığında işletme stratejilerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmektedir [29], [30]. Rekabetçi tedarik zincirleri ve dış kaynak kullanım stratejileri için hızlı ve kesintisiz bir iletişim ağı gerekmektedir. Bu açıdan Endüstri 4.0 stratejilerinin temel uygulama alanlarından biri haline gelen OAS, yüksek hacimli veri ve enformasyon paylaşım olanakları sayesinde karmaşık iletişim gereksinimlerinin karşılanmasına, işlem maliyetlerinin azalmasına, organizasyonların güçlenmesine ve dış kaynak kullanım stratejilerinin etkinlik ve verimlilik düzeyinin artmasına olanak sağlamaktadır [31], [32].

Bu çalışmanın temel amacı, organizasyonlar arası sistemlere ilişkin bilimsel yazını çeşitli açılardan sınıflandırmak ve bu sınıflandırmayı temel olarak lojistik ve tedarik zinciri yönetimi alanında bu tür sistemlerin kullanımını etkileyecek ve bu sistemlerden etkilenebilecek olgulara ilişkin çalışmalara temel teşkil edecek bir sentez elde etmektir. Bu sayede gelecek araştırmalara ışık tutacak keşfedici ve betimleyici bulgulara ulaşılmıştır. Alana ilişkin yazın taramasında ön plana çıkan temel teorik yaklaşımlar; kaynak temelli görüş, kaynak bağımlılığı, organizasyonlar

arası ilişki, ilişkisel değişim ve işlem maliyetleri teorileri, yenilik yayılım teorisi, teknoloji kabul, kurumsallık, paydaşlık ve asil-vekil teorileridir [33], [34], [35].

Bunların yanında bu çalışma alan yazında “Ağ Kuramı (Network Theory)” ve “Ağların Kuramı (Theory of Networks)” olarak bilinen teorik yaklaşımları temel çalışma eksenini olarak belirleyerek; iki temel kurama uygun biçimde, OAS’lerin etki alanlarını, bu sistemlerin yayılım aşamalarını ve OAS’leri etkileyen temel faktörleri ortaya koyan çalışmaları sınıflandırarak yürütülmüştür. Bu sayede, literatürdeki iki önemli eğilim ve bakış açısı bütünlük ve kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

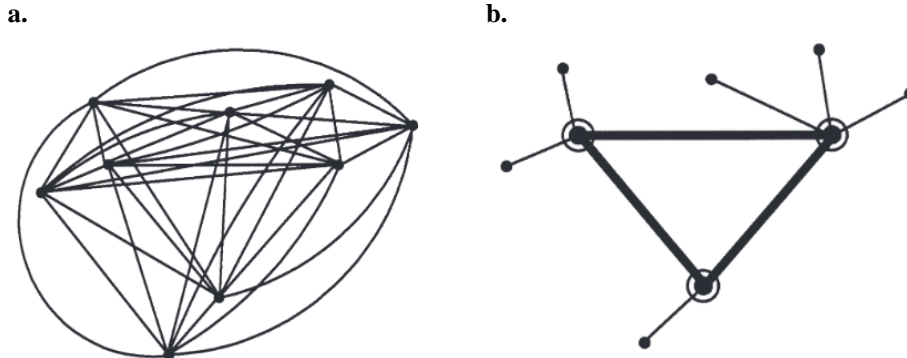
Çalışmanın ikinci bölümü, organizasyonlar arası sistemlere ve bu sistemlerin demiryolu taşımacılığındaki yerine, üçüncü bölüm temel alınan kuramsal yaklaşımlara dair bulgulara yer vermektedir. Dördüncü bölüm, yazın taramasına esas olan araştırma metodolojisine, beşinci bölüm ise analizlerin raporlanması sonucu ele edilen bulguların sentezine yer vermektedir. Çalışmanın altıncı bölümü ise uygulayıcılar ve alandaki gelecek çalışmalar için önerilerle birlikte sonuç kısmını oluşturmaktadır.

2. Organizasyonlar Arası Sistemler ve Demiryolu İşletmeciliği

Çalışmanın bu bölümünde OAS kavramına ilişkin kavramsal çerçeveye yer verilmiş; daha sonra OAS kavramının demiryolu işletmeciliği başta olmak üzere lojistik ve tedarik zinciri yönetimi yazını açısından taşıdığı öneme ilişkin teorik bir altyapı sunulmuştur.

2.1. Organizasyonlar arası sistemler

Organizasyonlar ağ teknolojileri, sistem geliştirme teknikleri, gerekli standart ve prosedürlerin etkisiyle, operasyonel odaklarını örgüt içi faktörlerin ötesine taşıyarak örgüt dışı faktörlere ve özellikle tedarik zincirlerine odaklanabilmektedir. OAS’ler veri, veri tabanı, uzmanlık, iletim tesisi, yazılım, donanım, kural ve prosedürler gibi enformasyon bileşenlerinin, tüm katılımcılara fayda sağlayabilecek bir biçimde, iki veya daha fazla organizasyon arasında paylaştırılmalarını sağlamaktadır [36]. OAS’ler işletmeler için sosyal, düzenleyici ve stratejik bir bakış açısı gerektiren, organizasyonlar arası ilişkilerdeki güç dengesini, rekabet durumunu ve endüstrilerdeki mevcut düzeni değiştirebilecek, etkinlik ve esnekliği arttırabilecek, iki veya daha fazla firma tarafından paylaşılan altyapı bileşenleridir [28]. Ponisio ve diğerleri [37], her organizasyonun bilgi ve enformasyon bileşenlerini işlediğini belirterek; OAS’leri katılımcılar arası enformasyon akışı ve değer yaratıcı süreçleri destekleyen bir organizasyonlar ağı olarak betimlemektedir. Organizasyonlar arası sistemler; örgütler arası stratejiler, organizasyonlar ve bunlar arası bağlantılardan oluşmakta; enformasyonu alıp işleyen, depolayan ve ileten teknik sistemler, süreçleri koordine etmek için gerekli bağlantıları ve enformasyon paylaşımını sağlayan unsurlar olmaktadır [38].



Şekil 1. İkilili ilişkilere dayalı (a) ve merkezi bağlantı noktası kullanan (b) ağ mimarileri [504]

OAS'ler 21. yüzyılın ilk yıllarından itibaren elektronik ticaretin temel destekleyici altyapı bileşenleri olmuştur. Diğer taraftan 2010'lu yılların başından 2025 yılına kadar olan dönemde tedarik zinciri aktörleri arasında ikili ilişkilere dayalı ağ modellemesi mantığının terkedilerek web tabanlı entegre modellere geçiş pek çok aktörün pek çok aktörle iletişime geçmesine ve dolayısıyla esnek ve düşük maliyetli bir çözüm ortamının elde edilmesine olanak sağlamıştır. Veri alışverişinde internet temeli teknolojilere dönük yönelimler OAS'lerin web tabanlı teknolojilerle desteklenerek geliştirilmesini gerekli hale getirmiştir. Yeni nesil OAS'leri etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin etki alanlarını anlamak tedarik zinciri iletişim sistemlerinde yaşanan değişim ve dönüşüm eğilimlerinin anlaşılmasını da gerekli hale getirmiştir. Şekil 1'de ikili ilişkilere dayalı (dyadic) ve merkezi bağlantı noktaları kullanan (hub and spoke) ağ modelleri görülmektedir. Buna göre ikili ilişkilere dayalı bilgi sistemi mimarileri çok sayıda tedarik zinciri aktörü arasında karşılıklı ilişki kurulmasını gerektirirken; özellikle web tabanlı mimari yaklaşım, verilerin merkezi ağ noktalarında toplanmasını ve bu büyük veri merkezleri arasında ana linkler kurulmasını gerektirmektedir.

Enformasyon, birçok farklı biçimde tanımlanabilse de kısaca mesaj akışı, bilginin oluşturulması ve şekillendirilmesi için gerekli bir ortam ve verilerin işlenerek anlamlı hale gelmesiyle oluşan bir sistem bileşenidir [39], [40]. Bilgi sistemlerinin temel işlevi, enformasyon akışı yoluyla bilgi üretmek ve elde edilen bilgileri işletme faaliyetlerinde kullanılacak üst düzey bilgi (knowledge) formlarına dönüştürmektir. Özellikle 1950'lerden itibaren, organizasyonlar, enformasyon işleyen birimler olarak; 1960'larla birlikte öğrenen ve 1970'lerin etkisiyle enformasyon işleyen ve karar veren sistemler olarak değerlendirilmişlerdir [41]. 1950'lerin sonlarında, enformasyon teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla otomasyona ilk adım atılmış; ardından işletmelerin operasyonlarına, stratejik planlama faaliyetlerine, uyguladıkları siberetiklere ve sistem düşüncesine yönelik anlayış, zamanla süreçlere ve bu süreçlerin etkileşimine ilişkin bakış açısını değiştirmiştir [42]. 1980'lere kadar olan çalışmalar, genelde, organizasyon içerisindeki mevcut enformasyon sistemlerinin bilgisayar temelli hale getirilmesine yoğunlaşırken; özellikle 1990'larla birlikte bu sistemlerin müşteri ve tedarikçileri kapsayacak şekilde genişletilebileceği; böylece ortak amaçlara ulaşmak için sınırları aşan faaliyetlerin, işbirliğinin ve senkronizasyonun mümkün hale gelebileceği görülmüştür [43]. Bu bağlamda enformasyon teknolojileri; zengin bilgi birikimine erişimi, enformasyonun anlamına dair kavramsal tartışma ve sentezlerin yapılabilmesini, diğer ilişkili faaliyetlerin farkına varılmasını, farklı formlarda gelişen işbirliği fırsatlarına erişimin mümkün hale gelmesini sağlamaktadır [44]. Enformasyon teknolojileri sayesinde bilgi kaynaklarına erişim, bu kaynaklar arasında bağlar kurarak daha geniş ve derin bilgi akışı, bilginin toplanması, depolanması, iletilmesi ve elde edilen bilgilerin örgüt hafızasına saklanması mümkün olmaktadır [45]. Özetle, organizasyonlara sınırlarını aşma, çeşitli ağlar kurma veya farklı ağların içerisinde yer alma olanağı sağlayarak fırsatlar sunan, bilgi paylaşımını, iş birliği ve entegrasyonu kolaylaştıran OAS'ler, modern iş yaşamı için kritik düzeyde önemlidir. Bu araştırma, tedarik zincirlerinin altyapı bileşenleri olarak görülen bu sistemlere ilişkin yazını, betimleyici bir perspektifle ve alan yazında hâkim olan teoriler ışığında incelemektedir.

2.2. Demiryolu sistemlerinin tarihi ve önemi

Sistematik uygulama sahası Sanayi Devrimiyle birlikte İngiltere'de ortaya çıkmış olmakla birlikte; dünya taşımacılık tarihinde demiryolu benzeri taşıma sistemleri çok daha uzun bir geçmişe sahiptir. 16. yüzyılda, Alman madenleri için inşa edilen, ancak kırılma oranlarının yüksek olması sebebiyle 17. yüzyılda demir kaplanarak kullanılan ahşap raylar demiryolu sistemlerinin en yakın öncülü olmuştur. 19. yüzyılla birlikte dövme demirden yapılan raylar daha sağlam bir altyapı kurulmasını sağlamıştır [46]. Richard Trevithick, 1801 yılında ürettiği ve 1802 yılında patentini aldığı buharlı motoru, tekerlekler üzerinde giden bir araç üzerinde ilk defa kullanmış; 1804 yılında benzer bir araçla, yaklaşık 14 kilometrelik bir tramvay hattı boyunca, on

ton demir yük taşımıştır [47]. George Stephenson, 1814'te ilk lokomotifi üretmiş; 1850'lerden sonra standartlaşacak olan haddelenmiş rayların tanıtılıp geliştirilmesine katkıda bulunarak modern hat yapılarının temellerini atmıştır. Bu lokomotif, Stockton-Darlington, Liverpool-Manchester ve Manchester-Leeds gibi hatlarda kullanılarak işlevselliğini kanıtlamıştır [48]. George Stephenson'ın çalışmalarıyla ilk defa buharlı lokomotiflerde yolcu taşınması için inşa edilen Stockton-Darlington hattı, demiryollarının yaygınlaşmasını sağlamış; özellikle Liverpool-Manchester hattının başarısı, yatırımcıların dikkatini çekmiştir. İngiltere'de, 1830'ların başında yaklaşık 112 kilometre olan hat uzunluğuna karşın, 1944-1947 yılları arasında 3.218 kilometre uzunluğunda hat inşa edilmiştir [49]. Ayrıca, bu hızlı büyüme karşısında İngiltere, önerilen alternatif demiryolu hatlarını değerlendirmek için hizmet mühendisleri ve uzmanları komitesini 1839'da; Demiryolları Departmanını "Railway Regulation Act"i yürürlüğe alarak ticaret komitesine rapor sunması için 1840'ta; Parlamento'ya yıllık rapor verecek olan Demiryolları Komisyonu'nu da 1846'da kurmuştur [50]. İngiltere'de yaşanan bu gelişmeler, başta Amerika ve Avrupa olmak üzere dünyanın farklı bölgelerinde demiryolu hatlarının inşa edilmesine öncülük olmuştur. Amerika 1830'da, Fransa 1832'de, Almanya ve Belçika 1835'te, topraklarındaki ilk demiryollarını inşa etmişlerdir [51]. Dönemin sınırları açısından değerlendirildiğinde, Osmanlı Devleti'nin, ilk demir yolunu, 1851 yılında Mısır'a, Anadolu sınırları dikkate alındığında ise 1856 yılında İzmir-Aydın ve İzmir-Kasaba güzergahlarına inşa ettiği; toplam demiryolu hatlarını, yirmi yıl içerisinde, 778 kilometreye çıkararak 1872'de Demiryolları İdaresini kurduğu görülmektedir [52].

Avrupa'da, buhar gücünün, özellikle de güvenilir, konforlu ve hızlı hizmet sunan demiryollarının gelişimiyle, etkin bir dağıtım ağı kurulmuş; böylece, coğrafi kısıtlara bakılmaksızın üretimin koordinasyonu, devamlı ve hızlı teslimatlar, bölgeler arası fiyat farklarının dengelenmesi, taşıma maliyetlerinin düşmesi, uzmanlığın ve ticaretin artması mümkün hale gelmiştir. Bununla birlikte, demiryolu sistemlerinin gelişimiyle kentsel gelişim, sermaye oranları, kaynak ve işçi dağılımı gibi ekonomik faktörler endüstriyel gelişime uygun hale gelmiştir [53]. İşletme organizasyonlarının gelişimi, etkin işleyen dağıtım sistemlerine bağlıdır. Bunun en temel örneklerinden biri, demiryollarının gelişiminden önce, özellikle ülke içindeki uzak eyaletlere erişim sorunları yaşayan Amerika Birleşik Devletleri'dir. ABD'nin taşımacılık sistemlerinde demiryollarının payını artırması özellikle Batı Avrupa'nın savaşa girmesiyle kuzey eyaletlerinin endüstrileşerek daha yoğun üretim ve dağıtım yapmaya başlamasını, bölgeler arası ürün, kaynak, teknoloji, insan ve yetenek transferleri sayesinde ticaretin artmasını, ithal bağımlılıkların azalmasını, hatta nüfus dağılımının farklılaşmasını kolaylaştırmıştır [54]. Sonraki yıllarda, hızlı ve yüksek hacimli taşımacılığı mümkün kılan demiryolu sistemleri, rekabet ve teknolojinin gelişimiyle birlikte dönüşüm geçirmiş; rekabetçilik, verilen hizmetlerin gelişmesi, operasyon ekonomisi vb. sebeplerle demiryollarında birleşmelere izin verilmiş; böylece, demiryolu sistemleri güçlenerek ABD ekonomisinin gelişmesine katkı sağlamıştır [55].

2.3. Organizasyonlar arası sistemlerin demiryolu işletmeciliği açısından önemi

Organizasyonlar arası sistemlerin taşımacılık sektörü ve dolayısıyla demiryolu lojistiğiyle ilişkisi lojistik tarihi açısından derin köklere sahiptir. 19. yüzyılın ortalarında, telgrafla iletişimin ve demiryollarıyla ulaşımın kolaylaşması, uzun mesafelere rağmen para, malzeme, ürün ve bilgilerin paylaşıldığı ağları etkin hale getirmiştir [18]. Demiryolu taşımacılık sistemleri benzer ağlar için önemini korurken, teknolojiye gelişmelerle birlikte, sofistike ve entegre organizasyonel iletişim sistemleri ön plana çıkmıştır. Swatman ve Swatman'a göre [56], organizasyonlar arası elektronik veri değişiminin temelleri, 1948 sonrası havayolu yük taşımacılığında, ardından 1960'larla birlikte demiryolu ve karayolu taşımacılığında kullanılan mesajların standartlara uyumunu sağlayan düzenlemelere ve bu sayede evrak temelli iletişim yöntemlerinin terk edilmesine kadar uzanmaktadır [56]. ABD'de taşımacılık sektörünün önündeki yasal düzenlemelerin sınırlandırılarak, iletişim protokollerinin serbest piyasa ekonomisinin işleyişine bırakılması havayolu, karayolu ve demiryolu sistemlerinde köklü değişimlere sebep olmuştur [57]. Özellikle,

elle kayıt tutmanın sebep olduğu karmaşıklık, gecikme, hata ve maliyetler demiryolu taşımacılığında lojistik akışlar için kısıtlayıcı engeller haline gelmektedir. Müşteri ihtiyaç ve beklentilerini karşılayabilmek için gerçek zamanlı akış planlamasına ihtiyaç duyan tedarik zinciri aktörleri, daha çok yükü daha hızlı ve etkin yöntemlerle taşıma beklentisindedir. Bu nedenle demiryolu sistemlerinde yük vagonlarının takip edilmeleri ve etkin bir çeken-çekilen araç planlaması kritik hale gelmektedir. 1970'lerde ABD demiryollarının çözüm aradığı yük vagonlarını otomatik olarak takip etme gereksinimi ancak 1990'larda, RFID teknolojileri sayesinde uygulanabilmiş; daha sonra, vagonların üzerindeki etiketleri yol kenarındaki okuyucularla algılayıp gerekli bilgileri merkeze ileten bu teknolojiler, Avustralya, Güney Afrika, Çin ve Hindistan gibi ülkelerde de kullanılmıştır [58].

Lojistik sektöründe organizasyonlar arası sistemlerin etkin kullanımı firmaların çalışma yöntemlerinden çevreyle ve müşterilerle olan ilişkilere kadar birçok faktörü etkilemektedir. Bu durum FedEx ve UPS gibi güçlü bilgi sistemi altyapısına sahip lojistik hizmet sağlayıcıların iş ve müşteri potansiyelini artırmalarına olanak sağlamaktadır [59]. Bir ürünün, tek bir taşıma modu kullanılarak müşteriye ulaştırılmadığı, bu nedenle farklı taşıma modlarının birlikte kullanılmasının gerektiği durumlarda OAS'lerin önemi artmaktadır. Bunun en önemli örneklerinden biri karayolu firmalarının demiryolu taşımacılığına ilişkin işlemlerinde elektronik veri değişim teknolojilerine yer verilmesidir [60]. Lojistik akış üzerinde etkili olan organizasyonel birimler arasında işbirliği gerektiren OAS'ler; ilişkileri, operasyonel kontrol süreçlerini, gönderi düzenlemeyi, verimlilik kontrollerini, başta işgücü olmak üzere kaynak gereksinim planlamasını, veri doğruluğunu, belgelerin eşleştirilmesini ve taşıma operasyonlarını iyileştirerek lojistik sektörünün yapısını değiştirmektedir [61]. Bu durum lojistik sektöründe bilgi sistemlerinin etkisiyle rekabet kurallarının yeniden şekillenmesine neden olmaktadır.

Küresel ağlar, nesnelerin interneti temelli açık küresel bir lojistik sistem oluşturmaktadır. Bu sayede fiziksel, dijital ve operasyonel süreçleri, yeniden organize edilen lojistik ağlar üzerinden yürüten lojistik hizmet sağlayıcılar taşıyacak yüklerin hareketliliğini, etkinliği ve çevre üzerindeki dışsal etkileri olumlu yönde etkileyebilmektedir [62]. Soosay ve diğerleri [63], lojistik hizmet sağlayıcıların, operasyonlarını OAS'ler sayesinde müşteri ve tedarikçilerle senkronize hale getirebildiklerini; bu sayede güvene dayalı ilişkiler kurulabildiğini ortaya koymuştur. Tedarik zinciri üzerinde güven, iş birliği ve sistem entegrasyonu temelinde kurulan bu türden sistematik ve stratejik iş birlikleri bilgi paylaşımını hızlandırarak daha güçlü bir iletişim ve süreç koordinasyonu elde edilmesini sağlamaktadır [63].

Mich ve Laumann'ın [64], lojistik sektöründe organizasyonlar arası güvenlik sorunlarını inceleyen yazın taraması bulgularına göre; demiryolu sistemlerinde bilgi akışlarının kesintiye uğramasına neden olan en kritik faktörler; yazılı prosedürlerle sağlanabilecek standartlara uyum eksiklikleri, organizasyon yeteneklerinden kaynaklanan yetersizlikler, koordinasyon sorunları ve enformasyon akışlarını kesintiye uğratan iletişim kesintileridir [64]. OAS'ler, taşıma hizmeti sağlayan organizasyonlara kolay iletişim, hızlı ve ucuz durum takibi, gelişmiş müşteri hizmetleri, rota planlama, erken ve güvenilir faturalama gibi süreçlerde destek sağlayarak tedarik zinciri operasyonlarının etkinlik ve verimlilik düzeyini iyileştirmektedir [65]. Demiryolu istasyonlarındaki konteyner terminallerinde yürütülen operasyonları mevcut ve geliştirilmiş durum simülasyonlarıyla birlikte inceleyen Mircetic ve diğerleri [66], veri tabanı uyumsuzluklarına odaklanarak, enformasyon akışı eksikliklerinden kaynaklanan sorunların farklı paydaşları kapsayan lojistik bilgi sistemleri ile aşılabileceğini ortaya koymuş; bu sistemler sayesinde operasyonel maliyetlerde düşüş elde edilebileceğini, bekleme ve aktarma zamanlarından tasarruf edilebileceğini, daha dengeli dağıtım ve kaynak kullanım olanaklarına erişim sağlanabileceğini ortaya koymuştur [66]. Özellikle farklı taşıma modlarının bir arada kullanılması maliyet ve zaman tasarrufu için koordinasyon gereksinimlerini artırmaktadır. Farklı modlara farklı paydaş seviyelerinden erişim sağlayabilen lojistik bilgi sistemleri; veri tekrarlarının yanı sıra yüklenici, taşıyıcı, gönderici, devlet kurumları ve diğer paydaşlar arasında

planlama, operasyon ve kontrol süreçlerinden kaynaklanan uyumsuzlukların ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Bu sayede etkin işleyen kapsayıcı bilgi sistemleri sayesinde süreç entegrasyonu kesintisiz işleyen operasyonel süreçlere katkı sağlayabilmektedir. Sholihah ve diğerleri [67], ÖAS'lerin denizyolu taşımacılığı yapan firmaların kara ve demir yolu taşımacılığı yapan ortaklarıyla kurduğu işbirliklerine etkisine odaklanırken; Wasesa ve diğerleri [68], vaka analizi tekniğiyle yürüttükleri araştırmada farklı taşıma modları kullanarak hizmet veren bir İskandinav firmasındaki sistemleri inceleyerek; otomatik bildirim ve onay özelliğiyle tedarik zinciri üzerinde yaşanan karmaşıklıkların önlendiğini; otomatik önerilerle sipariş-vagon atamalarının kolaylaştığını; vagon konumu, durumu ve içeriğine dair gerçek zamanlı bilgiler sayesinde taşıma süreçlerinde sorunların izlenebildiğini; vagon kullanım raporlarıyla performans değerlendirmelerinin ve taktik kararların daha hızlı alındığını ortaya koymuştur. Bahsi geçen vaka analizi bulgularına göre OAS'ler sayesinde lojistik hizmet sağlayıcı firma; taşıma bilgilerine erişim hızında yaklaşık %90'lık bir iyileşme elde ederken, sipariş-vagon atama sürelerinde %75-93 arası, toplam taşıma süresinde ise yaklaşık olarak %20'lik düşüş sağlamıştır [68].

Üstün yetkinliklerine karşın OAS'ler tedarik zincirlerinin farklı aşamalarında uygulama biçiminden kaynaklanan farklı problemler nedeniyle başarısız olabilmektedir. Kaushik ve Kumar [69], geçiş sürecinin uzunluğu, yüksek maliyetler, kullanıcı direnci, örgüt iç faktörlere gereğinden fazla odaklanma, bazı ortakların amaç ve önceliklerini göz ardı etme, kullanıcıların sistemle olan zayıf ilişkileri, koordine olamama, yetersiz yöntemlerden dolayı esnek olmayan planlama, teorik konulara gereğinden fazla odaklanma gibi sebeplerden dolayı hizmet sektöründeki OAS planlarının yalnızca % 69 oranında uygulanabildiğini ortaya koymuştur [69]. OAS risk faktörlerini araştıran Sutton ve diğerleri [70], lojistik hizmet sağlayıcılar için OAS uygulamalarını etkileyen faktörleri; “Teknik Boyut”, “İşletme Boyutu” ve “Kullanıcı Boyutu” olarak üç grupta incelenmiştir [70].

Nandy'ye göre [71] demiryolu taşımacılığı yapan lojistik hizmet sağlayıcı işletmelerin elektronik tedarik sistemlerinde yaşanan temel sorunlar; kullanıcı dostu arayüzlerin eksikliği ve tedarik zinciri paydaşlarını kapsayan entegrasyon sorunları nedeniyle çalışanların uzayan süreçlerden kaynaklanan direncidir. Sharma ve Khandekar [72] tarafından Hindistan'da demiryolu sistemleri ile işbirliği içinde çalışan işletmeler üzerinde yürütülen vaka çalışması bulgularına göre, lojistik süreçlerde performans artışı sağlayan temel unsurlar; işbirlikçi online çalışmalar, entegre işleyen veri tabanları, yüksek hızlı ağ sistemleri, elektronik süreçlerle uyum sağlayabilen bir toplumsal kültür, bilgi yönetimi ve iş akış uygulamaları olarak sıralanmıştır. Diğer taraftan aynı çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre yeni ve eski teknoloji uyumsuzluğu, değişime direnç, standartların ve yeteneklerin eksikliği gibi problemler tedarik zinciri entegrasyonunun kesintiye uğramasına neden olarak lojistik hizmet performansını düşürebilmektedir. Lufthansa Havayollarının tedarikçileri kapsayan entegre bilgi sistemleri acentelik hizmeti sağlayan birçok servis sağlayıcıyı gelişmiş bir sistem üzerinde bir araya getirmektedir. [32] Lufthansa, sisteme entegre olan tur operatörlerini bu sistemlere bağlı arayüzleri kullanmaya zorlarken, ürün seçeneklerinin kısıtlanmasına sebep olabilmektedir. Bununla birlikte aynı sistemler sektöre giriş engelleri oluşturarak, maliyetleri azaltıp çeşitliliği artırarak, değişimlere tepki hızını artırarak ve iletişimle koordinasyonu geliştirerek tur operatörleri için rekabet avantajı sağlayan bir unsur haline gelmektedir [73].

OAS'ler ticaret ve taşımacılığı kolaylaştırabilmek için tedarik zincirleri üzerinde ortaya çıkan ortak ihtiyaçların karşılanmasına dönük bütünlük bilgisi sistemleridir. Bu türden kapsayıcı sistemlerin salt bilgi teknolojileri yatırımları olmaktan çıkmaları; tedarik zinciri entegrasyonunu sağlayan entegre bilgi sistemlerinin çözüm üreten stratejik bileşenler haline gelmesine, üst yönetim tarafından desteklenen etkin ve uyumlu kontrol süreçlerinin tanımlanmasına, ortak BT standart ve protokollerinin paylaşılan normlar haline gelmesine, üçüncü taraf profesyonellerinin desteğine, sistemleri geliştirip entegre ederek uygulanmasını sağlayan takımların yanı sıra, destekleyici informal ve formal iletişim kültürünün varlığına bağlıdır [74]. Demiryolu

işletmeciliğine ve alana özgü lojistik süreçler farklı tedarik zinciri aktörleri arasındaki belirsizliklerin giderilmesini, devamlılığın, karşılıklı şeffaflığın, güvenin, amaç farkındalığının ve koordinasyonun sağlanmasına bağlıdır [75], [76].

3. Ağ Kuramı ve Ağların Kuramı

Bir araştırma alanı olarak organizasyonlar arası ağlar, katılımcıların konumlarını ve ilişkilerin yapısal özelliklerini inceleyen sosyal ağlar perspektifinin yanı sıra ilişkilerin içerik ve biçimlerini ele alan yönetsel perspektiflerden de destek almaktadır [77]. İlişkisel kavram veya süreçler açısından ifade edilmiş teorileri, modelleri ve uygulamaları içeren sosyal ağlar, birimler arası ilişkilerin yanı sıra bu ilişkilere ilişkin örüntüleri takip ederek çeşitli alanlardaki yapıları, bu yapıların gelişimini ve etkilerini sistematik veriler, grafikler ve matematiksel modeller yardımıyla incelemektedir [78], [79]. Bu türden bir yaklaşım, bireyler ve grupları noktalarla, bunların arasında kurulan ilişkileri çizgilerle, taraflar arası uzaklıkları ise kurulan çift yönlü bağların sayı ve uzunluğuyla ifade etmektedir [80]. Birey veya gruplar arası ilişkiler, farklı özellikte çeşitli yapılar oluşturabilmekte; dolayısıyla bu yapılar arasında veri akışına dönük sorunlar tedarik zinciri aksaklıklarına neden olabilmektedir. Örneğin, enformasyonun araçlarla bir zincir boyunca aktarılması anlamın bozulmasına yol açabilirken, direkt bağlarla ve alternatif kanallar kullanılarak aktarılması bu durumun önüne geçebilmektedir. Bunun yanı sıra ağ tipi iletişim formları, farklı entelektüel kaynaklara sahip bireyleri bir araya getirerek ortak bir paydada buluşturabilmekte; bu sayede oluşan sinerjik etkiler örgütsel stresin azaltılmasını, işletme süreçlerinin yürütülmesine ilişkin yaratıcı fikirlerin desteklenmesini de sağlayabilmektedir [81].

Sadece birey ve grupların değil; olaylar, fikirler veya nesnelere gibi birçok biçim ve işlevin de birbiriyle bağını içeren ağ tipi örgüt yapıları, ağ halinde bir araya gelen organizasyonel birlikteliklerdir. Bu tür yapılar esnek ve çevik süreçlerle çalıştıklarında değişken çevre koşullarına dikey, katı ve emir-komutayla yönetilen bürokrasilere kıyasla daha hızlı ve etkin yanıtlar vererek rekabet üstünlüğü aracı haline gelmektedir [82]. Sosyal birimlerin, belirli ölçütler çerçevesinde, birbirlerine bağlanarak oluşturdukları ağları incelemek, birimler arası ilişkilerin kapsamını, biçimini, işlevini ve bu ağların var olma sebeplerini anlamaya çalışmanın yanı sıra, bu ağların oluşumu için tedarik zinciri aktörlerinin uyum mekanizmalarının da anlaşılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle ağ tipi yapıların temel ağ bileşenlerinin yanı sıra alt gruplar ve bireyler düzeyinde incelenmesi de bir gereklilik haline gelmektedir [83]. Alan yazında ağ tipi sistemlerle ilgili iki temel teorik yaklaşım ön plana çıkmaktadır: “(i) Ağların Teorisi (*Theory of Networks*) ve (ii) Ağ Teorisi (*Network Theory*)”. Ağların Teorisi yaklaşımı ağların gelişimleriyle ağ yapılarının ve konumların oluşma sebeplerini inceleyerek ağ değişkenlerini ortaya çıkaran öncülleri inceleyen bir kuramsal perspektif sunarken; “Ağ Teorisi (*Network Theory*)” ağ ilişkileri sonucunda ortaya çıkan sonuçları, ağın özelliklerinin bir fonksiyonu olarak açıklayarak ağ yapılarının etkisel alanlarını araştıran kuramsal bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır [84], [85], [86].

Ağlar, birimler arasında kurulan ve farklı içeriklere sahip birçok ilişki biçimini kapsayabilen örgüt bileşenleridir. Bu açıdan, birbirinin alternatifi olmayan, ayrık ancak birlikte hareket eden ilişkisel durum ve olaylara özgü özelliklerin temel alındığı sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Borgatti ve diğerleri [87], ağları durumlar açısından benzerlikler ve sosyal ilişkiler; olaylar açısından da etkileşimler ve akış yapılarına göre sınıflandırmaktadır. Bu yaklaşım ağ alanındaki çalışmaların, çoğunlukla enformasyon akışlarına, sosyal ilişkilerden veya etkileşimlerden yapılan çıkarımlara odaklandığını ortaya koymaktadır [87]. Bu yaklaşıma göre, devamlılık temelli durumsal ilişkiler; benzerlikler, fiziksel yakınlık, paylaşılan tutumlar ve ortak katılım gerektirirken; sosyal ilişkiler yakınlığa, rollere, ve algılara yönelik ilişkileri içermektedir. Olaylara dayalı etkileşimler işlemleri ve değişimleri içeren, akışlar için gerekli koşulları sağlayan, tekrarlayabilen ancak ayrık olayları; akışlar ise malzemelerin, finansal kaynakların ve enformasyonun taraflar arası aktarımını ifade etmektedir.

Nelson'a göre [88], ağ tipi yapılarda baskın tarafın aracılığı ve güçlü bağlar sayesinde kurulan sistematik ilişkiler, yıkıcı çatışmaları önleyebilmektedir. Diğer taraftan Granovetter'a göre [89], bir ağdaki birimler arasında kurulan güçlü bağlar benzer ilişki biçimlerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, ağlar arası köprü görevi gören zayıf bağlar da yeniliklerin yayılmasını sağlayan ikincil faktörler haline gelmektedir. Güce dayalı koordinasyon modelleri, katılımcıların eylemlerini düzenleyip koordine ederek oluşan sinerjiyi arkasına almak suretiyle tek bir birim gibi hareket etme çabasındaki ortak yapılara odaklanırken; daha gelişmiş ağ akış modelleri sosyal sistemleri, enformasyon akışı sağlayan bir kanallar ağı olarak incelemektedir [90]. Bu ayrıma göre akış modellerinde, kurdukları bağlar açısından merkezi birimler daha hızlı ve kesin bilgiye ulaşmakta; akışın izlediği yol, yayılım hızı, iletişim tarzı ve kesinliği önem kazanırken, kaynaklara erken erişerek süreçlerini güçlendiren aktörler güçlenmektedir. Bununla birlikte kapitalizasyon, diğer organizasyonel yapıların görev ve yeteneklerini devralarak dikey entegrasyon sağlamak suretiyle gerçekleşmektedir. Koordinasyon modelleri; gücün ağ yapısına ve bu yapıda işgal edilen konuma bağlı olduğunu; hatta benzer konumdaki izomorfik birimlerin, hiçbir bağları olmasa da benzer çıktılar elde edebildiğini; bu durumda katılımcıların alışveriş ilişkisinin yanı sıra güçlü bağlar kurarak tek bir organizasyon gibi davranabildiklerini; böylece sahip olmadıkları yetenekleri tamamlayarak rekabet üstünlüğü elde edebildiklerini öne sürmektedir.

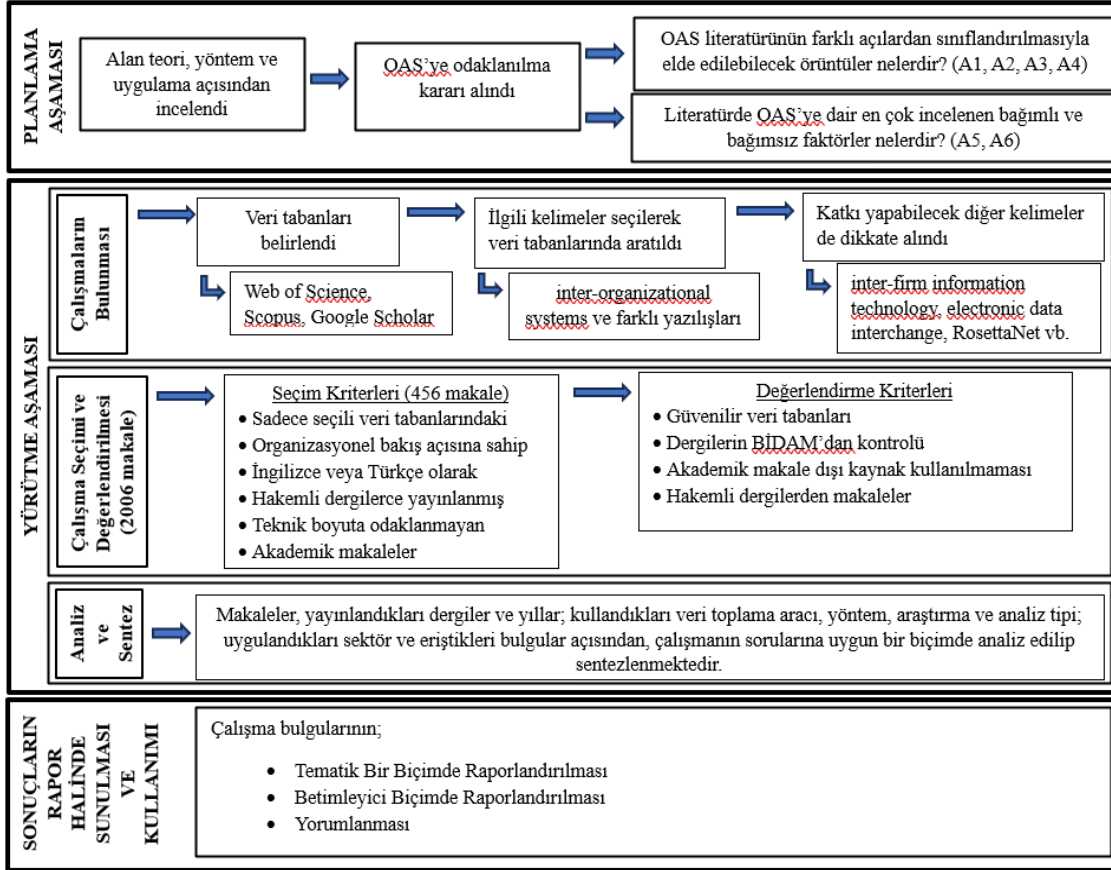
Özetle, temel amaçları ağ temelli ilişkileri araştırmak olan iki kuramsal perspektifi temsil eden ağ teorisi ve ağların teorisi, organizasyonlar arası ilişkilerin incelenmesi için yaygın biçimde kullanılan iki temel kuramsal yaklaşımı temsil etmektedir. Organizasyonlar arası enformasyon sistemleri, hem ağlara dair yazında esas olarak odaklanılan enformasyon akışlarını hem de organizasyonlar arası ilişkileri kapsamaktadır. Bu sistemler, organizasyonlar arası ağ yapılarının teknolojik bir izdüşümü olarak görülebilmekte; gerekli başarı faktörleri sağlandığında tedarik zinciri üzerinde sistematik ve stratejik iş birliği halindeki organizasyonel yapıların operasyonel süreçlerine katkı sağlayabilmektedir. Keşfedici metodolojik yaklaşımın benimsendiği bu araştırmanın temel amacı, organizasyonlar arası sistemler yazınına ağların teorisi perspektifinden yaklaşarak bu sistemlerin ortaya çıkış sebeplerini, öncüllerini ve gelişimlerini; öte yandan ağ teorisi perspektifinden bakarak sistemlerin tedarik zincirleri üzerindeki temel etki alanlarını, alan yazında ortaya çıkan araştırma eğilimleri ekseninde incelemektir.

4. Araştırma Metodolojisi

Tranfield ve diğerleri [91], yazın taraması çalışmalarının geçerliliğini ve kalitesini arttırabilmek adına, sağlık bilimleri alanında geliştirilmiş olan sistematik yöntemlerin, işletme yazınına uyarlanarak kullanılabilirliğini savunmaktadır. Bu doğrultuda araştırma kapsamında benimsenen sistematik yöntem, yazın taraması tekniği için "*Planlama, Yürütme ve Raporlayarak Yaygınlaştırma*" olarak adlandırılan üç aşama halinde yürütülmüş ve her bir aşama alt boyutlarıyla birlikte detaylandırılmıştır. Tablo 1'de görülebileceği üzere Denyer ve Tranfield [92] tarafından oluşturulan bu model; sorunun formüle edilmesi, çalışmaların tespit edilip bulunması, değerlendirilip seçilmesi, analiz edilip sentezlenmesi ve sonuçların raporlanarak kullanılması olarak sıralanabilecek beş temel sistematik adımdan oluşmaktadır [92]. Yazında yaygın olarak benimsenen [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100] ve yazın taramasının temel sistematik çerçevesini oluşturan bu çalışma tekniği Tablo 1 ve Şekil 1 üzerinde açıklamalı olarak betimlenmiştir.

Tablo 1. yazın taraması sürecine ilişkin temel adımlar

Tranfield vd. [91]	Denyer & Tranfield [92]
Planlama Aşaması	Sorunun Formüle Edilmesi (kapsam çalışması, soru belirleme, ilgili düzeltmeler)
Yürütme Aşaması	Çalışmalar erişim (akademik makale, kitap, konferans, web sitesi, veri tabanları, seminerler, teknik raporlar, gri literatür vb.) Çalışma seçimi ve değerlendirilmesi Analiz ve sentez
Raporlama Aşaması	Sonuçların raporlanması



Şekil 2. Çalışma planı

4.1. Planlama aşaması

Öncelikli olarak çalışmanın kapsamını belirlemek ve konusunu sınırlandırmak amacıyla alan yazın teori, yöntem ve uygulama açısından sistematik olarak incelenmiştir. Bu aşamada, organizasyonlar arası ilişkiler ve teknolojiler açısından OAS'lere odaklanma kararı alınmıştır. Tranfield ve diğerleri [91], yönetim alanında yürütülen araştırmalarda araştırma probleminin net biçimde tanımlanmasından çok kavramsal tartışmalara yer verilmesini, araştırmanın önemini belirtilmesini, protokolün ise daha esnek belirlenmesini önermektedir [91]. Benzer şekilde, Denyer & Tranfield [92], probleme dair anlayış geliştikçe araştırma sorularının yeniden ele alınabileceğini savunmaktadır [92]. Bu doğrultuda araştırmanın temel soruları şu şekilde sıralanabilir:

- OAS'leri ele alan çalışmalar, yayımlandıkları dergi ve kitap bölümlerine göre nasıl bir alansal dağılım göstermektedir?

- OAS'leri ele alan çalışmalar, yayınladıkları yıllara göre nasıl bir dağılım göstermektedir?
- OAS'lere yönelik çalışmalarda kullanılan metodolojik yaklaşımlar (veri toplama aracı, yöntem, araştırma ve analiz tipi) nasıl bir dağılım göstermektedir?
- OAS'lere yönelik çalışmaların sektörel dağılımı nasıldır?
- OAS'leri ve bu sistemlere ilişkin temel bileşenleri etkileyen faktörler nelerdir?
- OAS'lerin ve bu sistemlere ilişkin temel bileşenlerin etki ettiği faktörler nelerdir?

4.2. Yürütme aşaması

Yazın taramasında incelenen bilimsel yayınlara, “Scopus”, “Web of Science” ve “Google Scholar” platformları üzerinde, “inter-organizational systems” kelime grubu ve bu kelime grubunun farklı yazılışları aratılarak ulaşılmıştır (bkz. Tablo 2).

Tablo 2. Veri tabanlarında aratılan kelimeler ve eser sayıları

Veri tabanları	inter-organizational systems	inter-organizational systems	inter-organisational systems	inter-organisational systems	Toplam
SCOPUS	224	208	224	23	679
WEB OF SCIENCE	107	249	16	12	384
GOOGLE SCHOLAR	370	411	112	50	943
Toplam	701	868	352	85	2006

Ayrıca, konuya katkı sağlaması olası olan bazı sözcük ve sözcük gruplarını içeren çalışmalar da değerlendirmeye alınmıştır. Bu ifadeler, organizasyonlar arası sistemleri, bu sistemlerin özel biçimlerini, standartlarını ve bu sistemlerle gerçekleştirilen işlemleri içermektedir. Bahsi geçen ifadeler şu şekilde sıralanabilir: “inter-organizational information systems”, “inter company systems”, “inter-firm information technologies”, “information technologies between firms”, “external IT”, “electronic data interchange”, “RosettaNet”, “radio frequency identification”, “inter organizational transaction”, “e-integration”, “e-collaboration”, “e-commerce”, “e-procurement”.

Çalışma, sadece hakemli dergilerde Türkçe veya İngilizce olarak yayınlanmış akademik makale ve kitap bölümlerini kapsamaktadır. Bu nedenle konferans bildirileri, bilimsel olmayan kitaplar da yazın taramasının kapsamı dışında bırakılmıştır. Ayrıca doğa bilimleri ve mühendislik yazınında teknoloji ve sistemlere ilişkin teknik konulara odaklanan makaleler de çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Yazın taraması genel sistematığının temel amacı, düşük kaliteli makaleleri dışlamaktansa, bu makalelerdeki sınırlılıkların belirlenip raporlanmasıdır [92]. Bu nedenle bahsedilen değerlendirme kriterleri, makalelerin mevcut çalışmaya dahil edilip edilmemesinde kesin bir karar faktörü olarak ele alınmamış; nihai karar, makaleler okunarak verilmiştir.

Sonuç olarak organizasyonlar arası sistemleri ele alan 2006 adet makaleden 456'sı yazın taraması kapsamına alınmış; incelenen makaleler yayınladıkları dergiler ve yıllar, kullanılan veri toplama aracı, yöntem, araştırma ve analiz tipi, araştırma konusu sektör ve bağımlı-bağımsız değişkenler bakımından sınıflandırılmıştır.

4.3. Raporlama aşaması

Bu çalışma, Tranfield ve diğerlerinin [91] metodolojik yaklaşımına uygun biçimde; betimleyici ve tematik bir analiz sunmaktadır. Betimleyici analiz sonuçlarının raporlanması, mevcut

çalışmada ele alınan makalelerin kullandıkları metodolojik yaklaşımlara, inceledikleri sektörler, yayınladıkları yıllara ve dergilere göre dağılımlarıyla ilgili fikir vermektedir. Tematik raporlamayla, organizasyonlar arası sistemlerin ve bu sistemlere dair aşamaların etkiledikleri ve bu sistemlerin etkilendikleri faktörlere ilişkin yoğunlaşma alanları ortaya çıkarılmıştır.

5. Bulgular

Araştırmanın bu bölümünde araştırmanın temel bulgularına yer verilmiştir. Buna göre elde edilen bulgular; yazının genel betimleyici analizine, alan yazında ön plana çıkan açıklayıcı araştırma metodolojisine dayalı eserlerde bağımlı değişken ve bağımsız değişken olarak ele alınan faktörlerin tematik analizine ve elde edilen bulguların sentezine dayalı olarak üç alt bölümde incelenmiştir.

5.1. Yazın taraması kapsamında elde edilen betimleyici bulgular

Araştırma kapsamında yürütülen yazın taraması, OAS kavramını farklı metodolojilerle ele alan 456 bilimsel yayını kapsamaktadır. İncelemeye konu edilen eserler, toplamda 183 ayrı dergi ve bilimsel kitapta yayınlanırken; makalelerin %66'sının yalnızca 46 akademik dergi tarafından yayımlandığı görülmüştür. Bu dergiler ve yayınladıkları makalelere Tablo 3'te ayrıntılı biçimde yer verilmektedir. Eserlerin yayımlandığı dergilerin temel çalışma alanları dikkate alındığında alana ilişkin araştırmaların yaklaşık olarak %58'lik kısmının yönetim bilgi sistemleri ve bilişim sistemleri alanında, %27'lik kısmının üretim yönetimi, lojistik yönetimi ve karar destek sistemleri alanında, %9'luk kısmının ise pazarlama alanında yoğunlaştığı görülmüştür.

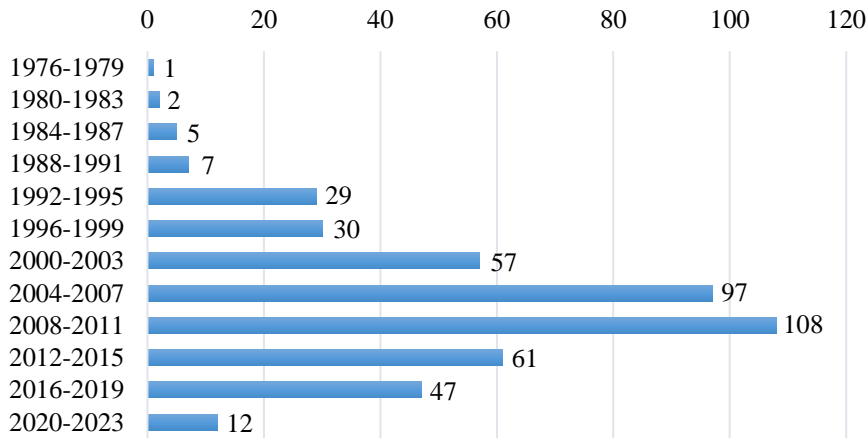
Tablo 3. OAS üzerine makale yayınlamış dergiler (2 ve daha az makale yayınlayanlar dahil edilmemiştir)

Dergi Adı	Makale Sayısı	Makaleler
Information & Management	27	[101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127]
Information Systems Research	14	[128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141]
Journal of Strategic Information Systems	14	[30], [32], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153]
European Journal of Information Systems	13	[154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166]
International Journal of Information Management	12	[65], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174], [175], [176], [177]
International Journal of Production Economics	11	[178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185], [186], [187], [188]
Journal of Management Information Systems	11	[189], [190], [191], [192], [193], [194], [195], [196], [197], [198], [199]
MIS Quarterly	11	[25], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209]
Industrial Management & Data Systems	10	[57], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218]
Journal of Information Technology	8	[219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226]
International Journal of Operations & Production Management	7	[227], [228], [229], [230], [231], [232], [233],
Supply Chain Management: An International Journal	7	[234], [235], [236], [237], [238], [239], [240]
Decision Sciences	7	[241], [242], [243], [244], [245], [246], [247]
Decision Support Systems	7	[248], [249], [250], [251], [252], [253], [254]

Journal of Enterprise Information Management	7	[68], [255], [256], [257], [258], [259], [260]
European Journal of Operational Research	6	[261], [27], [262], [263], [264], [265]
Information Systems and e-Business Management	6	[266], [267], [268], [269], [270], [271]
Journal of Business Logistics	6	[272], [273], [274], [275], [276], [277]
Journal of Computer Information Systems	6	[278], [279], [280], [281], [282], [283]
Communications of the Association for Information Systems	6	[284], [285], [286], [287], [288], [289]
International Journal of Production Research	5	[97], [98], [290], [291], [292]
Information Systems Management	5	[293], [294], [295], [296], [297]
Benchmarking: An International Journal	5	[298], [299], [300], [301], [302]
Journal of Business & Industrial Marketing	5	[303], [304], [305], [306], [307]
Information Technology and Management	5	[308], [309], [310], [311], [312]
International Journal of Electronic Commerce	5	[313], [314], [315], [316], [317]
Journal of the Association for Information Systems	5	[33], [70], [318], [319], [320]
Journal of Operations Management	5	[321], [322], [323], [324], [325]
Electronic Markets	5	[326], [327], [328], [329], [330]
IEEE Transactions on Engineering Management	5	[331], [332], [333], [334], [335]
Information Systems Journal	4	[336], [337], [338], [339]
Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce	4	[60], [340], [341], [342]
Electronic Commerce Research and Applications	4	[343], [344], [345], [346]
Business Process Management Journal	4	[347], [348], [349], [350]
Internet Research	4	[351], [352], [353], [354]
Internet Research: Electronic Networking Applications and Policy	3	[355], [356], [357]
The International Journal of Logistics Management	3	[358], [359], [360]
Logistics Information Management	3	[361], [362], [363]
International Marketing Review	3	[364], [365], [366]
Management Science	3	[367], [368], [369]
International Journal of Networking and Virtual Organisations	3	[370], [371], [372]
Industrial Marketing Management	3	[373], [374], [375]
Journal of Knowledge Management	3	[26], [376], [377]
Journal of Business Research	3	[378], [379], [380]
International Journal of e-Collaboration	3	[381], [382], [383]
Information Systems Frontiers	3	[35], [384], [385]

Şekil 2’de yazın taraması kapsamında analiz edilen eserlerin yayın yıllarına göre sıklık diyagramına yer verilmiştir. Tablo verileri dikkate alındığında, yayın sıklığının 21. yüzyılın ilk yıllarında dikkat çekici biçimde arttığı görülmektedir. Söz konusu artış 2004-2011 yılları arasında zirveye ulaşmıştır. Diğer taraftan alan yazında araştırma sayısının 2012 yılı sonrasında ciddi biçimde düşüşe geçtiği dikkat çekmektedir.

Elde edilen bulgular Krathu ve diğerleri [270] tarafından; organizasyonlar arası ilişkileri etkileyen paylaşımlı enformasyon teknolojilerine ilişkin yazın taraması bulguları ile örtüşmektedir. Bahsi geçen araştırma bulgularına göre alana ilişkin yayın sıklığı 2010 yılında en üst seviyeye çıkmakta; bununla birlikte 2011 yılı ve sonrasında keskin bir hızla düşüş eğilimine girmektedir. Benzer bir biçimde Wamba ve diğerleri [386] tarafından, kritik bir OAS bir bileşeni olan RFID (Radyo frekanslı tanımlama teknolojileri) ile ilgili olarak yürütülen yazın taraması bulguları, alana ilişkin yayınların özellikle 2007-2011 arasında yoğunlaştığını; özellikle 2009 yılında en yüksek seviyeye ulaştığını göstermektedir. Perakende sektöründe tedarik zincirlerinde etkili olan OAS’lere ilişkin yayınlara odaklanan Suriyantphupha & Bourlakis [387], benzer bir biçimde alana ilişkin yayın sayısının 2007-2010 yılları arasında zirveye ulaştığını; diğer taraftan 2013 yılı sonrası araştırma eğiliminin azaldığını ortaya koymuştur [387]. Alana ilişkin benzer sonuçlara ulaşan bir diğer yazın taraması ise Sila [34] tarafından yürütülmüştür. OAS’lere odaklanan bu araştırma bulguları da yine benzer bir biçimde 2013 yılı sonrası alana ilişkin yazın taraması bulgularında ciddi bir düşüş yaşandığını ortaya koymaktadır.



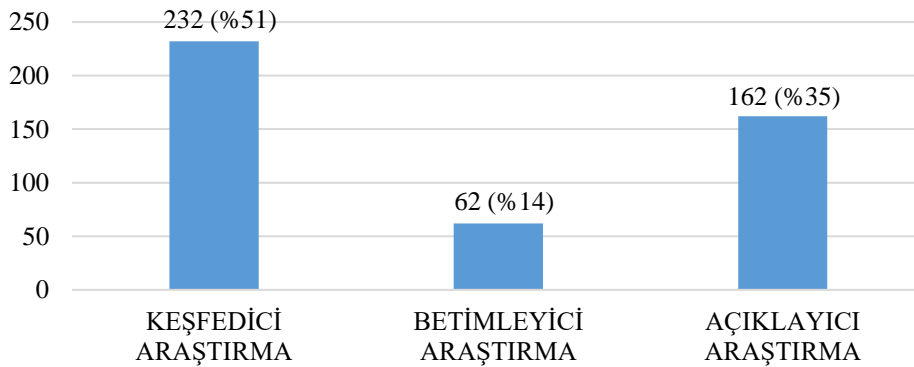
Şekil 2. Yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (4'er yıl aralıklı)

Yine benzer bir biçimde tedarik zincirlerinde etkili olan enformasyon sistemlerini, sürdürülebilirlik perspektifinden inceleyen Thöni & Tjoa'nun [388] yanı sıra, otomotiv tedarik zincirlerinin yönetilmesinde enformasyon sistem ve teknolojilerinin yerini inceleyen González-Benito ve diğerleri [292] de araştırma sıklığının 2012 yılı sonrasında keskin biçimde azaldığını ortaya koymuştur. Diğer taraftan tedarik zinciri enformasyon sistemlerine odaklanan Kakhki & Gargeya [389], konuyla ilgili yayınlanan eserlerin sıklığının 2014 yılı sonrasında düşmekle birlikte; 2015 yılı sonrası tekrar artışa geçtiğini ortaya koymuştur.

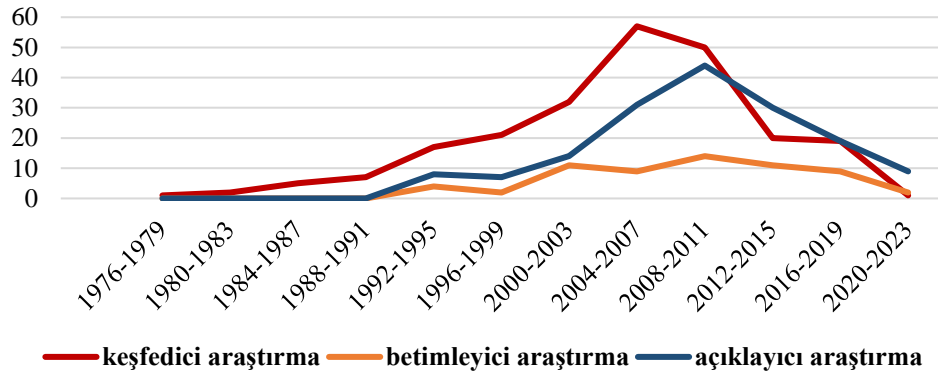
OAS'lere ilişkin araştırma sıklığının 2013 yılı sonrası azalışa geçişi Endüstri 4.0 ve sonrasında ortaya çıkan araştırma eğilimleri ile doğrudan ilişkilidir. Yunitarini & Santoso'ya göre [31] OAS ve temel OAS bileşenleri, yeni endüstriyel devrimin temellerini teşkil etmektedir. Bu düşünce biçimine göre EDI (Elektronik veri değişimi) ve RFID teknolojileri Endüstri 4.0'ın öncülleri olarak ön plana çıkmaktadır [31]; Wamba vd. [386], RFID'yi nesnelere internetine temel oluşturan bir bileşen olarak görmektedir [386]. Endüstri 4.0 teknolojilerinin, karşılıklı çalışmayı mümkün kılan doğasının yanı sıra; bu teknolojilerin, entegre enformasyon sistemlerine, ağlara, gerçek zamanlı enformasyon erişimine, entegre tedarik zincirlerine ve tedarik zinciri işbirlikleri

güçlü katkılar sağlaması Endüstri 4.0 teknolojilerinin OAS kavramının geçirdiği evrimin doğal bir sonucu olduğu görüşünü doğrulamaktadır [390], [391]. Sun ve diğerleri [392] tarafından, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi uygulamalarında Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenme düzeylerine odaklanan yazın taraması bulguları, alana ilişkin araştırma eğilimlerinin 2012 yılı sonrasında keskin biçimde güçlendiğini ortaya koymaktadır [392]. Benzer bir biçimde döngüsel tedarik zinciri uygulamalarında Endüstri 4.0 teknolojilerinin rolünü inceleyen Gebhardt vd. [393], bu alandaki yayın sıklığının 2015 yılı sonrasında radikal bir artış eğilimine girdiğini ortaya koymuştur [393]. Tedarik zinciri yönetimi alanında bulut teknolojilerine odaklanan Jede & Teuteberg [394], alana ilişkin araştırma sıklığının 2008 yılından itibaren arttığını ortaya koymuştur [394]. Queiroz'a göre [395]; aracısız işlemler üzerinden yürütülen süreçler sayesinde merkeziliği ortadan kaldırarak tedarik zincirlerinde ilişki biçimlerini, işbirliklerini ve güven anlayışını temelden değiştiren “*Blok Zincir*” teknolojisi ve tedarik zinciri yönetim entegrasyonunu derinden etkileyen Endüstri 4.0 teknolojileri birlikte incelendiğinde alana ilişkin araştırma sıklığının 2016 yılı sonrasında hızla arttığı görülmektedir. Özetle, OAS'yle ilgili çalışmalarda yayın sıklığı 2000'li yıllarla birlikte keskin biçimde artmış; diğer taraftan 2012 yılı sonrasında OAS'leri de kapsayan Endüstri 4.0 ve blok zincir teknolojilerini ele alan yayın sayısı söz konusu artış eğiliminin gelişerek devam etmesini sağlamıştır.

Şekil 3'te de görülebileceği üzere, araştırma kapsamında incelenen 456 makalenin 62'si betimleyici, 162'si açıklayıcı ve 232'si ise keşfedici niteliktedir. Diğer taraftan bu veriler alana ilişkin çalışmalarda ön plana çıkan farklı metodolojik yaklaşımların yıl bazlı dağılımını ortaya koyan Şekil 4 verileri ile birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. Buna göre 1976'dan 1991'e kadar olan süreçte, keşfedici çalışmaların ağırlığının hissedildiği; buna karşın bu eğilimin 2003 sonrasında düşüşe geçtiği görülmektedir. 2012 yılı sonrası açıklayıcı araştırma metodolojisine ait çalışmaların keşfedici araştırmaları geçtiği; diğer yandan her üç araştırma tipine ilişkin çalışma sıklığının 2013 yılından itibaren yerini Endüstri 4.0 ve benzeri çalışmalara bırakacak şekilde azaldığı görülmektedir.

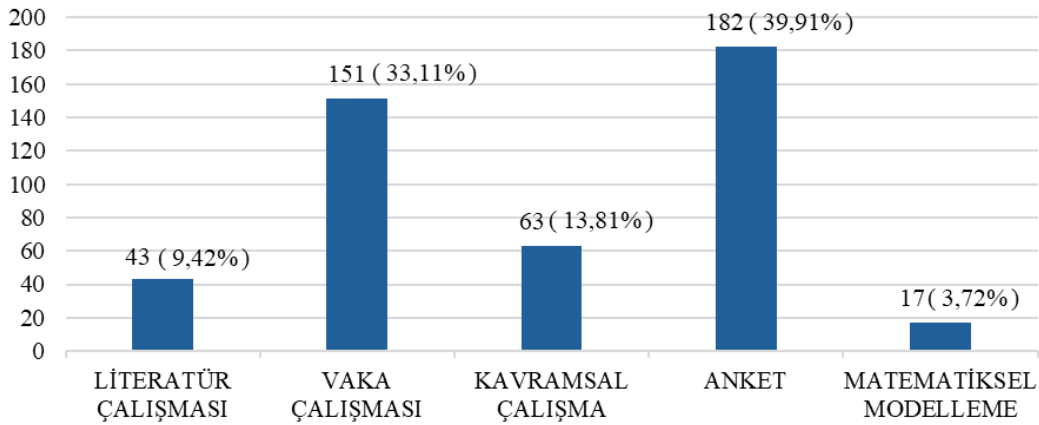


Şekil 3. Çalışmaların araştırma tiplerine göre dağılımı



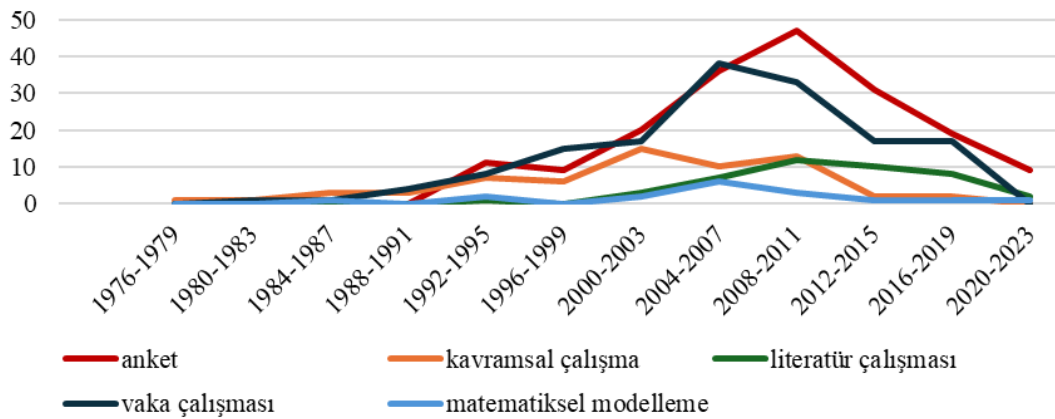
Şekil 4. Araştırma tiplerinin yıllara göre dağılımı

Araştırma kapsamında yürütülen yazın taramasına dahil olan eserlerde kullanılan araştırma yöntemlerini ortaya koyan Şekil 5 ve bu yöntemlerin yıl bazlı dağılımını ortaya koyan Şekil 6 verilerine göre en sık kullanılan araştırma yöntemleri genellikle anket yoluyla veri toplanan empirik araştırmalar ve spesifik OAS uygulamalarının bilimsel araştırma metodolojisine uygun olarak ele alındığı vaka analizleridir.



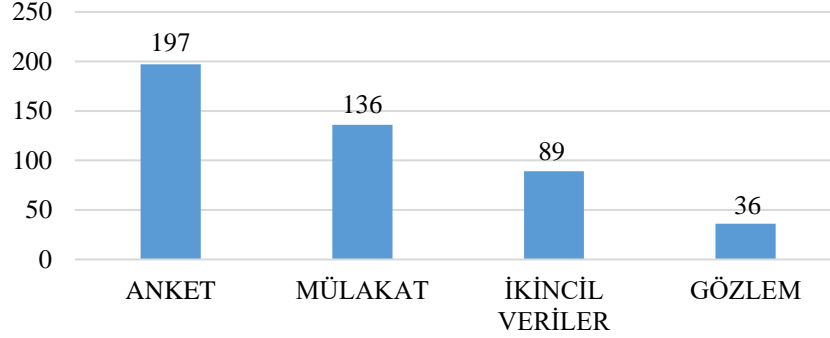
Şekil 5. Çalışmaların araştırma yöntemleri

Şekil 6 bulgularına göre, 2012 yılı sonrasında OAS araştırmalarında yerini Endüstri 4.0 araştırmalarına bırakan genel düşüş eğiliminin tüm araştırma yöntemlerine yansıtıldığı görülmektedir.



Şekil 6. OAS araştırma yöntemlerinin yıllara göre dağılımı

Diğer taraftan Şekil 4 ve Şekil 6 verileri birlikte ele alındığında, en sık görülen araştırma tipinin açıklayıcı araştırma metodolojisine uygun empirik araştırmalar olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, OAS'lerin etki alanlarının ve OAS'lere etki eden faktörlerin yazında halen sıklıkla ele alınan konular olduğunu ortaya koymaktadır.



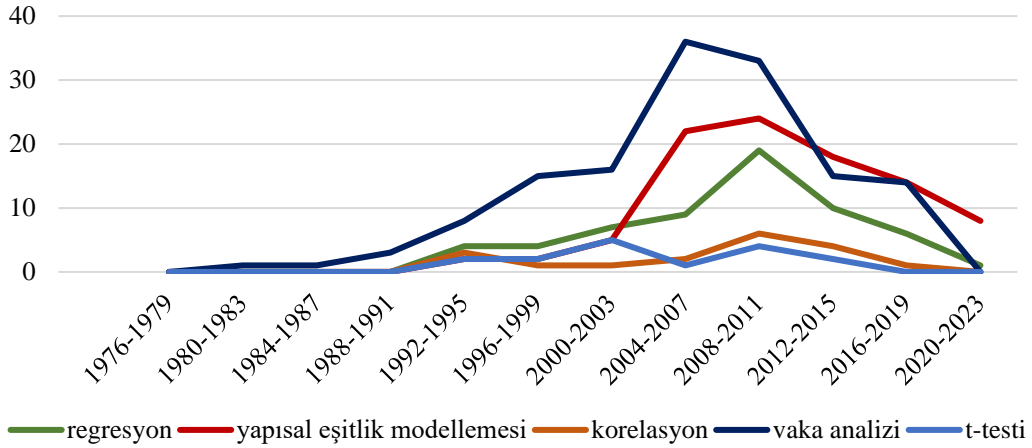
Şekil 7. Çalışmalarda kullanılan veri toplama yöntemleri

Şekil 7'de; araştırma kapsamında incelenen yayınlardan 197'sinin anket yöntemiyle, 136'sının mülakatla, 36'sının gözlemle veri topladığı; 89'unun ise veri kaynağı olarak ikincil verilere başvurduğu görülmektedir.

Tablo 4. Çalışmalarda kullanılan veri analiz yöntemleri

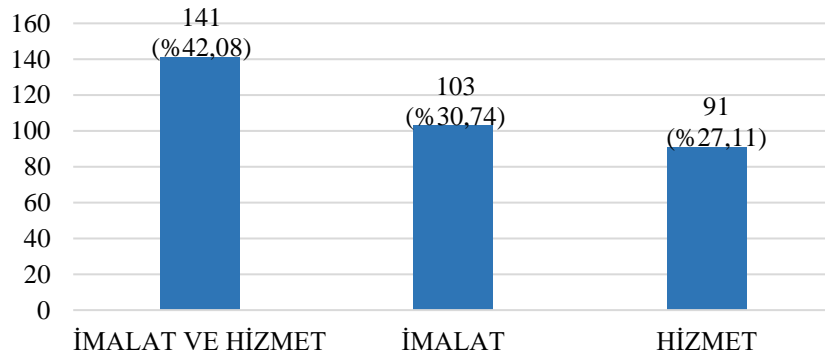
Analiz Yöntemi	Çalışma Sayısı
Vaka Analizi	151
Yapısal Eşitlik Modellemesi	95
Regresyon Analizi (Basit Doğrusal, Çoklu Doğrusal, Hiyerarşik, Logit, Tobit, Probit, En Küçük Kareler)	60
Korelasyon Analizi (Korelasyon, Kendall Tau, Spearman, Cramer's V)	18
T-Testi	16
Kümeleme Analizi	15
Anova	11
İçerik Analizi	8
Ahp	4
Mann-Whitney Testi	3
Simülasyon	3
Bulanık Küme Karşılaştırmalı Nitel Analizi	2
Manova	1
Ancova	1
Kruskal-Wallis Testi	1
Anp	1
Kolmogorov Smirnov Testi	1
Wilcoxon Sıralı İşaret Testi	1
Hedef Programlama Analizi	1
Friedman Testi	1
Vikor	1

OAS yazınında ön plana çıkan araştırmalarda kullanılan veri analiz yöntemleri Tablo 4'te sıralanmıştır. Elde edilen bulgular en sık kullanılan analiz yönteminin vaka çalışması olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca anket yoluyla toplanan verilere dayanan açıklayıcı araştırma tasarımına sahip araştırmalarda kullanılan yöntemlerde yapısal eşitlik modellemesi ve regresyon analizlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu durum OAS'leri etkileyen faktörlere ve bu faktörlerin etki alanlarına ilişkin araştırma eğilimlerinin yoğunluğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8. En çok kullanılan ilk beş analiz yönteminin yıllara göre dağılımı (4'er yıl aralıklı)

Şekil 9'da vaka çalışmaları ve diğer empirik analizlerde odaklanılan sektörel alanlar incelenmiştir. Bu bulgular OAS'leri konu edinen bilimsel araştırmaların imalat ve hizmet üretimi yapan işletme organizasyonlarını genellikle bir bütün olarak incelediğini ortaya koymaktadır. Bu durumda, lojistik sektörünün bir hizmet sektörü olmasının yanında değer zincirlerini doğrudan etkileyen bir temel işletme fonksiyonu oluşunun rolü büyüktür. Diğer taraftan açıklayıcı araştırma eğilimleri yaygınlaştıkça OAS'leri etkileyen ve bu faktörlerden etkilenen kavram, olay ve olguları sektörel bazda inceleyen araştırma eğilimleri de yaygınlaşmaktadır. Wang ve diğerleri [35] tarafından yürütülen yazın taraması bulgularına göre OAS araştırmaları 1985-2006 yılları arası dönemde tarım, finans ve taşımacılık sektörlerinde yoğunlaşmaktadır. Benzer bir biçimde Wamba ve diğerlerinin [386] yazın taraması bulguları alana ilişkin araştırmaların lojistik, perakende ve imalat sektörlerine odaklandığını ortaya koymaktadır.



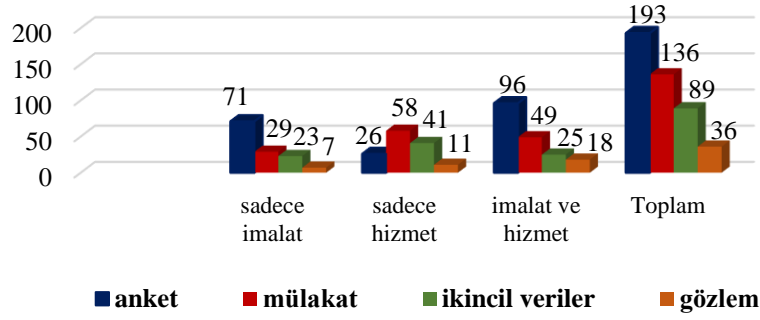
Şekil 9. Çalışmalarda odaklanılan sektörler

Alan yazında açıklayıcı araştırmaların yoğunlaşmasıyla birlikte OAS'lere ilişkin spesifik sektörel çalışmaların da yoğun biçimde ortaya çıktığı görülmektedir. Buna göre, Suriyantphupha & Bourlakis [387], perakende sektöründe örgütler arası bilgi sistemlerinin etkinliğine odaklanırken; Howard ve Holweg [43] ile González-Benito ve diğerleri [292] otomotiv sektörüne; Lang ve diğerleri [397] lojistik sektörüne; Merschbrock ve Munkvold [285] ile Xue ve diğerleri [398] inşaat sektörüne; Bigdeli ve diğerleri [399] yerel yönetimlere; Heart ve diğerleri [400] ise sağlık sektörüne odaklanarak OAS uygulamalarının tedarik zincirlerine özgü spesifik sektörel uygulamaları ile ilgili yazın taraması temelli araştırma faaliyetlerine katkı sağlamışlardır.

Tablo 5. Empirik çalışmaların ve vaka çalışmalarının sektörlere göre dağılımı
Empirik araştırmalarda kullanılan yaygın veri toplama yöntemleri

Sektör	Anketler	Vaka çalışması
İmalat	[210], [401], [179], [227], [402], [180], [181], [182], [273], [242], [234], [125], [189], [169], [104], [248], [128], [243], [298], [340], [303], [304], [299], [230], [129], [106], [403], [332], [191], [365], [404], [367], [233], [341], [278], [193], [133], [203], [366], [321], [378], [291], [322], [323], [333], [213], [324], [134], [215], [175], [310], [405], [406], [176], [148], [407], [149], [127], [345], [283], [408], [151], [409], [410], [411], [412], [413]	[101], [261], [102], [237], [414], [235], [185], [415], [267], [342], [315], [416], [280], [316], [334], [198], [417], [418], [419], [357], [188], [420], [121], [421], [422], [423], [424], [297], [425], [426], [427], [380], [177], [271], [428]
Hizmet	[272], [373], [255], [429], [60], [314], [430], [300], [431], [296], [432], [433], [434], [435], [436], [139], [218], [305], [437], [438], [439]	[336], [107], [192], [219], [196], [110], [440], [441], [442], [443], [209], [444], [143], [68], [160], [445], [446], [354], [74], [447], [146], [384], [448], [449], [327], [223], [450], [451], [452], [348], [453], [256], [349], [119], [65], [164], [288], [454], [455], [320], [385], [122], [150], [123], [152], [221], [258], [226], [61], [153], [124], [456], [457], [67], [37], [289], [458], [459], [460], [461], [462], [463], [464], [217], [465], [466], [467], [468]
İmalat ve hizmet	[69], [178], [266], [469], [167], [168], [470], [274], [359], [343], [374], [351], [154], [294], [229], [211], [471], [472], [170], [473], [249], [352], [184], [236], [474], [190], [308], [130], [313], [275], [475], [346], [244], [318], [368], [131], [245], [187], [476], [477], [204], [276], [108], [239], [205], [194], [206], [277], [195], [171], [268], [109], [295], [247], [381], [158], [135], [208], [338], [339], [216], [126], [145], [379], [253], [112], [113], [478], [479], [114], [284], [115], [281], [116], [312], [117], [335], [138], [118], [356], [120], [70], [480], [163], [481], [306], [482], [183], [483], [484]	[331], [485], [347], [212], [155], [201], [132], [207], [142], [137], [246], [376], [156], [111], [220], [486], [174], [159], [161], [136], [240], [224], [202], [30], [265], [371], [144], [325], [162], [375], [326], [319], [487], [165], [488], [489], [254], [490], [491], [260], [71], [492], [166], [363], [493], [494], [495], [350]

Tablo 5'te, alan yazında OAS'lerle ilgili olarak ön plana çıkan empirik araştırmaların sektörel dağılımı temel veri toplama araçlarıyla birlikte ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tablo 5 verileri Şekil 11'de veri toplama araçlarının sektörel dağılımını gösteren grafikte birlikte incelendiğinde ilk dikkat çeken bulgu imalat sektöründe ön plana çıkan veri toplama aracının anket, hizmet sektöründe ise vaka analizleri oluşudur. Bu durum hizmet sektöründe OAS uygulamalarına ilişkin keşfedici araştırmaların; imalat sektöründe ise açıklayıcı araştırma metodolojisine sahip araştırmaların daha yaygın olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Veri toplama araçlarının sektörlere göre dağılımı

5.2. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tematik açıdan analizi

Araştırmanın bu bölümünde, alan yazında OAS'lerle ilgili açıklayıcı araştırma tasarımına sahip empirik araştırmalarda kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler, konuya ilişkin araştırma eğilimleri ve tematik gruplaşmalar dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Tornatzky vd. [496] tarafından önerilen teknoloji-organizasyon-çevre (TOÇ) modeli bilgi sistemlerinin başarısını etkileyen faktörlerin sınıflandırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. TOÇ modeli, araştırmacıların farklı değişkenlere yer verebilmesini sağlamakta; ayrıca bireylerin kabul davranışlarına odaklanan teknoloji kabul teorisiyle tamamlayıcı bir biçimde kullanılabilir [497]. Bu araştırmada TOÇ modeli, organizasyonlar arası ilişki teorileriyle birlikte kullanılarak daha detaylı bir sınıflandırma mantığı benimsenmiştir.

Tablo 6 verileri, herhangi bir sınıflandırma yapılmaksızın incelendiğinde, OAS'leri etkileyen faktörlerle ilgili olarak yazında en sık kullanılan ilk on bağımsız değişkenin; “OAS ve standartlarının kullanımı (43)”, “OAS entegrasyonu (32)”, “ortaklığa ve ortağa güven (25)”, “işbirliği (21)”, ortağın gücü (18)”, “ilişki bağımlılığı (18)”, “OAS görelî avantajı (17)”, “organizasyonların IT yetenekleri (16)”, “bilgi paylaşımı (16)”, “OAS için üst yönetim desteği (14)”, “OAS uyumluluğu / uygunluğu (13)”, “taklit baskısı / rekabetçi baskı (13)”, “ilişki uzunluğu / dayanıklılığı (12)”, “OAS karmaşıklığı (11)”, “OAS ve standartlarının benimsenmesi (10)”, “normatif baskı (10)”, “çevresel belirsizlik (10)” olduğu görülmektedir.

Yazın taraması bulgularına göre alan yazında ön plana çıkan bağımsız değişkenlerin tematik olarak gruplandırılması sonucu ön plana çıkan alanlar yine Tablo 6'da gösterilmiştir. Bu verilere göre OAS'leri etkileyen en temel değişken grubunun “Organizasyonlar Arası İlişkiler (121)” olduğu görülmektedir. Bu tematik alan OAS'ler için gerekli olan işbirlikçi tedarik zinciri yapısının temel bileşenlerini ve süreç entegrasyonuna tedarik zinciri aktörlerinin kaynaklar, süreç altyapısı ve yönetsel eğilimler açısından hazır ve yatkın olma durumunu temsil etmektedir. Bu tematik grubu takip eden ikinci faktör grubunun, organizasyonların OAS uygulama stratejilerini doğrudan etkileyen özellikleri (94); üçüncü büyük faktör grubunun ise entegrasyon ve iş birliği eğilimleri (81) olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Bağımsız değişkenlerin tematik olarak sınıflandırılması

Tematik Alan	Bağımsız değişkenler	Frekans	Toplam	Tematik Alan	Bağımsız değişkenler	Frekans	Toplam		
ORGANİZASYONLAR ARASI İLİŞKİLER	ortaklığa/ortağa güven	25	121	ÇEVRESEL FAKTÖRLER	çevresel belirsizlik	10	44		
	ortağın gücü	18			rekabet yoğunluğu	8			
	ilişki bağımlılığı	18			piyasa belirsizliği	4			
	ilişki uzunluğu / dayanıklılığı	12			teknolojik belirsizlik	3			
	ilişki bağlılığı	9			Dışsal çevre	3			
	ilişkiye özgünlük (varlık, süreç, bilgi, işlemler)	8			devlet ve sektör düzenlemeleri	3			
	organizasyonlar arası uyum	8			endüstrinin bilgi yoğunluğu	3			
	iletişim / etkileşim	7			endüstrideki BT faaliyeti yoğunluğu	2			
	organizasyonlar arası adalet	3			BT platformlarının homojenliği	2			
	ilişkisel strateji ve yönetim	3			piyasa trend beklentisi	2			
	ilişkiden öğrenme	2			kaynakların önemi	2			
	ortak planlama	2			devletin sağladığı destek ve altyapı	2			
	ortaklık esnekliği / ilişki esnekliği	2			OAS' LERDEN BEKLENEN FAYDALAR VE ENGELLER	OAS görelî avantajı		17	39
	ağ yapısı / yapısal sermaye	2				OAS için engel ve riskler		7	
organizasyonlar arası ilişki portföy yoğunluğu	2	OAS'in mümkün kıldığı yetenek ve fonksiyonlar	5						
ORGANİZASYONLARIN OAS'YE İLİŞKİN ÖZELLİKLERİ	BT yetenekleri	16	94	OAS' LERDEN BEKLENEN FAYDALAR VE ENGELLER	OAS'nin kullanım başarısı ve etkililiği	4	37		
	OAS için üst yönetim desteği	14			OAS ve zincir görünürlüğü	3			
	OAS / BT altyapısı	9			ağ etkileri / dışsallığı	3			
	OAS deneyimi / tecrübesi	5			firmanın yenilikçiliği	6			
	BT bilgisi / uzmanlık	5			firmanın kapsamı	4			
	organizasyonların teknolojik hazırlıklılığı	5		organizasyonel yetenekler	4				
	OAS için içsel / organizasyonel destek	4		firmanın finansal durumu	3				
	OAS geliştirmeye istekli öncü kişinin varlığı	4		organizasyonel hazırlıklılık	3				
	teknolojiye güven / güvensizlik	3		Formalleşme	3				
	OAS'ye karşı tutum	3		Merkezlilik	3				
	OAS stratejileri	3		organizasyonel kültür	3				
	OAS rekonfigurasyonu / adaptasyonu	3		süreç adaptasyonu / BPR	2				
	OAS kullanımına dair eğitim ve buna verilen önem	3		bağlamsal çok yönlülük	2				
	OAS kullanım genişliği	3		uygulanan politikalar	2				
	kullanıcıların OAS geliştirilmesine dahil	3		enformasyon işleme gereklilikleri	2				
	OAS benimsenmesinden sonra geçen süre	3		BASKI UNSURLARI	taklit baskısı / rekabetçi baskı	13	33		
	OAS yatırımları	2			normatif baskı	10			
	OAS planlaması	2			zorlayıcı baskı	8			
	iş ve OAS stratejilerinin ve planlarının OAS uyumu	2			dışsal baskı	2			
	OAS kullanım derinliği	2							

Tablo 6. Bağımsız değişkenlerin tematik olarak sınıflandırılması (Devam)

Tematik Alan	Bağımsız değişkenler	Frekans	Toplam	Tematik Alan	Bağımsız değişkenler	Frekans	Toplam		
ENTEGRASYON VE İŞ BİRLİĞİ	OAS entegrasyonu (tedarikçiyle, müşteriyle, içsel)	32	81	PERFORMANSA DAİR DEĞİŞKENLER	operasyonel performans	9	25		
	İş birliği eğilimleri	21			cevap verebilirlik	4			
	süreç entegrasyonu / faaliyet entegrasyonu	9			operasyonel esneklik / arz esnekliği	2			
	tedarik zinciri entegrasyonu	8			tedarik zinciri çevikliği	2			
	Koordinasyon	5			tedarik zinciri performansı	2			
	Kooperasyon	4			stratejik performans	2			
	enformasyon entegrasyonu	2			süreç performansı	2			
OAS'LERİN ÖZELLİKLERİ	OAS uyumluluğu / uygunluğu	13	60		BİLGİ PAYLAŞIM DEĞİŞKENLERİ	pazar performansı		2	24
	OAS karmaşıklığı	11				bilgi paylaşımı		16	
	OAS'nin güvenliği	7		bilgi paylaşım kültürü		4			
	OAS'nin karşılıklı / birlikte çalışabilmesi	5		ÜRÜNE DAİR ÖZELLİKLER	bilgi kalitesi	4	22		
	OAS gelişmişliği / sofistikeliliği	4			ürün karmaşıklığı	8			
	denetim ve onaylama / kontrol prosedürleri	4			ürün işlem sıklığı ve hacmi	5			
	OAS kullanışlılığı / fonksiyonelliği	3			ürünün standartlığı / özgünlüğü	5			
	OAS güvenilirlik ve erişilebilirliği / güvenilirlik ve hızı	3		TEDARİK ZİNCİRİ ORTAKLARININ SAYISI VE HAZIRLIKLARI	ürüne ilişkin belirsizlik	4	17		
	OAS kalitesi (sistem, hizmet)	2			ortakların sayısı	6			
	OAS'nin uygulanabilirliği	2			OAS için tedarik zincirinden destek	4			
	OAS'nin denenebilirliği	2			tedarik zincirinin hazırlıklılığı	3			
	OAS'nin duyurulabilirliği / promosyonu	2			ortaklar ve zincir bazında teknolojik hazırlıklılık	2			
	OAS olgunluğu	2		KİŞİLER ARASI İLİŞKİ FAKTÖRLERİ	zincir ortaklarının uzmanlığı	2	4		
OAS YAYILIM AŞAMALARI	OAS ve/ya standartlarının kullanımı	43	58		meslektaşlar arası güven	2			
	OAS'nin ve/ya standartlarının benimsenmesi	10			meslektaşlar arası mevcut iletişim ve etkileşim	2			
	OAS asimilasyonu (içsel, dışsal)	5							

Wemba ve diğerlerine göre [386], OAS'leri etkileyen unsurların incelendiği çalışmalarda etkileri en sık incelenen faktörler sırasıyla; sistemlerin benimsenme düzeyi, kullanım stratejileri, teknik altyapı ve gizlilik stratejileridir. Grabski ve diğerlerine göre [498] OAS'ler üzerindeki etkileri açısından en sık incelenen kavramlar iletişim, değişim yönetimi faaliyetleri, kullanıcıların sistem geliştirme süreçlerini etkileme eğilimleri, rekabet stratejileri, kurumsal kontrol ve siber güvenlik stratejileridir. Bouchbout & Alimazighi [499], yazın taraması bulgularına göre OAS'lere etki eden temel unsurları iç çevre unsurları, dış çevre unsurları ve teknolojik unsurlar olarak üç grupta incelemektedir. Buna göre dış çevre unsurları; rekabet stratejileri nedeniyle oluşan dış baskı,

tedarik zincirlerinde sistem dönüşümüne hazırlık stratejileri ve tedarik zinciri aktörleri arasında güvene ve güç dağılımına bağlı ilişkiler olarak sıralanabilir. İç çevre unsurları; üst yönetim desteği, finansal kaynaklar, bilgi sistemlerinin gerektirdiği süreç yapılandırma stratejileri; teknolojik unsurlar ise güvenilirlik, güvenlik, ölçülebilirlik ve karmaşıklık düzeyidir. Gebauer ve Shaw [317] ise Bouchbout & Alimazighi'nin bahsi geçen sınıflandırma mantığını biraz daha genişleterek OAS'lere etki eden dört farklı faktör grubu olduğunu ileri sürmüştür; bu faktörleri organizasyonel faktörler, organizasyonlar arası faktörler, teknik faktörler ve OAS'lere dönük performans beklentileri olarak sıralamıştır. Bu sınıflandırma mantığına göre OAS'lerin uygulama ve geliştirme stratejilerini etkileyen örgütsel faktörler; sistem tasarımı, proje yönetim yetkinlikleri, iş modelleri ve süreç entegrasyon becerileri, organizasyonlar arası faktörler; piyasa yapısı ve piyasa işleyişinin örgütler arası ilişki biçimleri üzerindeki etkileri, teknik faktörler; altyapı unsurları ve standartlar, performans beklentilerine ilişkin unsurlar ise; performans beklentileri, sistemlerin benimsenme düzeyi ve performans değerlendirme sistemleridir. Krathu ve diğerlerinin [270] OAS'lerin başarısını etkileyen faktörlere ilişkin yazı taraması bulgularına göre; performans, güç, güven, uyumluluk, tedarik zinciri süreçleri, iletişim, bağlantılılık, bağımlılık, bağlılık, iş birliği ve entegrasyon seviyesi bu tür sistemlerin başarısını belirleyen kritik unsurlar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bulgular araştırma kapsamında elde edilen sistematik yazın taraması bulguları ile büyük ölçüde örtüşmektedir.

Yürütülen sistematik yazın taraması bulgularına göre OAS'lerin etki alanlarını inceleyen araştırmalarda ön plana çıkan kavramlar ise Tablo 7'de incelenmiştir. Buna göre OAS'lerin etkilerinin en sık incelendiği faktörler; *“operasyonel performans (35)”*, *“firma performansı (30)”*, *“OAS ve standartlarının kullanım düzeyi (25)”*, *“OAS ve standartlarının benimsenme düzeyi (20)”*, *“OAS benimsenme niyeti / kararı (17)”*, *“OAS entegrasyonu (17)”*, *“işbirliği (16)”*, *“tedarik zinciri performansı (12)”*, *“finansal performans (12)”*, *“bilgi paylaşımı (12)”*, *“süreç entegrasyonu (9)”*, *“tedarik zinciri entegrasyonu (8)”*, *“organizasyonel yetenekler (8)”*, *“cevap verebilirlik (8)”*, *“ortaklığa ve ortağa güven (7)”* olmuştur.

Bağımsız değişkenlere ilişkin tematik gruplaşma eğilimleri yine Tablo 7 üzerinde incelenmiştir. Buna göre alan yazında bağımsız değişkenleri temsil eden en büyük tematik gruplaşmaların sırasıyla; *“performans değişkenleri (138)”*, *“OAS yayılım aşamaları (72)”*, *“entegrasyon ve iş birliği (61)”*, *“organizasyonlar arası ilişkiler (22)”*, *“organizasyonların OAS'ye yönelik özellikleri (18)”*, *“OAS'lerden beklenen faydalar (17)”*, *“bilgi paylaşım değişkenleri (16)”*, *“organizasyon durum, yapı ve işleyişi (15)”* ve *“OAS'lerin genel özellikleri (5)”* olduğu görülmektedir.

Elgarah ve diğerlerinin [396] organizasyonlar arasındaki iletişim sistemlerine ilişkin yazın taraması bulgularına göre web tabanlı etkiler OAS'lerin başarı düzeyini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan OAS sistemlerin temel etki alanlarını da sistematik bir yazın taraması metodolojisi ile inceleyen bu araştırma bulgularına göre, söz konusu alanlar; OAS'ler sayesinde elde edilebilecek ekonomik fayda unsurları, kullanım, OAS yayılım süreçleri, güç, güven, risk yönetimi, sistem benimsenme düzeyi, iş birliği, koordinasyon ve paylaşılan veri türleridir. Wang ve diğerlerine göre [35] OAS'lerin etki düzeyinin incelendiği temel alanlar; sistemlerin tanınma ve benimsenme düzeyi, sistem performansı, tedarik zinciri aktörleri arasında güvene dayalı ilişkiler, başta KOBİ'ler olmak üzere diğer paydaşlarla veri paylaşımı olanakları olarak sıralanmıştır. *“Tedarik Zinciri Esnekliği”* ve *“Tedarik Zinciri Dayanıklılığı”* kavramları işbirlikçi sistemlerle birlikte ön plana çıkan iki temel performans ölçütüdür. Sağkan ve Başaran [505] tarafından, bu iki temel kavramla ilgili olarak yürütülen yazın taraması bulgularına göre tedarik zincirlerinde uyum, iş birliği ve sistem entegrasyonu temelli yetkinlikler ağ temelli işbirliği yaklaşımları ile; tedarik zinciri aktörleri arasındaki iletişim, OAS'ler, entegrasyon ve yönetsel kontrol sistemleri ise ağ akış modelleri ile incelenmektedir.

Tablo 7. Bağımlı değişkenlerin tematik olarak sınıflandırılması

Tematik Alan	Bağımlı değişkenler	Frekans	Toplam	Tematik Alan	Bağımlı değişkenler	Frekans	Toplam
PERFORMANS BOYUT VE ÖLÇÜTLERİ	operasyonel performans	35	138	ORGANİZASYONLAR ARASI İLİŞKİ ÖZELLİKLERİ	ortaklığa / ortağa güven	7	22
	firma performansı	30			ilişki bağımlılığı	6	
	tedarik zinciri performansı	12			ilişki uzunluğu	4	
	finansal performans	12			ilişkiye özgünlük (varlık, bilgi, süreç)	3	
	cevap verebilirlik	8			ilişki bağlılığı	2	
	rekabet avantajı / rekabetçi performans	6					
	müşteri hizmet performansı / müşteri tatmini	6					
	pazar performansı	6		ORGANİZASYONLARIN OAS'YE İLİŞKİN ÖZELLİKLERİ	BT yetenekleri (OAS planlama ve yönetim)	5	18
	ilişki performansı	6			teknolojiye güven	3	
	Çeviklik	5			OAS için organizasyonel destek	3	
	stratejik performans	4			planlanan OAS amaçlarının gerçekleştirilmesi	3	
	süreç performansı	4			iş ve OAS stratejilerinin ve planlarının uyumu	2	
	işlem maliyetleri	2			OAS / BT altyapısı	2	
	çevresel performans	2					
OAS YAYILIM AŞAMALARI	OAS ve/ya standartlarının kullanımı	25	72	OAS'YE DAİR BEKLENEN FAYDALAR	OAS'nin kullanım başarısı	7	17
	OAS ve/ya standartlarının benimsenmesi	20			OAS'nin mümkün kıldığı yetenek ve fonksiyonlar	5	
	OAS benimseme niyeti / kararı	17			OAS görelî avantajı	3	
	OAS asimilasyonu / rutinleştirilmesi	4		BİLGİ PAYLAŞIM DEĞİŞKENLERİ	OAS ve zinciri görünürlüğü	2	16
	OAS'nin içsel yayılımı	3			bilgi paylaşımı	12	
	OAS'nin dışsal yayılımı	3			bilgi paylaşma niyeti	2	
ENTEGRASYON VE İŞBİRLİĞİ	OAS entegrasyonu (tedarikçiyle, müşteriyle, içsel)	17	61	ORGANİZASYON DURUM, YAPI VE İŞLEYİŞİ	organizasyonel yetenekler	8	15
	işbirliği (tedarikçiyle, müşteriyle, içsel)	16			firmanın ve ortakların yenilikçiliği (dijital, sürece ve ilişkiye dönük)	5	
	süreç entegrasyonu / faaliyet entegrasyonu	9			bağlamsal çok yönlülük	2	
	tedarik zinciri entegrasyonu	8		OAS'NİN ÖZELLİKLERİ	kontrol prosedürleri	3	5
	Koordinasyon	6					
	Kooperasyon	3					
	enformasyon entegrasyonu	2			OAS'nin güvenliği	2	

5.3.Sentez

Bu araştırmanın temel amacı, 21. yüzyılın ilk çeyreğini kapsayan dönemde lojistik ve tedarik zinciri süreçlerinin kritik bir parçası haline gelen OAS'lere ilişkin araştırmaların teorik temellerini incelemektir. OAS'ler örgütler arası ilişkiler ve etkin işleyen tedarik zincirleri için bir altyapı unsuru olarak ön plana çıkmakta; böylelikle tedarik zinciri aktörleri arasındaki iletişim süreçlerini iyileştirirken iletişim maliyetlerinin yanı sıra tedarik zinciri süreçlerinin daha iyi yönetilmesinden kaynaklanan operasyonel iyileştirme olanakları sunmaktadır. Yazın taraması kapsamında, bütünlük tedarik zinciri çözümleri halinde uygulanan organizasyonlar arası bilgi sistemlerine odaklanılmış; alan yazında ön plana çıkan araştırma eğilimleri temel araştırma metodolojileri, veri toplama yöntemleri ve alan yazındaki yaygın araştırma desenleri açısından incelenmiştir.

İşletme alanında, üretim ve stratejik yönetim yazınında etkili bir yönetim yaklaşımı olan kaynak temelli kuram; bir firmanın sürdürülebilir rekabet avantajı elde edebilmesi için hayati önem taşıyan kaynakları belirlemek üzere yönetsel bir çerçeve sunmaktadır. Söz konusu kuram, bir şirketin performansının ve rekabet avantajının temellerini açıklamak ve tahmin etmek için taklit ve ikame edilmesi mümkün olmayan kaynaklara odaklanmaktadır. Bu yaklaşıma göre, bir işletmenin bahsi geçen stratejik kaynakların tümüne sahip olmasının ve bunları korumasının güçlüğü dikkate alındığında; tedarik zincirlerinin başarısı üretim birimlerinin stratejik kaynaklara sahip diğer işletmelerle kurduğu sistematik ve stratejik iş birliklerine bağlı hale gelmektedir. Diğer taraftan açık sistem perspektifini benimseyen bu bakış açısı, bu türden iş birlikleri için örgütler arasında etkin biçimde kaynak alışverişi yapmayı mümkün kılan bilgi sistemlerine ve bu sistemler üzerinde kesintisiz biçimde işletilen tedarik zinciri süreçlerine gereksinim duymaktadır. Araştırma bulguları bu teorik perspektifi doğrulamaktadır. Zira yazın taraması kapsamında elde edilen bulgulara göre tedarik zinciri aktörleri açısından OAS'lerle ilgili açıklayıcı araştırma metodolojisine sahip araştırmalarda en sık kullanılan bağımsız değişken grubu entegrasyon ve iş birliğidir. Bütünlük OAS'ler için tedarikçi ve müşteri entegrasyonunun yanı sıra içsel entegrasyon eğilimleri, iş birliği, süreç entegrasyonu ve koordinasyon kavramları bu açıdan OAS'leri etkileyen en temel faktörlerdir. Dolayısıyla alan yazında hâkim araştırma eğilimlerinin kaynak temelli tedarik zinciri iş birliği teorilerini desteklediği görülmektedir.

OAS'leri etkileyen bir diğer önemli teorik paradigma da organizasyonları çevreyle etkileşim halindeki büyük sosyal sistemlerin alt sistemleri ve kendi içlerinde alt sistemler arasındaki etkileşimlerin şekillendirici gücü altındaki yapılar olarak ele alan ilişkiyel yaklaşımlardır. Elgarah ve diğerlerinin [396] organizasyonlar arasındaki iletişim sistemlerine ilişkin yazın taraması bulgularına göre web tabanlı etkiler OAS'lerin başarı düzeyini etkileyen faktörleri doğrudan etkilemektedir. Buna göre teknolojinin örgütsel değişimin temel belirleyicilerinden biri olması, bilgi sistemlerinin gelişiminde en temel unsurdur. Bunun yanı sıra bilgi sistemleri yoluyla veri değişimi konusunda elde edilen maliyet avantajları bir yandan tedarik zinciri aktörlerini piyasa temelli ilişkiler geliştirmeye iterken, diğer yandan uzun vadeli ilişkilere dayalı ağ tipi yapılar da gelişmektedir. OAS alanında yürütülen empirik araştırmalarda en sık kullanılan bağımsız değişken grubunun "*Organizasyonlar Arası İlişkiler*" olması bu açıdan ilişkiyel kuramı ve bu kuramın OAS'ler üzerindeki etkisini doğrulamaktadır. Diğer taraftan OAS'lerin etkilerinin en sık incelendiği alanın "*Performans Boyut ve Ölçüleri*" olması ilişkiyel teorinin işlem maliyetleri kuramı ile desteklendiğine dair teorik varsayımı bir kez daha doğrulamaktadır.

6. Sonuçlar

Yazın taramalarının temel odak noktası alan yazına kapsayıcı bir bakış açısı getirmek; başka bir deyişle birbiriyle ilişkili fakat bağımsız nitelik taşıyan araştırma sonuçlarını nicel bir perspektifle inceleyerek sentez elde etmektir. Bu tür araştırmalarda, çok sayıda analizden elde edilen bilgileri bütünlükleştirerek alan yazında ön plana çıkan temel eğilimlerden elde edilen bulguların gelecek araştırmacılar için temel teşkil etmesi hedeflenmektedir. Bu açıdan araştırmanın temel katkısı

OAS'lere üretim, lojistik ve tedarik zinciri yönetimi perspektifinden bakarak alan yazında ön plana çıkan araştırma eğilimlerini ortaya koymaktır.

Serbest piyasa ekonomilerinde rekabet kavramı kaynakların en etkin kullanım yerlerine göre organize edilmesini ve fiyatlar genel düzeyinin uzun vadede dengelenmesini sağlasa da az sayıda firmanın taklidi ve ikamesi mümkün olmayan değerli kaynakların tümüne sahip olmasının güçlüğü dikkate alındığında iş birliği stratejileri kritik bir gereksinim haline gelmektedir. Rekabet stratejileri açısından kaynak bağımlılığı yaklaşımı rekabet üstünlüğünü açıklarken esas olarak kaynakları kontrol etmeyi sağlayan güç kavramına odaklansa da işlem maliyetleri yaklaşımı dış kaynak kullanımı yoluyla toplam süreç maliyetlerini kontrol ederek verimlilik düzeyinin artırılmasına odaklanmaktadır. Bu bakış açısıyla her iki teoriye dayalı araştırmaların ortak vurgusu tedarik zincirlerini üretim merkezlerinin birlikteliğinden ibaret bir yapı olmaktan çıkararak toplam tedarik zinciri fazlasının artırılması için iş birliklerine dayalı yönetim yetkinliklerini ön plana çıkarmaktadır. Araştırma kapsamında elde edilen en önemli bulgulardan bir diğeri, OAS'lerin veri iletişim teknolojilerindeki gelişim sayesinde piyasa tipi ilişkileri ve ağ tipi ilişkileri geliştirdiği; buna karşılık hiyerarşik eğilimlerin OAS'lerden olumsuz etkilenmekte oluşudur. Zira azalan işlem maliyetleri; tedarik zinciri aktörlerini daha fazla organizasyonla kısa vadeli ilişkiler kurmaya iten piyasa tipi eğilimleri desteklemektedir. Bununla birlikte artan iletişim yetenekleri sayesinde kurulan iş birlikleri uzun vadeli ve karşılıklı bağımlılıklara dayanan ağ tipi yapıları da desteklemektedir. Dolayısıyla artan iş birliği olanakları ve düşük maliyetli üretim olanaklarına örgüt dışı kaynaklar üzerinden ulaşmanın kolaylaşması, iç üretime odaklanan ve hiyerarşik yapılar halinde yatay ve dikey büyüme eğilimleri gösteren stratejik eğilimleri dezavantajlı hale getirmektedir. Özellikle lojistik ve tedarik zinciri yönetimi faaliyetlerinin yanı sıra bilgi sistemlerinde dış kaynak kullanım stratejilerinin yaygınlaşması sonucu işletmelerin çekirdek üstünlüklerine odaklanma eğilimlerinde görülen artış bu bulguları desteklemektedir.

Ağ tipi yapılar rekabet üstünlüğü için yeterli araç ve kaynak erişimi olmayan organizasyonların tedarik zincirlerinde iş birliği stratejileri geliştirmelerine neden olmaktadır. Bu durum kendi bünyesinde bulunmayan yeteneklere ihtiyaç duyan organizasyonların başka organizasyonlarla birlikte çalışarak daha büyük bir rekabet potansiyeline erişmelerini sağlamaktadır.

Bunun yanı sıra araştırmanın temel odak noktalarından biri OAS'leri etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin etki alanlarını ortaya koyarak neden-sonuç ilişkilerini etkileyen araştırma perspektiflerini alan yazında ön plana çıkan modern yönetim yaklaşımları açısından incelemektir. Bu doğrultuda elde edilen en temel bulgu gerek keşfedici gerek betimleyici ve gerekse açıklayıcı araştırma metodolojileriyle yürütülen çalışmalarda, örgütler arasındaki entegre iletişim sistemleri olarak OAS kavramının, ağırlığını 2012 yılı sonrasında kaybederek yerini Endüstri 4.0 kavramına bırakmakta oluşudur. Endüstri 4.0 teknoloji ve bileşenlerinin OAS'lerin gelişmiş uygulama biçimleri olduğu düşünüldüğünde, rekabet üstünlüğü arayışındaki tedarik zinciri aktörleri açısından örgütler arası bilgi sistemlerini etkileyen faktörlerin ve bu faktörlerin etki alanlarının Endüstri 4.0 teknolojilerinden bağımsız olarak düşünülmesi yersiz hale gelmektedir.

Tedarik zincirlerinde ikili ilişkilere dayalı bilgi sistemi mimarilerinin terkedilerek web tabanlı ve genellikle merkezi bağlantı noktası (hub and spoke) kullanan mimarilere geçiş eğilimleri Amazon, Wal-Mart, Target, Costco gibi büyük eko sistemlerin yükselişiyle birlikte güçlenmiştir. Araştırma kapsamında yürütülen bağımsız değişken analizlerinde OAS ilişkili yazında "*Organizasyonlar Arası İlişkiler*" değişken grubunun ön plana çıktığı görülmüştür. Bu tematik grubu; genellikle "*Bilgi Teknoloji Altyapısı*", "*Üst Yönetim Desteği*", "*OAS Deneyim ve Tecrübesi*", "*Bilgi Sistemi Proje Ekibinin Uzmanlık Düzeyi*" gibi organizasyonların OAS deneyimini şekillendiren özellikleri ve "*Entegrasyon ve İş Birliği*" gibi faktörler izlemektedir. Bu değişken gruplarının OAS'lerin başarısını etkileyen temel faktör grupları olarak ön plana çıkması ağ teorileri kapsamında ağ koordinasyon modellerinin yoğun biçimde araştırılmakta olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum ağ koordinasyon modellerinde OAS'lerin başarısını etkileyen

temel faktörün ağ üzerinde organizasyonel ve tedarik zinciri düzeyinde iş birliği temelli faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Genellikle güçlü OAS'lerle desteklenen tedarik zinciri altyapılarıyla ortaya çıkan büyük eko sistemlerin yükselişine rağmen tedarik zincirlerinde başarı, piyasa tipi ya da hiyerarşik mekanizmalardan çok ağ tipi ve işbirlikçi tedarik zinciri işleyiş modellerinin benimsenme düzeyine bağlı hale gelmiştir. Bilgi sistemlerinin gelişimiyle ortaya çıkan sosyal homojeniteye ilişkin temel belirleyici unsur koordinasyon modellerinin temel varsayımlarına uygun biçimde tedarik zinciri entegrasyon seviyesi olmaktadır. Bu durum geçmişte sermaye bazlı faktörlerin egemenliğinde hiyerarşik yapıların yükselişe geçtiği geleneksel tedarik zinciri dönüşümünden oldukça farklıdır ve bahsi geçen entegrasyon eğilimleri geniş halk kitlelerine doğru ürünün doğru yerde doğru fiyatlardan, hızlı ve bol çeşitlilikle sunulabilmesi gibi faydalarla yansımaktadır.

Araştırma kapsamında incelenen bir diğer konu da ağların teorisine özgü bir metodolojik yaklaşımla bağımlı değişkenlere ilişkin yoğunlaşma desenleridir. Buna göre OAS'lerin etki alanlarını araştıran çalışmaların farklı performans ölçütleri ve farklı performans boyutları üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum bilgi sistemlerine dönük pragmatik bir bakış açısını temsil etmektedir. OAS yayılım aşamalarına ilişkin araştırmaların sıklığı sistem bileşenleri arasındaki ilişkileri ağ akış modelleri kapsamında inceleyen araştırma eğiliminin alan yazındaki hakimiyetini ortaya koymaktadır. Bilgi sistemleri sayesinde yeni kaynaklara erişim olanakları elde ederek rekabet üstünlüğü elde etme arayışını temsil eden ve sosyal homojeniteyi ağ koordinasyon modellerinden farklı olarak bütünleşme modelleri ile değil yayılma stratejileri ile açıklayan bu bakış açısı OAS'lerin etki alanlarını inceleyen alan yazında oldukça sık biçimde ele alınmıştır. Diğer taraftan OAS'lerin etki alanlarına ilişkin alan yazında ön plana çıkan üçüncü bileşenin entegrasyon ve işbirliği oluşu ağ koordinasyon modellerinin OAS etki alanlarına ilişkin yazında da oldukça yaygın olduğunu doğrulamaktadır.

Kaynakça

- [1] G. J. Stigler, "Perfect competition, historically contemplated", *J. Polit. Econ.*, c. 65, sy 1, ss. 1-17, 1957.
- [2] G. J. Stigler, "Economic competition and political competition", *Public Choice*, c. 13, sy 1, ss. 91-106, Eyl. 1972, doi: 10.1007/BF01718854.
- [3] P. J. McNulty, "Economic theory and the meaning of competition", *Q. J. Econ.*, c. 82, sy 4, ss. 639-656, Kas. 1968, doi: 10.2307/1879604.
- [4] J. Barney, "Firm resources and sustained competitive advantage", *J. Manag.*, c. 17, sy 1, ss. 99-120, 1991.
- [5] J. Pfeffer ve G. R. Salancik, *The external control of organizations : a resource dependence perspective*. Stanford / California: Stanford University Press, 2003.
- [6] J. Pfeffer, "A resource dependence perspective on intercorporate relations", içinde *Intercorporate Relations: The Structural Analysis of Business*, c. 1, 1 c., Cambridge University Press, 1987, ss. 25-55.
- [7] W. M. Evan, "Toward a theory of inter-organizational relations", *Manag. Sci.*, c. 11, sy 10, ss. 217-230, Ağu. 1965, doi: 10.1287/mnsc.11.10.B217.
- [8] J. Galaskiewicz, "Interorganizational relations", *Annu. Rev. Sociol.*, c. 11, sy 1, ss. 281-304, 1985.
- [9] J. H. Dyer ve H. Singh, "The relational view: cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage", *Acad. Manage. Rev.*, c. 23, sy 4, ss. 660-679, Eki. 1998, doi: 10.2307/259056.
- [10] O. E. Williamson, "The economics of organization: the transaction cost approach", *Am. J. Sociol.*, c. 87, sy 3, ss. 548-577, 1981.
- [11] O. E. Williamson, "Transaction cost economics: how it works; where it is headed", *Econ.*, c. 146, sy 1, ss. 23-58, 1998.
- [12] O. E. Williamson, "Transaction cost economics: an introduction", *SSRN Electron. J.*, c. 3, ss. 1-32, 2007, doi: 10.2139/ssrn.1691869.
- [13] O. E. Williamson, "Outsourcing: transaction cost economics and supply chain management", *J. Supply Chain Manag.*, c. 44, sy 2, ss. 5-16, Nis. 2008, doi: 10.1111/j.1745-493X.2008.00051.x.
- [14] O. E. Williamson, "Chapter 3 transaction cost economics", içinde *Handbook of Industrial Organization*, c. 1, Elsevier, 1989, ss. 135-182. doi: 10.1016/S1573-448X(89)01006-X.

- [15] O. E. Williamson, "Technology and transaction cost economics : a reply", *J. Econ. Behav. Organ.*, c. 10, ss. 355-363, 1988.
- [16] P. J. Kaufmann ve L. W. Stern, "Relational exchange norms, perceptions of unfairness, and retained hostility in commercial litigation", *J. Confl. Resolut.*, c. 32, sy 3, ss. 534-552, 1988.
- [17] J. B. Heide, "Interorganizational governance in marketing channels", *J. Mark.*, c. 58, sy 1, ss. 71-85, Oca. 1994, doi: 10.1177/002224299405800106.
- [18] T. W. Malone, J. Yates, ve R. I. Benjamin, "Electronic markets and electronic hierarchies", *Commun. ACM*, c. 30, sy 6, ss. 484-497, Haz. 1987, doi: 10.1145/214762.214766.
- [19] G. R. Salancik, "Wanted: a good network theory of organization", *Adm. Sci. Q.*, c. 40, sy 2, ss. 345-349, 1995.
- [20] P. Bourdieu ve J. S. Coleman, Ed., *Social theory for a changing society*, 1. [print.]. Boulder, Colo.: Westview Press [u.a.], 1991.
- [21] J. M. Podolny ve K. L. Page, "Network forms of organization", *Annu. Rev. Sociol.*, c. 24, ss. 57-76, 1998.
- [22] O. E. Williamson, "Markets and hierarchies: some elementary considerations", *Am. Econ. Rev.*, c. 63, sy 2, ss. 316-325, 1973.
- [23] W. W. Powell, "Neither market nor hierarchy : network forms of organization", *Res. Organ. Behav.*, c. 12, ss. 295-336, 1990.
- [24] J. Y. Bakos, "Information links and electronic marketplaces: the role of interorganizational information systems in vertical markets", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 8, sy 2, ss. 31-52, 1991.
- [25] K. Kumar ve H. G. Van Dissel, "Sustainable collaboration: managing conflict and cooperation in interorganizational systems", *MIS Q.*, c. 20, sy 3, ss. 279-300, Eyl. 1996, doi: 10.2307/249657.
- [26] L. Chi ve C. W. Holsapple, "Understanding computer-mediated interorganizational collaboration: a model and framework", *J. Knowl. Manag.*, c. 9, sy 1, ss. 53-75, Şub. 2005, doi: 10.1108/13673270510582965.
- [27] A. Gunasekaran ve E. W. T. Ngai, "Information systems in supply chain integration and management", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 159, sy 2, ss. 269-295, Ara. 2004, doi: 10.1016/j.ejor.2003.08.016.
- [28] J. I. Cash ve B. R. Konsynski, "IS redraws competitive boundaries", *Harv. Bus. Rev.*, 1985.
- [29] R. Suomi, "Removing transaction costs with interorganizational information systems", *Inf. Softw. Technol.*, c. 33, sy 3, ss. 205-211, Nis. 1991, doi: 10.1016/0950-5849(91)90135-X.
- [30] R. Suomi, "On the concept of inter-organizational information systems", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 1, sy 2, ss. 93-100, Mar. 1992, doi: 10.1016/0963-8687(92)90006-I.
- [31] R. Yunitarini ve P. B. Santoso, "A literature review of electronic data interchange as electronic business communication for manufacturing", *Manag. Prod. Eng. Rev.*, c. 9, sy 4, 2018.
- [32] J. Meier, "The importance of relationship management in establishing successful interorganizational systems", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 4, sy 2, ss. 135-148, Haz. 1995, doi: 10.1016/0963-8687(95)80021-H.
- [33] D. Robey, G. Im, Clark Atlanta University, J. Wareham, ve Esade, "Theoretical foundations of empirical research on interorganizational systems: assessing past contributions and guiding future directions", *J. Assoc. Inf. Syst.*, c. 9, sy 9, ss. 497-518, Eyl. 2008, doi: 10.17705/1jais.00171.
- [34] I. Sila, "The state of empirical research on the adoption and diffusion of business-to-business e-commerce", *Int. J. Electron. Bus.*, c. 12, sy 3, ss. 258-301, 2015, doi: 10.1504/IJEB.2015.071386.
- [35] S. Wang, S. Zheng, L. Xu, D. Li, ve H. Meng, "A literature review of electronic marketplace research: Themes, theories and an integrative framework", *Inf. Syst. Front.*, c. 10, sy 5, ss. 555-571, Kas. 2008, doi: 10.1007/s10796-008-9115-2.
- [36] S. Barrett ve B. Konsynski, "Inter-organization information sharing systems", *MIS Q.*, c. 6, ss. 93-105, Ara. 1982, doi: 10.2307/248993.
- [37] M. L. Ponisio, K. Sikkil, L. Riemens, ve P. Van Eck, "Combining visualisation techniques to understand co-operation in inter-organisational systems", *J. Syst. Inf. Technol.*, c. 10, sy 2, ss. 159-179, Ağu. 2008, doi: 10.1108/13287260810897774.
- [38] B. Bazijanec, C. Winnewisser, A. Albani, ve K. Turowski, "A component-based architecture for protocol vector conversion in inter-organizational systems", içinde *On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: OTM 2004 Workshops*, c. 3292, R. Meersman, Z. Tari, ve A. Corsaro, Ed., içinde *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3292. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, ss. 556-567. doi: 10.1007/978-3-540-30470-8_68.
- [39] Ikujiro Nonaka, "A dynamic theory of organizational knowledge creation", *Organ. Sci.*, c. 5, sy 1, ss. 14-37, 1994.

- [40] H. Takeuchi ve I. Nonaka, “Classic work: theory of organizational knowledge creation”, içinde *The Knowledge Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, New York: Oxford University Press, 1995.
- [41] Kenneth Laudon ve William H. Starbuck, “Organizational information and knowledge”, *Int. Encycl. Bus. Manag.*, c. 4, ss. 3923-3933, 1996.
- [42] K. M. Wiig, “Knowledge management: where did it come from and where will it go?”, *Expert Syst. Appl.*, c. 13, sy 1, ss. 1-14, Tem. 1997, doi: 10.1016/S0957-4174(97)00018-3.
- [43] M. Howard ve M. Holweg, “Investigating the intangible: lessons learnt from research into automotive inter-organisational IT systems”, *Int. J. Automot. Technol. Manag.*, c. 4, sy 4, ss. 354-373, 2004, doi: 10.1504/IJATM.2004.006288.
- [44] D. Stenmark, “The Relationship between Information and knowledge”, *Proc. IRIS*, c. 24, ss. 11-14, 2001.
- [45] M. Alavi ve D. E. Leidner, “Review: knowledge management and knowledge management systems: conceptual foundations and research issues”, *MIS Q.*, c. 25, sy 1, s. 107, Mar. 2001, doi: 10.2307/3250961.
- [46] R. Fremdling, “European railways 1825-2001, an overview”, *Jahrb. Für Wirtsch. Hist. Yearb.*, c. 44, sy 1, ss. 209-221, 2003.
- [47] J. M. Eyles, “William Smith, Richard Trevithick and Samuel Homfray: their correspondence on steam engines, 1804–1806”, *Trans. Newcom. Soc.*, c. 43, sy 1, ss. 137-161, Oca. 1970, doi: 10.1179/tns.1970.011.
- [48] M. C. Duffy, “George Stephenson and the introduction of rolled railway rail”, *J. Mech. Work. Technol.*, c. 5, sy 3-4, ss. 309-342, Ara. 1981, doi: 10.1016/0378-3804(81)90046-2.
- [49] P. Deane, *The First Industrial Revolution*, Second Edition. İngiltere: Cambridge University Press, 1979.
- [50] D. B. Wardle, “Sources for the history of railways at the public record office”, *J. Transp. Hist.*, c. fs-2, sy 4, ss. 214-234, Kas. 1956, doi: 10.1177/002252665600200403.
- [51] S. Tamçelik, “Osmanlı dönemi demiryollarının tarihî gelişimi içerisinde siyasî ve iktisadî sosyal etkileri”, *Erdem*, c. 12, sy 35, ss. 483-535, 2000.
- [52] TCDD, *Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları : Demiryolları Tarihçesi*, 2024. Erişim: 30 Temmuz 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/demiryolları>
- [53] P. O’Brien, Ed., *Railways and the economic development of Western Europe, 1830–1914*. London: Palgrave Macmillan UK, 1983. doi: 10.1007/978-1-349-06324-6.
- [54] F. H. Mossman ve N. Morton, *logistics of distribution systems*. Boston: Allyn and Bacon Inc., 1965.
- [55] M. L. Fair, “Railroad mergers and the public interest”, *Transp. J.*, c. 6, sy 2, ss. 5-15, 1966.
- [56] P. M. C. Swatman ve P. A. Swatman, “EDI system integration: A definition and literature survey”, *Inf. Soc.*, c. 8, sy 3, ss. 169-205, Oca. 1992, doi: 10.1080/01972243.1992.9960119.
- [57] C. Farrell ve J. H. Song, “Dynamic integration of strategic management and information technology”, *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 87, sy 7/8, ss. 15-19, Tem. 1987, doi: 10.1108/eb057484.
- [58] S. C. Srivastava, S. S. Mathur, ve T. S. Teo, “Competing technology options and stakeholder interests for tracking freight railcars in Indian railways”, *J. Inf. Technol.*, c. 24, sy 4, ss. 392-400, Ara. 2009, doi: 10.1057/jit.2009.9.
- [59] M. S. Sodhi, “Supply-chain challenges for B2B eCommerce with examples from the chemical industry”, içinde *Business To Business Electronic Commerce: Challenges & Solutions*, United Kingdom: Idea Group Publishing, 2002, ss. 1-293.
- [60] K. Ramamurthy, G. Premkumar, ve M. R. Crum, “Organizational and interorganizational determinants of EDI diffusion and organizational performance: a causal model”, *J. Organ. Comput. Electron. Commer.*, c. 9, sy 4, ss. 253-285, Ara. 1999, doi: 10.1207/S153277440904_2.
- [61] I. K. W. Lai, “The information processing infrastructure for internet based collaboration”, *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, c. 4, sy 6, ss. 634-649, 2008, doi: 10.1504/IJLSM.2008.019183.
- [62] Y. Sun, C. Zhang, K. Dong, ve M. Lang, “Multiagent modelling and simulation of a physical internet enabled rail-road intermodal transport system”, *Urban Rail Transit*, c. 4, sy 3, ss. 141-154, Eyl. 2018, doi: 10.1007/s40864-018-0086-4.
- [63] C. A. Soosay, P. W. Hyland, ve M. Ferrer, “Supply chain collaboration: capabilities for continuous innovation”, *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 13, sy 2, ss. 160-169, Mar. 2008, doi: 10.1108/13598540810860994.
- [64] V. Milch ve K. Laumann, “Interorganizational complexity and organizational accident risk: A literature review”, *Saf. Sci.*, c. 82, ss. 9-17, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2015.08.010.

- [65] C. Loebbecke ve P. Powell, “Competitive advantage from IT in logistics: The integrated transport tracking system”, *Int. J. Inf. Manag.*, c. 18, sy 1, ss. 17-27, Şub. 1998, doi: 10.1016/S0268-4012(97)00037-6.
- [66] D. Mircetic, M. Maslaric, ve S. Nikolicic, “Reengineering of terminal processes in inland container terminal”, program adı: Proceedings of the 18th International Symposium on Logistics, Vienna / Austria, 10 / 07 2013.
- [67] S. A. Sholihah, T. M. A. A. Samadhi, A. Cakravastia, ve S. Nur Bahagia, “Coordination model in Hinterland chain of hub-and-spoke global logistics”, *J. Ind. Eng. Manag.*, c. 11, sy 4, s. 776, Kas. 2018, doi: 10.3926/jiem.2538.
- [68] M. Wasesa, A. Stam, ve E. Van Heck, “Investigating agent-based inter-organizational systems and business network performance: Lessons learned from the logistics sector”, *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 30, sy 2, ss. 226-243, Mar. 2017, doi: 10.1108/JEIM-07-2015-0069.
- [69] A. Kaushik ve M. Kumar, “Problems in planning for inter-organisational systems”, *Int. J. Bus. Syst. Res.*, c. 5, sy 2, s. 172, 2011, doi: 10.1504/IJBSR.2011.038801.
- [70] S. Sutton, C. Hampton, D. Khazanchi, ve V. Arnold, “Risk analysis in extended enterprise environments: identification of critical risk factors in B2B e-commerce relationships”, *J. Assoc. Inf. Syst.*, c. 9, sy 4, ss. 151-174, Nis. 2008, doi: 10.17705/1jais.00155.
- [71] M. Nandy, “Organizational factors influencing inclination to use a B2B website by a buyer-supplier dyad: The Indian context”, *Asia Pac. J. Inf. Syst.*, c. 29, sy 3, ss. 328-358, Eyl. 2019, doi: 10.14329/apjis.2019.29.3.328.
- [72] A. Sharma ve A. Khandekar, “Managing change and culture in Indian organizations: a strategic HR perspective”, içinde *The Promise of E-Governance*, New Delhi: Tata McGraw-Hill., 2004, ss. 305-313.
- [73] K. Kärcher ve H. Williams, “Industrial change in the outgoing tour operator business in Britain and Germany: The emergence of electronic market systems”, *Emerg. Electron. Mark. Econ. Soc. Tech. Policy Manag. Issues*, c. 26, ss. 26-45, 1996.
- [74] T. Phuaphanthong, T. Bui, ve S. Keretho, “Harnessing interagency collaboration in inter-organizational systems development: lessons learned from an e-government project for trade and transport facilitation”, *Int. J. Electron. Gov. Res.*, c. 6, sy 3, ss. 42-56, Tem. 2010, doi: 10.4018/jegr.2010070104.
- [75] H. C. Dekker, “Control of inter-organizational relationships: evidence on appropriation concerns and coordination requirements”, *Account. Organ. Soc.*, c. 29, sy 1, ss. 27-49, Oca. 2004, doi: 10.1016/S0361-3682(02)00056-9.
- [76] A. M. Croteau, F. Bergeron, ve J. Dubsky, “Contractual and consensual profiles for an interorganizational governance of information technology”, *Int. Bus. Res.*, c. 6, sy 9, ss. 30-43, Ağu. 2013, doi: 10.5539/ibr.v6n9p30.
- [77] A. L. Oliver ve M. Ebers, “Networking network studies: an analysis of conceptual configurations in the study of inter-organizational relationships”, *Organ. Stud.*, c. 19, sy 4, ss. 549-583, Tem. 1998, doi: 10.1177/017084069801900402.
- [78] S. Wasserman ve K. Faust, *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, 1994.
- [79] L. C. Freeman, *The development of social network analysis: a study in the sociology of science*. Vancouver, BC : North Charleston, S.C: Empirical Press ; BookSurge, 2004.
- [80] J. Scott, *What is social network analysis?* London: Bloomsbury Academic, 2012.
- [81] M. B. McCaskey, *The executive challenge: managing change and ambiguity*. Pitman Books Inc., 1982.
- [82] O. Serrat, “Social network analysis”, içinde *Knowledge Solutions*, Singapore: Springer Singapore, 2017, ss. 39-43. doi: 10.1007/978-981-10-0983-9_9.
- [83] C. L. Streeter ve D. F. Gillespie, “Social network analysis”, *J. Soc. Serv. Res.*, c. 16, sy 1-2, ss. 201-222, Eyl. 1992, doi: 10.1300/J079v16n01_10.
- [84] D. J. Brass, “A social network perspective on human resources management”, içinde *Networks in the Knowledge Economy*, New York: Oxford University Press, 2003, ss. 283-323.
- [85] S. P. Borgatti ve B. Ofem, “Social network theory and analysis”, içinde *Social Network Theory and Educational Change*, Cambridge: Harvard Education Press, 2010, ss. 17-29.
- [86] O. Lizardo ve M. F. Pirkey, “How organizational theory can help network theorizing: linking structure and dynamics via cross-level analogies”, içinde *Research in the Sociology of Organizations*, c. 40, D. J. Brass, G. (Joe) Labianca, A. Mehra, D. S. Halgin, ve S. P. Borgatti, Ed., Emerald Group Publishing Limited, 2014, ss. 33-56. doi: 10.1108/S0733-558X(2014)0000040002.
- [87] S. P. Borgatti, D. J. Brass, ve D. S. Halgin, “Social network research: confusions, criticisms, and controversies”, içinde *Research in the Sociology of Organizations*, c. 40, D. J. Brass, G. (Joe) Labianca,

- A. Mehra, D. S. Halgin, ve S. P. Borgatti, Ed., Emerald Group Publishing Limited, 2014, ss. 1-29. doi: 10.1108/S0733-558X(2014)0000040001.
- [88] R. E. Nelson, “The strength of strong ties: social networks and intergroup conflict in organizations”, *Acad. Manage. J.*, c. 32, sy 2, ss. 377-401, Haz. 1989, doi: 10.2307/256367.
- [89] M. S. Granovetter, “The strength of weak ties”, *Am. J. Sociol.*, c. 78, sy 6, ss. 1360-1380, 1973.
- [90] S. P. Borgatti ve D. S. Halgin, “On network theory”, *Organ. Sci.*, c. 22, sy 5, ss. 1168-1181, 2011.
- [91] D. Tranfield, D. Denyer, ve P. Smart, “Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review”, *Br. J. Manag.*, c. 14, sy 3, ss. 207-222, Eyl. 2003, doi: 10.1111/1467-8551.00375.
- [92] D. Denyer ve D. Tranfield, “Producing a systematic review”, içinde *The Sage Handbook of Organizational Research Methods*, 2009.
- [93] M. Daudi, J. B. Hauge, ve K.-D. Thoben, “Behavioral factors influencing partner trust in logistics collaboration: a review”, *Logist. Res.*, c. 9, sy 1, s. 19, Ara. 2016, doi: 10.1007/s12159-016-0146-7.
- [94] J. Denicol, A. Davies, ve I. Krystallis, “What are the causes and cures of poor megaproject performance? A systematic literature review and research agenda”, *Proj. Manag. J.*, c. 51, sy 3, ss. 328-345, Haz. 2020, doi: 10.1177/8756972819896113.
- [95] M. Franco, J. Guimarães, ve M. Rodrigues, “Organisational agility: systematic literature review and future research agenda”, *Knowl. Manag. Res. Pract.*, ss. 1-18, Tem. 2022, doi: 10.1080/14778238.2022.2103048.
- [96] C. G. Kochan ve D. R. Nowicki, “Supply chain resilience: a systematic literature review and typological framework”, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, c. 48, sy 8, ss. 842-865, Eyl. 2018, doi: 10.1108/IJPDLM-02-2017-0099.
- [97] Mohammad Daneshvar Kakhki ve Vidyaranya B. Gargeya, “Information systems for supply chain management: a systematic literature analysis”, *s, International Journal of Production Research*, c. 57, sy 15-16, ss. 5318-5339, 2019, doi: 10.1080/00207543.2019.1570376.
- [98] M. D. R. Pérez-Salazar, A. A. Aguilar-Lasserre, M. G. Cedillo-Campos, U. Juárez-Martínez, ve R. Posada-Gómez, “Processes and measurement of knowledge management in supply chains: an integrative systematic literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 57, sy 7, ss. 2136-2159, Nis. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1521530.
- [99] P. Suriyantphupha ve M. Bourlakis, “Information technology in a traditional retail supply chain: a structured literature review”, *Proj. Proyéctica Proj.*, c. n°22, sy 1, ss. 89-102, Haz. 2019, doi: 10.3917/proj.022.0089.
- [100] C. Y. Wong, C. W. Wong, ve S. Boon-itt, “Integrating environmental management into supply chains: A systematic literature review and theoretical framework”, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, c. 45, sy 1/2, ss. 43-68, Mar. 2015, doi: 10.1108/IJPDLM-05-2013-0110.
- [101] X.-H. Lu, L.-H. Huang, ve M. S. H. Heng, “Critical success factors of inter-organizational information systems—A case study of Cisco and Xiao Tong in China”, *Inf. Manage.*, c. 43, sy 3, ss. 395-408, Nis. 2006, doi: 10.1016/j.im.2005.06.007.
- [102] J. Liu, S. Zhang, ve J. Hu, “A case study of an inter-enterprise workflow-supported supply chain management system”, *Inf. Manage.*, c. 42, sy 3, ss. 441-454, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.im.2004.01.010.
- [103] M.-C. Chen, T. Yang, ve H.-C. Li, “Evaluating the supply chain performance of IT-based inter-enterprise collaboration”, *Inf. Manage.*, c. 44, sy 6, ss. 524-534, Eyl. 2007, doi: 10.1016/j.im.2007.02.005.
- [104] L. R. Vijayarathy, “An investigation of moderators of the link between technology use in the supply chain and supply chain performance”, *Inf. Manage.*, c. 47, sy 7-8, ss. 364-371, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.im.2010.08.004.
- [105] I. B. Hong, “A new framework for interorganizational systems based on the linkage of participants’ roles”, *Inf. Manage.*, c. 39, sy 4, ss. 261-270, Oca. 2002, doi: 10.1016/S0378-7206(01)00095-7.
- [106] E. T. G. Wang, F. K. Y. Chou, N. C. A. Lee, ve S. Z. Lai, “Can intrafirm IT skills benefit interfirm integration and performance?”, *Inf. Manage.*, c. 51, sy 7, ss. 924-938, Kas. 2014, doi: 10.1016/j.im.2014.05.003.
- [107] O. Volkoff, Y. E. Chan, ve E. F. Peter Newson, “Leading the development and implementation of collaborative interorganizational systems”, *Inf. Manage.*, c. 35, sy 2, ss. 63-75, Şub. 1999, doi: 10.1016/S0378-7206(98)00087-1.
- [108] K. S. Soliman ve B. D. Janz, “An exploratory study to identify the critical factors affecting the decision to establish Internet-based interorganizational information systems”, *Inf. Manage.*, c. 41, sy 6, ss. 697-706, Tem. 2004, doi: 10.1016/j.im.2003.06.001.

- [109] H.-F. Lin, "Interorganizational and organizational determinants of planning effectiveness for Internet-based interorganizational systems", *Inf. Manage.*, c. 43, sy 4, ss. 423-433, Haz. 2006, doi: 10.1016/j.im.2005.10.004.
- [110] A. Pouloudi, "Information technology for collaborative advantage in healthcare revisited", *Inf. Manage.*, c. 35, sy 6, ss. 345-356, Haz. 1999, doi: 10.1016/S0378-7206(98)00099-8.
- [111] C. W. Crook ve R. L. Kumar, "Electronic data interchange: a multi-industry investigation using grounded theory", *Inf. Manage.*, c. 34, sy 2, ss. 75-89, Eyl. 1998, doi: 10.1016/S0378-7206(98)00040-8.
- [112] F. Bergeron ve L. Raymond, "Managing EDI for corporate advantage: A longitudinal study", *Inf. Manage.*, c. 31, sy 6, ss. 319-333, Oca. 1997, doi: 10.1016/S0378-7206(97)00007-4.
- [113] Y. Xu, W. F. Boh, ve C. Soh, "Vertical IS standards deployment and integration: A study of antecedents and benefits", *Inf. Manage.*, c. 51, sy 2, ss. 206-216, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.im.2013.11.009.
- [114] K. K. Kim ve N. S. Umanath, "Information transfer in B2B procurement: an empirical analysis and measurement", *Inf. Manage.*, c. 42, sy 6, ss. 813-828, Eyl. 2005, doi: 10.1016/j.im.2004.08.004.
- [115] R. Angeles ve R. Nath, "An empirical study of EDI trading partner selection criteria in customer-supplier relationships", *Inf. Manage.*, c. 37, sy 5, ss. 241-255, Ağu. 2000, doi: 10.1016/S0378-7206(99)00054-3.
- [116] M. Nakayama ve N. G. Sutcliffe, "Exploratory analysis on the halo effect of strategic goals on IOS effectiveness evaluation", *Inf. Manage.*, c. 42, sy 2, ss. 275-288, Oca. 2005, doi: 10.1016/j.im.2003.12.002.
- [117] W. Hong ve K. Zhu, "Migrating to internet-based e-commerce: Factors affecting e-commerce adoption and migration at the firm level", *Inf. Manage.*, c. 43, sy 2, ss. 204-221, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.im.2005.06.003.
- [118] S. Scala ve R. McGrath, "Advantages and disadvantages of electronic data interchange an industry perspective", *Inf. Manage.*, c. 25, sy 2, ss. 85-91, Ağu. 1993, doi: 10.1016/0378-7206(93)90050-4.
- [119] M. A. Smith ve R. L. Kumar, "A theory of application service provider (ASP) use from a client perspective", *Inf. Manage.*, c. 41, sy 8, ss. 977-1002, Kas. 2004, doi: 10.1016/j.im.2003.08.019.
- [120] I. Chengalur-Smith, P. Duchessi, ve J. R. Gil-Garcia, "Information sharing and business systems leveraging in supply chains: An empirical investigation of one web-based application", *Inf. Manage.*, c. 49, sy 1, ss. 58-67, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.im.2011.12.001.
- [121] S.-V. Rehm ve L. Goel, "Using information systems to achieve complementarity in SME innovation networks", *Inf. Manage.*, c. 54, sy 4, ss. 438-451, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.im.2016.10.003.
- [122] W. J. Kettinger, "National infrastructure diffusion and the U.S. information super highway", *Inf. Manage.*, c. 27, sy 6, ss. 357-368, Ara. 1994, doi: 10.1016/0378-7206(94)90016-7.
- [123] R. Suomi, "Inter-organizational information systems as company resources", *Inf. Manage.*, c. 15, ss. 105-112, 1988.
- [124] S. S. Barrett, "An IS* case: The closed loop scenario", *Inf. Manage.*, c. 8, sy 5, ss. 263-269, May. 1985, doi: 10.1016/0378-7206(85)90004-7.
- [125] B. Huo, C. Zhang, ve X. Zhao, "The effect of IT and relationship commitment on supply chain coordination: A contingency and configuration approach", *Inf. Manage.*, c. 52, sy 6, ss. 728-740, Eyl. 2015, doi: 10.1016/j.im.2015.06.007.
- [126] C. Zhang, L. Xue, ve J. Dhaliwal, "Alignments between the depth and breadth of inter-organizational systems deployment and their impact on firm performance", *Inf. Manage.*, c. 53, sy 1, ss. 79-90, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.im.2015.08.004.
- [127] Y. Shi, T. Cui, ve S. Kurnia, "Value co-creation for digital innovation: An interorganizational boundary-spanning perspective", *Inf. Manage.*, c. 60, sy 5, s. 103817, Tem. 2023, doi: 10.1016/j.im.2023.103817.
- [128] M. Bensaou, "Interorganizational cooperation: the role of information technology an empirical comparison of U.S. and Japanese supplier relations", *Inf. Syst. Res.*, c. 8, sy 2, ss. 107-124, Haz. 1997, doi: 10.1287/isre.8.2.107.
- [129] D. Chatterjee ve T. Ravichandran, "Governance of interorganizational information systems: a resource dependence perspective", *Inf. Syst. Res.*, c. 24, sy 2, ss. 261-278, Haz. 2013, doi: 10.1287/isre.1120.0432.
- [130] A. Malhotra, S. Gosain, ve O. A. El Sawy, "Leveraging standard electronic business interfaces to enable adaptive supply chain partnerships", *Inf. Syst. Res.*, c. 18, sy 3, ss. 260-279, Eyl. 2007, doi: 10.1287/isre.1070.0132.

- [131] N. Saraf, C. S. Langdon, ve S. Gosain, "IS application capabilities and relational value in interfirm partnerships", *Inf. Syst. Res.*, c. 18, sy 3, ss. 320-339, Eyl. 2007, doi: 10.1287/isre.1070.0133.
- [132] V. Choudhury, "Strategic choices in the development of interorganizational information systems", *Inf. Syst. Res.*, c. 8, sy 1, ss. 1-24, Mar. 1997, doi: 10.1287/isre.8.1.1.
- [133] A. Rai ve X. Tang, "Leveraging IT capabilities and competitive process capabilities for the management of interorganizational relationship portfolios", *Inf. Syst. Res.*, c. 21, sy 3, ss. 516-542, Eyl. 2010, doi: 10.1287/isre.1100.0299.
- [134] M. C. Dong, Y. Fang, ve D. W. Straub, "The Impact of institutional distance on the joint performance of collaborating firms: the role of adaptive interorganizational systems", *Inf. Syst. Res.*, c. 28, sy 2, ss. 309-331, Haz. 2017, doi: 10.1287/isre.2016.0675.
- [135] P. Chwelos, I. Benbasat, ve A. S. Dexter, "Research report: empirical test of an EDI adoption model", *Inf. Syst. Res.*, c. 12, sy 3, ss. 304-321, 2001.
- [136] B. H. Reich ve I. Benbasat, "An empirical investigation of factors influencing the success of customer-oriented strategic systems", *Inf. Syst. Res.*, c. 1, sy 3, ss. 325-347, Eyl. 1990, doi: 10.1287/isre.1.3.325.
- [137] H. Bala ve V. Venkatesh, "Assimilation of interorganizational business process standards", *Inf. Syst. Res.*, c. 18, sy 3, ss. 340-362, Eyl. 2007, doi: 10.1287/isre.1070.0134.
- [138] H. G. Lee, T. Clark, ve K. Y. Tam, "Research report. can EDI benefit adopters?", *Inf. Syst. Res.*, c. 10, sy 2, ss. 186-195, Haz. 1999, doi: 10.1287/isre.10.2.186.
- [139] G. Im ve A. Rai, "IT-enabled coordination for ambidextrous interorganizational relationships", *Inf. Syst. Res.*, c. 25, sy 1, ss. 72-92, Mar. 2014, doi: 10.1287/isre.2013.0496.
- [140] S. Raghunathan ve A. B. Yeh, "Beyond EDI: impact of continuous replenishment program (CRP) between a manufacturer and its retailers", *Inf. Syst. Res.*, c. 12, sy 4, ss. 406-419, 2001.
- [141] R. D. Banker, J. Kalvenes, ve R. A. Patterson, "Research note: information technology, contract completeness, and buyer-supplier relationships", *Inf. Syst. Res.*, c. 17, sy 2, ss. 180-193, 2006.
- [142] A. L. M. Cavaye ve P. B. Cragg, "Factors contributing to the success of customer oriented interorganizational systems", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 4, sy 1, ss. 13-30, 1995.
- [143] A. Boonstra ve J. De Vries, "Managing stakeholders around inter-organizational systems: A diagnostic approach", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 17, sy 3, ss. 190-201, Eyl. 2008, doi: 10.1016/j.jsis.2008.04.001.
- [144] S. Kurnia ve R. B. Johnston, "The need for a processual view of inter-organizational systems adoption", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 9, sy 4, ss. 295-319, Ara. 2000, doi: 10.1016/S0963-8687(00)00050-0.
- [145] C. M. Messerschmidt ve O. Hinz, "Explaining the adoption of grid computing: An integrated institutional theory and organizational capability approach", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 22, sy 2, ss. 137-156, Haz. 2013, doi: 10.1016/j.jsis.2012.10.005.
- [146] C. Glezer, "A conceptual model of an interorganizational intelligent meeting-scheduler (IIMS)", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 12, sy 1, ss. 47-70, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0963-8687(02)00034-3.
- [147] E. Christiaanse, T. Van Diepen, ve J. Damsgaard, "Proprietary versus internet technologies and the adoption and impact of electronic marketplaces", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 13, sy 2, ss. 151-165, Tem. 2004, doi: 10.1016/j.jsis.2004.02.004.
- [148] D. R. Mackay, "The impact of EDI on the components sector of the Australian automotive industry", *J. Strateg. Inf. Syst.*, sy 3, 1993.
- [149] N. C.-A. Lee, E. T. G. Wang, ve V. Grover, "IOS drivers of manufacturer-supplier flexibility and manufacturer agility", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 29, sy 1, s. 101594, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jsis.2020.101594.
- [150] B. S. Neo, "The implementation of an electronic market for pig trading in Singapore", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 1, sy 5, ss. 278-288, Ara. 1992, doi: 10.1016/0963-8687(92)90017-Q.
- [151] J. Dedrick ve K. L. Kraemer, "Impacts of internal and interorganizational information systems on the outsourcing of manufacturing", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 19, sy 2, ss. 78-95, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.jsis.2010.02.002.
- [152] G. Spinardi, I. Graham, ve R. Williams, "EDI in the Scottish Health Service: inter-organisational systems and inter-organisational change", *J. Strateg. Inf. Syst.*, c. 6, sy 3, ss. 251-263, Kas. 1997, doi: 10.1016/S0963-8687(97)00012-7.
- [153] R. Toppen, M. Smits, ve P. Ribbers, "Financial securities transactions: a study of logistic process performance improvements", *J. Strateg. Inf. Syst.*, 1998.

- [154] K. Zhu, K. Kraemer, ve S. Xu, "Electronic business adoption by European firms: a cross-country assessment of the facilitators and inhibitors", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 12, sy 4, ss. 251-268, Ara. 2003, doi: 10.1057/palgrave.ejis.3000475.
- [155] B. E. Munkvold, "Challenges of IT implementation for supporting collaboration in distributed organizations", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 8, sy 4, ss. 260-272, Ara. 1999, doi: 10.1057/palgrave.ejis.3000340.
- [156] M. Ibrahim ve P. M. Ribbers, "The impacts of competence-trust and openness-trust on interorganizational systems", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 18, sy 3, ss. 223-234, Haz. 2009, doi: 10.1057/ejis.2009.17.
- [157] R. B. Johnston ve S. Gregor, "A theory of industry-level activity for understanding the adoption of interorganizational systems", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 9, sy 4, ss. 243-251, Ara. 2000, doi: 10.1057/palgrave.ejis.3000375.
- [158] R. Sabherwal ve L. Vijayarathy, "An empirical investigation of the antecedents of telecommunication-based interorganizational systems", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 3, sy 4, ss. 268-284, Eki. 1994, doi: 10.1057/ejis.1994.32.
- [159] B. Rukanova, E. Van Stijn, H. Z. Henriksen, Z. Baida, ve Y.-H. Tan, "Understanding the influence of multiple levels of governments on the development of inter-organizational systems", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 18, sy 5, ss. 387-408, Eki. 2009, doi: 10.1057/ejis.2009.28.
- [160] A. Pouloudi ve E. A. Whitley, "Stakeholder identification in inter-organizational systems: gaining insights for drug use management systems", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 6, sy 1, ss. 1-14, Mar. 1997, doi: 10.1057/palgrave.ejis.3000252.
- [161] A. Cavaye, "The implementation of customer oriented inter-organizational systems: an investigation from the sponsor's perspective", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 5, sy 2, ss. 103-109, Haz. 1996, doi: 10.1057/ejis.1996.17.
- [162] D. Power ve R. L. Gruner, "Variable use of standards-based IOS enabling technologies in Australian SMEs: an examination of deliberate and emergent decision making processes", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 26, sy 2, ss. 164-184, Mar. 2017, doi: 10.1057/s41303-017-0034-5.
- [163] I. Sila, "Do organisational and environmental factors moderate the effects of Internet-based interorganisational systems on firm performance?", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 19, sy 5, ss. 581-600, Eki. 2010, doi: 10.1057/ejis.2010.28.
- [164] A. Boonstra, D. Boddy, ve S. Bell, "Stakeholder management in IOS projects: analysis of an attempt to implement an electronic patient file", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 17, sy 2, ss. 100-111, Nis. 2008, doi: 10.1057/ejis.2008.2.
- [165] E. Redondo, E. Daniel, ve J. Ward, "Combining the rational and relational perspectives of electronic trading", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 18, sy 1, ss. 79-97, Şub. 2009, doi: 10.1057/ejis.2008.61.
- [166] C. Fearon ve G. Philip, "Self assessment as a means of measuring strategic and operational benefits from EDI: the development of a conceptual framework", *Eur. J. Inf. Syst.*, c. 7, sy 1, ss. 5-16, Mar. 1998, doi: 10.1057/palgrave.ejis.3000287.
- [167] R. Angeles, "Anticipated IT infrastructure and supply chain integration capabilities for RFID and their associated deployment outcomes", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 29, sy 3, ss. 219-231, Haz. 2009, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2008.09.001.
- [168] I.-L. Wu ve M.-L. Chiu, "Examining supply chain collaboration with determinants and performance impact: Social capital, justice, and technology use perspectives", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 39, ss. 5-19, Nis. 2018, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.11.004.
- [169] E. Hartono, X. Li, K.-S. Na, ve J. T. Simpson, "The role of the quality of shared information in interorganizational systems use", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 30, sy 5, ss. 399-407, Eki. 2010, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2010.02.007.
- [170] C. Ranganathan, T. S. H. Teo, ve J. Dhaliwal, "Web-enabled supply chain management: Key antecedents and performance impacts", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 31, sy 6, ss. 533-545, Ara. 2011, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2011.02.004.
- [171] D. Asamoah, B. Agyei-Owusu, F. K. Andoh-Baidoo, ve E. Ayaburi, "Inter-organizational systems use and supply chain performance: Mediating role of supply chain management capabilities", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 58, s. 102195, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102195.
- [172] C. Cunningham ve C. Tynan, "Electronic trading, interorganizational systems and the nature of buyer-seller relationships: The need for a network perspective", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 13, sy 1, ss. 3-28, Şub. 1993, doi: 10.1016/0268-4012(93)90044-5.
- [173] A. L. M. Cavaye, "The sponsor-adopter gap differences between promoters and potential users of information systems that link organizations", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 15, sy 2, ss. 85-96, a 1995, doi: 10.1016/0268-4012(95)00007-T.

- [174] A. Boonstra ve J. De Vries, "Analyzing inter-organizational systems from a power and interest perspective", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 25, sy 6, ss. 485-501, Ara. 2005, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2005.08.006.
- [175] D. Lim ve P. C. Palvia, "EDI in strategic supply chain: impact on customer service", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 21, sy 3, ss. 193-211, Haz. 2001, doi: 10.1016/S0268-4012(01)00010-X.
- [176] H. Lee, M. S. Kim, ve K. K. Kim, "Interorganizational information systems visibility and supply chain performance", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 34, sy 2, ss. 285-295, Nis. 2014, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2013.10.003.
- [177] K. Simón-Elorz ve P. S. Inchusta, "Information technology for inter-organisational systems: some evidence with case studies", *Int. J. Inf. Manag.*, c. 19, sy 1, ss. 75-86, Şub. 1999, doi: 10.1016/S0268-4012(98)00048-6.
- [178] F. T. S. Chan, A. Yee-Loong Chong, ve L. Zhou, "An empirical investigation of factors affecting e-collaboration diffusion in SMEs", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 138, sy 2, ss. 329-344, Ağu. 2012, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.04.004.
- [179] Q. Zhang ve M. Cao, "Exploring antecedents of supply chain collaboration: Effects of culture and interorganizational system appropriation", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 195, ss. 146-157, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2017.10.014.
- [180] A. Y.-L. Chong, K.-B. Ooi, ve A. Sohal, "The relationship between supply chain factors and adoption of e-Collaboration tools: An empirical examination", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 122, sy 1, ss. 150-160, Kas. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.05.012.
- [181] D. Prajogo ve J. Olhager, "Supply chain integration and performance: The effects of long-term relationships, information technology and sharing, and logistics integration", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 135, sy 1, ss. 514-522, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.09.001.
- [182] G. Li, H. Yang, L. Sun, ve A. S. Sohal, "The impact of IT implementation on supply chain integration and performance", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 120, sy 1, ss. 125-138, Tem. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.07.017.
- [183] J.-M. Nurmilaakso, "Adoption of e-business functions and migration from EDI-based to XML-based e-business frameworks in supply chain integration", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 113, sy 2, ss. 721-733, Haz. 2008, doi: 10.1016/j.ijpe.2007.11.001.
- [184] A. Gunasekaran, R. E. McGaughey, E. W. T. Ngai, ve B. K. Rai, "E-Procurement adoption in the Southcoast SMEs", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 122, sy 1, ss. 161-175, Kas. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.05.013.
- [185] J. Kauremaa, M. Kärkkäinen, ve T. Ala-Risku, "Customer initiated interorganizational information systems: The operational impacts and obstacles for small and medium sized suppliers", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 119, sy 2, ss. 228-239, Haz. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.02.007.
- [186] Arshinder, A. Kanda, ve S. G. Deshmukh, "Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 115, sy 2, ss. 316-335, Eki. 2008, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.05.011.
- [187] I.-L. Wu, C.-H. Chuang, ve C.-H. Hsu, "Information sharing and collaborative behaviors in enabling supply chain performance: A social exchange perspective", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 148, ss. 122-132, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.09.016.
- [188] R. Cooper ve T. Yoshikawa, "Inter-organizational cost management systems: The case of the Tokyo-Yokohama-Kamakura supplier chain", *Int. J. Prod. Econ.*, c. 37, ss. 51-62, 1994.
- [189] E. T. G. Wang, J. C. F. Tai, ve H.-L. Wei, "A virtual integration theory of improved supply-chain performance", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 23, sy 2, ss. 41-64, Eki. 2006, doi: 10.2753/MIS0742-122230203.
- [190] K. Zhao ve M. Xia, "Forming interoperability through interorganizational systems standards", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 30, sy 4, ss. 269-298, Nis. 2014, doi: 10.2753/MIS0742-1222300410.
- [191] V. Grover ve K. A. Saeed, "The impact of product, market, and relationship characteristics on interorganizational system integration in manufacturer-supplier dyads", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 23, sy 4, ss. 185-216, May. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-122230409.
- [192] A. T. Chatfield ve N. Bjørn-Andersen, "The impact of IOS-enabled business process change on business outcomes: transformation of the value chain of Japan airlines", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 14, sy 1, ss. 13-40, Haz. 1997, doi: 10.1080/07421222.1997.11518152.
- [193] J.-Y. Son, S. Narasimhan, ve F. J. Riggins, "Effects of relational factors and channel climate on EDI Usage in the customer-supplier relationship", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 22, sy 1, ss. 321-353, Nis. 2005, doi: 10.1080/07421222.2003.11045839.

- [194] G. Premkumar, K. Ramamurthy, ve S. Nilakanta, "Implementation of electronic data interchange: an innovation diffusion perspective", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 11, sy 2, ss. 157-186, Eyl. 1994, doi: 10.1080/07421222.1994.11518044.
- [195] J.-Y. Son ve I. Benbasat, "Organizational buyers' adoption and use of B2B electronic marketplaces: efficiency- and legitimacy-oriented perspectives", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 24, sy 1, ss. 55-99, Tem. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240102.
- [196] J. Sutanto, A. Kankanhalli, J. Tay, K. S. Raman, ve B. C. Y. Tan, "Change management in interorganizational systems for the public", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 25, sy 3, ss. 133-176, Ara. 2008, doi: 10.2753/MIS0742-1222250304.
- [197] K. Han, R. J. Kauffman, ve B. R. Nault, "Information exploitation and interorganizational systems ownership", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 21, sy 2, ss. 109-135, Eki. 2004, doi: 10.1080/07421222.2004.11045799.
- [198] C. Steinfield, M. L. Markus, ve R. T. Wigand, "Through a glass clearly: standards, architecture, and process transparency in global supply chains", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 28, sy 2, ss. 75-108, Eki. 2011, doi: 10.2753/MIS0742-1222280204.
- [199] B. Veroy ve V. Zwass, "Embedding a point-to-point network in the expansion of infrastructure for information systems", *J. Manag. Inf. Syst.*, c. 4, sy 3, ss. 50-63, Ara. 1987, doi: 10.1080/07421222.1987.11517800.
- [200] H. R. Johnston ve M. R. Vitale, "Creating competitive advantage with interorganizational information systems", *MIS Q.*, c. 12, sy 2, ss. 153-165, Haz. 1988, doi: 10.2307/248839.
- [201] S. Barrett ve B. Konsynski, "Inter-organization information sharing systems", *MIS Q.*, c. 6, s. 93, Ara. 1982, doi: 10.2307/248993.
- [202] H. R. Johnston ve S. R. Carrico, "Developing capabilities to use information strategically", *MIS Q.*, c. 12, sy 1, s. 37, Mar. 1988, doi: 10.2307/248801.
- [203] Subramani, "How do suppliers benefit from information technology use in supply chain relationships?", *MIS Q.*, c. 28, sy 1, ss. 1-45, 2004, doi: 10.2307/25148624.
- [204] Rai, Patnayakuni, ve Seth, "Firm performance impacts of digitally enabled supply chain integration capabilities", *MIS Q.*, c. 30, sy 2, ss. 225-246, 2006, doi: 10.2307/25148729.
- [205] Zhu, Kraemer, Gurbaxani, ve Xu, "Migration to open-standard interorganizational systems: network effects, switching costs, and path dependency", *MIS Q.*, c. 30, ss. 515-539, b 2006, doi: 10.2307/25148771.
- [206] Klein ve Rai, "Interfirm strategic information flows in logistics supply chain relationships", *MIS Q.*, c. 33, sy 4, ss. 735-762, 2009, doi: 10.2307/20650325.
- [207] C. L. Iacovou, I. Benbasat, ve A. S. Dexter, "Electronic data interchange and small organizations: adoption and impact of technology", *MIS Q.*, c. 19, sy 4, ss. 465-485, Ara. 1995, doi: 10.2307/249629.
- [208] Teo, Wei, ve Benbasat, "Predicting intention to adopt interorganizational linkages: an institutional perspective", *MIS Q.*, c. 27, sy 1, ss. 19-49, 2003, doi: 10.2307/30036518.
- [209] B. R. Nault ve A. S. Dexter, "Added value and pricing with information technology", *MIS Q.*, c. 19, sy 4, ss. 449-464, Ara. 1995, doi: 10.2307/249628.
- [210] A. Yee-Loong Chong ve K. Ooi, "Adoption of interorganizational system standards in supply chains: An empirical analysis of RosettaNet standards", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 108, sy 4, ss. 529-547, Nis. 2008, doi: 10.1108/02635570810868371.
- [211] X. Pu, F. T. S. Chan, Z. Tsigas, ve B. Niu, "Adoption of internet-enabled supply chain management systems: Differences between buyer and supplier perspectives", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 118, sy 8, ss. 1695-1710, Eyl. 2018, doi: 10.1108/IMDS-10-2017-0496.
- [212] V. Hinkka, K. Främling, ve J. Tätilä, "Supply chain tracking: aligning buyer and supplier incentives", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 113, sy 8, ss. 1133-1148, Ağu. 2013, doi: 10.1108/IMDS-12-2012-0439.
- [213] S. C. L. Koh, M. Demirbag, E. Bayraktar, E. Tatoglu, ve S. Zaim, "The impact of supply chain management practices on performance of SMEs", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 107, sy 1, ss. 103-124, Oca. 2007, doi: 10.1108/02635570710719089.
- [214] A. Gupta, "A stakeholder analysis approach for interorganizational systems", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 95, sy 6, ss. 3-7, Ağu. 1995, doi: 10.1108/02635579510091269.
- [215] C. Feng, N. Xi, G. Zhuang, ve J. Hamari, "The role of interactive practice in business performance", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 120, sy 8, ss. 1521-1542, Tem. 2020, doi: 10.1108/IMDS-01-2020-0042.
- [216] W. G. Qu ve Z. Wang, "Impact of experience on open inter-organizational systems adoption", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 111, sy 3, ss. 432-447, Mar. 2011, doi: 10.1108/02635571111118297.

- [217] G. Rampersad, I. Troshani, ve C. Plewa, "IOS adoption in innovation networks: a case study", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 112, sy 9, ss. 1366-1382, Eyl. 2012, doi: 10.1108/02635571211278974.
- [218] Y. Pan, T. Nam, S. Ogara, ve S. Lee, "Adoption model of mobile-enabled systems in supply chain", *Ind. Manag. Data Syst.*, c. 113, sy 2, ss. 171-189, Mar. 2013, doi: 10.1108/02635571311303523.
- [219] C. W. Steinfield, M. L. Markus, ve R. T. Wigand, "Exploring interorganizational systems at the industry level of analysis: evidence from the US home mortgage industry", *J. Inf. Technol.*, c. 20, sy 4, ss. 224-233, Ara. 2005, doi: 10.1057/palgrave.jit.2000051.
- [220] A. L. M. Cavaye, "Participation in the development of inter-organizational systems involving users outside the organization", *J. Inf. Technol.*, c. 10, ss. 135-147, b 1995.
- [221] C. Fearon ve G. Philip, "Managing expectations and benefits: a model for electronic trading and EDI in the insurance industry", *J. Inf. Technol.*, c. 20, sy 3, ss. 177-186, Eyl. 2005, doi: 10.1057/palgrave.jit.2000036.
- [222] S. M. Miranda ve C. B. Kavan, "Moments of governance in is outsourcing: conceptualizing effects of contracts on value capture and creation", *J. Inf. Technol.*, c. 20, sy 3, ss. 152-169, Eyl. 2005, doi: 10.1057/palgrave.jit.2000045.
- [223] J. Fedorowicz, S. Sawyer, ve A. Tomasino, "Governance configurations for inter-organizational coordination: a study of public safety networks", *J. Inf. Technol.*, c. 33, sy 4, ss. 326-344, Ara. 2018, doi: 10.1057/s41265-018-0056-z.
- [224] M. Howard, R. Vidgen, ve P. Powell, "Overcoming stakeholder barriers in the automotive industry: building to order with extra-organizational systems", *J. Inf. Technol.*, c. 18, sy 1, ss. 27-43, Mar. 2003, doi: 10.1080/0268396031000077431.
- [225] V. Weerakkody, Y. K. Dwivedi, ve Z. Irani, "The diffusion and use of institutional theory: a cross-disciplinary longitudinal literature survey", *J. Inf. Technol.*, c. 24, sy 4, ss. 354-368, Ara. 2009, doi: 10.1057/jit.2009.16.
- [226] K. Pramatarı, T. (Theos) Evgeniou, ve G. Doukidis, "Implementation of collaborative e-supply-chain initiatives: an initial challenging and final success case from grocery retailing", *J. Inf. Technol.*, c. 24, sy 3, ss. 269-281, Eyl. 2009, doi: 10.1057/jit.2008.11.
- [227] F. Wiengarten, P. Humphreys, A. McKittrick, ve B. Fynes, "Investigating the impact of e-business applications on supply chain collaboration in the German automotive industry", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 33, sy 1, ss. 25-48, Oca. 2013, doi: 10.1108/01443571311288039.
- [228] A. R. Cannon, P. M. Reyes, G. V. Frazier, ve E. L. Prater, "RFID in the contemporary supply chain: multiple perspectives on its benefits and risks", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 28, sy 5, ss. 433-454, Nis. 2008, doi: 10.1108/01443570810867196.
- [229] S. R. Croom, "The impact of e-business on supply chain management: An empirical study of key developments", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 25, sy 1, ss. 55-73, Oca. 2005, doi: 10.1108/01443570510572240.
- [230] G. J. C. da Silveira ve R. Cagliano, "The relationship between interorganizational information systems and operations performance", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 26, sy 3, ss. 232-253, Mar. 2006, doi: 10.1108/01443570610646184.
- [231] S. V. Walton ve J. N. D. Gupta, "Electronic data interchange for process change in an integrated supply chain", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 19, sy 4, ss. 372-388, Nis. 1999, doi: 10.1108/01443579910254222.
- [232] M. Stevenson ve M. Spring, "Flexibility from a supply chain perspective: definition and review", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 27, sy 7, ss. 685-713, Haz. 2007, doi: 10.1108/01443570710756956.
- [233] X. Pu, A. Y. L. Chong, Z. Cai, M. K. Lim, ve K. H. Tan, "Leveraging open-standard interorganizational information systems for process adaptability and alignment: An empirical analysis", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, c. 39, sy 6/7/8, ss. 962-992, Ara. 2019, doi: 10.1108/IJOPM-12-2018-0747.
- [234] P. Hadaya ve R. Pellerin, "Determinants of construction companies' use of web-based interorganizational information systems", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 15, sy 5, ss. 371-384, Ağu. 2010, doi: 10.1108/13598541011068305.
- [235] K. Mirkovski, P. B. Lowry, ve B. Feng, "Factors that influence interorganizational use of information and communications technology in relationship-based supply chains: evidence from the Macedonian and American wine industries", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 21, sy 3, ss. 334-351, May. 2016, doi: 10.1108/SCM-08-2015-0343.
- [236] G. D. Bhatt, "Business process improvement through electronic data interchange (EDI) systems: an empirical study", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 6, sy 2, ss. 60-74, Oca. 2001, doi: 10.1108/13598540110387564.

- [237] L. Cassivi, "Collaboration planning in a supply chain", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 11, sy 3, ss. 249-258, May. 2006, doi: 10.1108/13598540610662158.
- [238] S. A. Sherer, "From supply-chain management to value network advocacy: implications for e-supply chains", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 10, sy 2, ss. 77-83, Nis. 2005, doi: 10.1108/13598540510589151.
- [239] T. P. Stank, P. J. Daugherty, ve C. W. Autry, "Collaborative planning: supporting automatic replenishment programs", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 4, sy 2, ss. 75-85, May. 1999, doi: 10.1108/13598549910264752.
- [240] S. Kurnia ve Robert B. Johnston, "Adoption of efficient consumer response: the issue of mutuality", *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 6, sy 5, ss. 230-241, 2001.
- [241] K. A. Saeed, M. K. Malhotra, ve V. Grover, "Interorganizational system characteristics and supply chain integration: an empirical assessment*: Saeed, Malhotra, and Grover", *Decis. Sci.*, c. 42, sy 1, ss. 7-42, Şub. 2011, doi: 10.1111/j.1540-5915.2010.00300.x.
- [242] K. A. Saeed, M. K. Malhotra, ve V. Grover, "Examining the impact of interorganizational systems on process efficiency and sourcing leverage in buyer-supplier dyads", *Decis. Sci.*, c. 36, sy 3, ss. 365-396, Ağu. 2005, doi: 10.1111/j.1540-5414.2005.00077.x.
- [243] M. T. Frohlich, "E-integration in the supply chain: barriers and performance", *Decis. Sci.*, c. 33, sy 4, ss. 537-556, Eyl. 2002, doi: 10.1111/j.1540-5915.2002.tb01655.x.
- [244] D. Kim ve R. P. Lee, "Systems collaboration and strategic collaboration: their impacts on supply chain responsiveness and market performance*: systems collaboration and strategic collaboration", *Decis. Sci.*, c. 41, sy 4, ss. 955-981, Kas. 2010, doi: 10.1111/j.1540-5915.2010.00289.x.
- [245] V. Grover, "An empirically derived model for the adoption of customer-based interorganizational systems", *Decis. Sci.*, c. 24, sy 3, ss. 603-640, May. 1993, doi: 10.1111/j.1540-5915.1993.tb01295.x.
- [246] G. Piccoli, M. K. Brohman, R. T. Watson, ve A. Parasuraman, "Net-based customer service systems: evolution and revolution in web site functionalities*", *Decis. Sci.*, c. 35, sy 3, ss. 423-455, Ağu. 2004, doi: 10.1111/j.0011-7315.2004.02620.x.
- [247] G. Premkumar ve K. Ramamurthy, "The role of interorganizational and organizational factors on the decision mode for adoption of interorganizational systems*", *Decis. Sci.*, c. 26, sy 3, ss. 303-336, May. 1995, doi: 10.1111/j.1540-5915.1995.tb01431.x.
- [248] F. T. S. Chan ve A. Y. L. Chong, "A SEM–neural network approach for understanding determinants of interorganizational system standard adoption and performances", *Decis. Support Syst.*, c. 54, sy 1, ss. 621-630, Ara. 2012, doi: 10.1016/j.dss.2012.08.009.
- [249] W. Ke, H. Liu, K. K. Wei, J. Gu, ve H. Chen, "How do mediated and non-mediated power affect electronic supply chain management system adoption? The mediating effects of trust and institutional pressures", *Decis. Support Syst.*, c. 46, sy 4, ss. 839-851, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.dss.2008.11.008.
- [250] T. J. Strader, F.-R. Lin, ve M. J. Shaw, "Information infrastructure for electronic virtual organization management", *Decis. Support Syst.*, c. 23, sy 1, ss. 75-94, May. 1998, doi: 10.1016/S0167-9236(98)00037-2.
- [251] W. G. Chismar ve J. Meier, "A model of competing interorganizational systems and its application to airline reservation systems", *Decis. Support Syst.*, c. 8, sy 5, ss. 447-458, Eyl. 1992, doi: 10.1016/0167-9236(92)90028-N.
- [252] W. Kuechler, V. K. Vaishnavi, ve D. Kuechler, "Supporting optimization of business-to-business e-commerce relationships", *Decis. Support Syst.*, c. 31, sy 3, ss. 363-377, Ağu. 2001, doi: 10.1016/S0167-9236(00)00142-1.
- [253] I.-L. Wu ve C.-H. Chang, "Using the balanced scorecard in assessing the performance of e-SCM diffusion: A multi-stage perspective", *Decis. Support Syst.*, c. 52, sy 2, ss. 474-485, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.dss.2011.10.008.
- [254] R. Debreceeny, M. Putterill, L.-L. Tung, ve A. L. Gilbert, "New tools for the determination of e-commerce inhibitors", *Decis. Support Syst.*, c. 34, sy 2, ss. 177-195, Oca. 2002, doi: 10.1016/S0167-9236(02)00080-5.
- [255] R. Rajaguru ve M. Jekanyika Matanda, "Influence of inter-organisational integration on business performance: The mediating role of organisational-level supply chain functions", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 22, sy 4, ss. 456-467, Tem. 2009, doi: 10.1108/17410390910975059.
- [256] M. Geib, L. M. Kolbe, ve W. Brenner, "CRM collaboration in financial services networks: a multi-case analysis", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 19, sy 6, ss. 591-607, Kas. 2006, doi: 10.1108/17410390610708481.
- [257] A. Albani ve J. L. G. Dietz, "Current trends in modeling inter-organizational cooperation", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 22, sy 3, ss. 275-297, Nis. 2009, doi: 10.1108/17410390910949724.

- [258] E. M. Daniel, A. White, ve J. M. Ward, "Exploring the role of third parties in inter-organizational Web service adoption", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 17, sy 5, ss. 351-360, Eki. 2004, doi: 10.1108/17410390410560982.
- [259] S. G. Sutton, "Extended-enterprise systems' impact on enterprise risk management", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 19, sy 1, ss. 97-114, Oca. 2006, doi: 10.1108/17410390610636904.
- [260] U. A. Mohamed, G. H. Galal-Edeen, ve A. A. El-Zoghbi, "Building an integrated B2B e-commerce hub architecture based on SOA and semantic ontology", *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 23, sy 6, ss. 775-812, Eki. 2010, doi: 10.1108/17410391011088637.
- [261] S. Samaddar, S. Nargundkar, ve M. Daley, "Inter-organizational information sharing: The role of supply network configuration and partner goal congruence", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 174, sy 2, ss. 744-765, Eki. 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2005.01.059.
- [262] S. Raghunathan, "Impact of demand correlation on the value of and incentives for information sharing in a supply chain", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 146, sy 3, ss. 634-649, May. 2003, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00365-X.
- [263] J. Sarkis ve S. Talluri, "Evaluating and selecting e-commerce software and communication systems for a supply chain", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 159, sy 2, ss. 318-329, Ara. 2004, doi: 10.1016/j.ejor.2003.08.018.
- [264] M. Grieger, "Electronic marketplaces: A literature review and a call for supply chain management research", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 144, sy 2, ss. 280-294, Oca. 2003, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00394-6.
- [265] C. G. Ash ve J. M. Burn, "A strategic framework for the management of ERP enabled e-business change", *Eur. J. Oper. Res.*, c. 146, sy 2, ss. 374-387, Nis. 2003, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00556-8.
- [266] É. Lefebvre, L. Cassivi, L. A. Lefebvre, ve P.-M. Léger, "E-collaboration within one supply chain and its impact on firms' innovativeness and performance", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 1, sy 2, ss. 157-173, Oca. 2003, doi: 10.1007/s10257-003-0002-6.
- [267] T. S. McLaren, M. M. Head, ve Y. Yuan, "Supply chain management information systems capabilities. An exploratory study of electronics manufacturers", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 2, sy 2-3, ss. 207-222, Tem. 2004, doi: 10.1007/s10257-004-0035-5.
- [268] N. Geri ve N. Ahituv, "A theory of constraints approach to interorganizational systems implementation", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 6, sy 4, ss. 341-360, Eyl. 2008, doi: 10.1007/s10257-007-0075-8.
- [269] B. Hofreiter, "Extending UN/CEFACT's modeling methodology by a UML profile for local choreographies", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 7, sy 2, ss. 251-271, Mar. 2009, doi: 10.1007/s10257-008-0083-3.
- [270] W. Krathu vd., "Inter-organizational success factors: a cause and effect model", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 13, sy 3, ss. 553-593, Ağu. 2015, doi: 10.1007/s10257-014-0258-z.
- [271] M. Borman, "Developing, and testing, a theoretical framework for inter-organisational systems (IOS) as infrastructure to aid future IOS design", *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, c. 4, sy 4, ss. 343-360, Eki. 2006, doi: 10.1007/s10257-006-0033-x.
- [272] J. L. Kent ve J. T. Mentzer, "The effect of investment in interorganizational information technology in a retail supply chain", *J. Bus. Logist.*, c. 24, sy 2, ss. 155-175, Eyl. 2003, doi: 10.1002/j.2158-1592.2003.tb00050.x.
- [273] N. R. Sanders ve R. Premus, "Modeling the relationship between firm IT capability, collaboration, and performance", *J. Bus. Logist.*, c. 26, sy 1, ss. 1-23, Mar. 2005, doi: 10.1002/j.2158-1592.2005.tb00192.x.
- [274] R. Angeles ve R. Nath, "Partner congruence in electronic data interchange (EDI)-enabled relationships", *J. Bus. Logist.*, c. 22, sy 2, ss. 109-127, Eyl. 2001, doi: 10.1002/j.2158-1592.2001.tb00006.x.
- [275] N. R. Sanders ve R. Premus, "IT applications in supply chain organizations: a link between competitive priorities and organizational benefits", *J. Bus. Logist.*, c. 23, sy 1, ss. 65-83, Mar. 2002, doi: 10.1002/j.2158-1592.2002.tb00016.x.
- [276] A. M. Rodrigues, T. P. Stank, ve D. F. Lynch, "Linking strategy, structure, process, and performance in integrated logistics", *J. Bus. Logist.*, c. 25, sy 2, ss. 65-94, Eyl. 2004, doi: 10.1002/j.2158-1592.2004.tb00182.x.
- [277] R. G. Richey, P. J. Daugherty, ve A. S. Roath, "Firm technological readiness and complementarity: capabilities impacting logistics service competency and performance", *J. Bus. Logist.*, c. 28, sy 1, ss. 195-228, Mar. 2007, doi: 10.1002/j.2158-1592.2007.tb00237.x.

- [278] A. Y.-L. Chong, B. Lin, K.-B. Ooi, ve M. Raman, “Factors affecting the Adoption Level of C-Commerce: An Empirical Study”, *J. Comput. Inf. Syst.*, s. 11, 2009.
- [279] K. Siau, “Interorganizational systems and competitive advantages – lessons from history”, *J. Comput. Inf. Syst.*, 2003.
- [280] R. Bar-Lev, N. Geri, ve D. R. Raban, “Developing a financial statement-based effectiveness measure of interorganizational systems’ contribution”, *J. Comput. Inf. Syst.*, c. 56, sy 1, ss. 62-69, Oca. 2016, doi: 10.1080/08874417.2015.11645802.
- [281] Z. Shi, A. S. Kunnathur, ve T. S. Ragu-Nathan, “Exploring the impacts of interdependent relationships on IOS use: the roles of governance mechanisms”, *J. Comput. Inf. Syst.*, 2010.
- [282] S. Zheng, D. C. Yen, ve J. M. Tarn, “The new spectrum of the cross-enterprise solution: the integration of supply chain management and en”, *J. Comput. Inf. Syst.*, 2000.
- [283] X. Pu, Z. Wang, ve F. T. S. Chan, “Leveraging open e-logistic standards to achieve ambidexterity in supply chain”, *J. Comput. Inf. Syst.*, c. 60, sy 4, ss. 347-358, Tem. 2020, doi: 10.1080/08874417.2018.1488543.
- [284] J. Whitaker, N. Melville, R. Plice, ve J. Dedrick, “Global diffusion of the internet XVI: the role of economic development and firm internationalization in internet business practices”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 27, sy 31, ss. 611-626, 2010.
- [285] C. Merschbrock ve B. E. Munkvold, “A research review on building information modeling in construction—an area ripe for IS research”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 31, 2012, doi: 10.17705/1CAIS.03110.
- [286] A. Hovav ve R. Berger, “Tutorial: identity management systems and secured access control”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 25, 2009, doi: 10.17705/1CAIS.02542.
- [287] F. Land, “Early history of the information systems discipline in the UK: An account based on living through the period”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 36, 2015, doi: 10.17705/1CAIS.03626.
- [288] A. Persson ve G. Goldkuhl, “Government value paradigms—bureaucracy, new public management, and e-government”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 27, 2010, doi: 10.17705/1CAIS.02704.
- [289] F. Cabiddu ve G. Piccoli, “Open voucher and the tourist season in Sardinia”, *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, c. 27, 2010, doi: 10.17705/1CAIS.02724.
- [290] Y.-H. Liang, “Performance measurement of interorganizational information systems in the supply chain”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 53, sy 18, ss. 5484-5499, Eyl. 2015, doi: 10.1080/00207543.2015.1026614.
- [291] P. Childerhouse ve D. R. Towill, “Arcs of supply chain integration”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 49, sy 24, ss. 7441-7468, Ara. 2011, doi: 10.1080/00207543.2010.524259.
- [292] J. González-Benito, G. Lannelongue, ve J. A. Alfaro-Tanco, “Study of supply-chain management in the automotive industry: a bibliometric analysis”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 51, sy 13, ss. 3849-3863, Tem. 2013, doi: 10.1080/00207543.2012.752586.
- [293] G. P. Premkumar, “Interorganization systems and supply chain management: an information processing perspective”, *Inf. Syst. Manag.*, c. 17, sy 3, ss. 56-69, Haz. 2000, doi: 10.1201/1078/43192.17.3.20000601/31241.8.
- [294] Z. Huang, B. D. Janz, ve M. N. Frolick, “A comprehensive examination of Internet-EDI adoption”, *Inf. Syst. Manag.*, c. 25, sy 3, ss. 273-286, Tem. 2008, doi: 10.1080/10580530802151228.
- [295] I. K. W. Lai ve V. W. L. Tong, “The impact of company, subject, and system characteristics on the trust factors affecting the adoption of internet-based interorganizational systems”, *Inf. Syst. Manag.*, c. 30, sy 4, ss. 280-292, Eki. 2013, doi: 10.1080/10580530.2013.832959.
- [296] S. Mouzakitis ve D. Askounis, “A knowledge-based framework for measuring organizational readiness for the adoption of B2B integration systems”, *Inf. Syst. Manag.*, c. 27, sy 3, ss. 253-266, Tem. 2010, doi: 10.1080/10580530.2010.493842.
- [297] A. Asher, “Developing a B2B e-commerce implementation framework: a study of EDI implementation for procurement”, *Inf. Syst. Manag.*, c. 24, sy 4, ss. 373-390, Eki. 2007, doi: 10.1080/10580530701586144.
- [298] P. Hadaya, “Benchmarking firms’ operational performance according to their use of internet-based interorganizational systems”, *Benchmarking Int. J.*, c. 16, sy 5, ss. 621-639, Ağu. 2009, doi: 10.1108/14635770910987841.
- [299] M. A. Salam, “The mediating role of supply chain collaboration on the relationship between technology, trust and operational performance: An empirical investigation”, *Benchmarking Int. J.*, c. 24, sy 2, ss. 298-317, Mar. 2017, doi: 10.1108/BIJ-07-2015-0075.
- [300] S. Mandal ve R. K. Dubey, “Effect of inter-organizational systems appropriation in agility and resilience development: an empirical investigation”, *Benchmarking Int. J.*, c. 28, sy 9, ss. 2656-2681, Kas. 2021, doi: 10.1108/BIJ-10-2020-0542.

- [301] K. A. Fantazy, S. A. A. Tipu, ve V. Kumar, "Conceptualizing the relative openness of supply chain and its impact on organizational performance", *Benchmarking Int. J.*, c. 23, sy 5, ss. 1264-1285, Tem. 2016, doi: 10.1108/BIJ-05-2015-0045.
- [302] M. Themifstocleous ve Z. Irani, "Novel taxonomy for application integration", *Benchmarking Int. J.*, c. 9, sy 2, ss. 154-165, May. 2002, doi: 10.1108/14635770210421827.
- [303] N. Myhr ve R. E. Spekman, "Collaborative supply-chain partnerships built upon trust and electronically mediated exchange", *J. Bus. Ind. Mark.*, c. 20, sy 4/5, ss. 179-186, Haz. 2005, doi: 10.1108/08858620510603855.
- [304] H. Hsin Chang, H. Wang, ve T. Wei Kao, "The determinants of long-term relationship on inter-organizational systems performance", *J. Bus. Ind. Mark.*, c. 25, sy 2, ss. 106-118, Şub. 2010, doi: 10.1108/08858621011017732.
- [305] E. C. S. Ku, "Role of inter-organizational systems in driving tourism businesses forward in the post-COVID-19 new normal", *J. Bus. Ind. Mark.*, c. 38, sy 11, ss. 2471-2484, Kas. 2023, doi: 10.1108/JBIM-06-2022-0255.
- [306] R. Ryssel, T. Ritter, ve H. Georg Gemünden, "The impact of information technology deployment on trust, commitment and value creation in business relationships", *J. Bus. Ind. Mark.*, c. 19, sy 3, ss. 197-207, May. 2004, doi: 10.1108/08858620410531333.
- [307] A. Hausman, W. J. Johnston, ve A. Oyedele, "Cooperative adoption of complex systems: a comprehensive model within and across networks", *J. Bus. Ind. Mark.*, c. 20, sy 4/5, ss. 200-210, Haz. 2005, doi: 10.1108/08858620510603873.
- [308] T. H. Clark ve H. G. Lee, "Performance, interdependence and coordination in business-to-business electronic commerce and supply chain management", *Inf. Technol. Manag.*, c. 21, ss. 85-105, 2000.
- [309] K. Han, R. J. Kauffman, ve B. R. Nault, "Relative importance, specific investment and ownership in interorganizational systems", *Inf. Technol. Manag.*, c. 9, sy 3, ss. 181-200, Eyl. 2008, doi: 10.1007/s10799-008-0039-9.
- [310] L. Hou, L. Xue, S. N. Bui, ve W. Kettinger, "System sourcing and information processing capability in supply chains: a study of small suppliers", *Inf. Technol. Manag.*, c. 17, sy 4, ss. 379-391, Ara. 2016, doi: 10.1007/s10799-016-0255-7.
- [311] Y. Yao, Y. Dong, ve M. E. Dresner, "Analyzing information-enabled stockout management under vendor-managed inventory", *Inf. Technol. Manag.*, c. 8, sy 2, ss. 133-145, Haz. 2007, doi: 10.1007/s10799-007-0009-7.
- [312] S. Lee ve K. C. Lee, "The relationship among formal EDI controls, knowledge of EDI controls, and EDI performance", *Inf. Technol. Manag.*, c. 11, sy 1, ss. 43-59, Mar. 2010, doi: 10.1007/s10799-010-0065-2.
- [313] C. Ranganathan, J. S. Dhaliwal, ve T. S. H. Teo, "Assimilation and diffusion of web technologies in supply-chain management: an examination of key drivers and performance impacts", *Int. J. Electron. Commer.*, c. 9, sy 1, ss. 127-161, Eki. 2004, doi: 10.1080/10864415.2004.11044319.
- [314] G. E. Truman, "An empirical appraisal of EDI implementation strategies", *Int. J. Electron. Commer.*, c. 2, sy 4, ss. 43-70, Tem. 1998, doi: 10.1080/10864415.1998.11518320.
- [315] J. Gebauer ve P. Buxmann, "Assessing the value of interorganizational systems to support business transactions", *Int. J. Electron. Commer.*, c. 4, sy 4, ss. 61-82, Tem. 2000, doi: 10.1080/10864415.2000.11518379.
- [316] L. Chi, C. W. Holsapple, ve C. Srinivasan, "Competitive dynamics in electronic networks: a model and the case of interorganizational systems", *Int. J. Electron. Commer.*, c. 11, sy 3, ss. 7-49, Nis. 2007, doi: 10.2753/JEC1086-4415110301.
- [317] J. Gebauer ve M. J. Shaw, "Introduction to the special section: business-to-business electronic commerce", *Int. J. Electron. Commer.*, c. 6, sy 4, ss. 7-17, Tem. 2002, doi: 10.1080/10864415.2002.11044250.
- [318] G. Kim vd., "IT capabilities, process-oriented dynamic capabilities, and firm financial performance", *J. Assoc. Inf. Syst.*, c. 12, sy 7, ss. 487-517, Tem. 2011, doi: 10.17705/1jais.00270.
- [319] C. Legner ve J. Schemm, "Toward the inter-organizational product information supply chain – evidence from the retail and consumer goods industries", *J. Assoc. Inf. Syst.*, c. 9, sy 4, ss. 119-150, Nis. 2008, doi: 10.17705/1jais.00156.
- [320] S. Feldman ve T. Horan, "The dynamics of information collaboration: a case study of blended IT value propositions for health information exchange in disability determination", *J. Assoc. Inf. Syst.*, c. 12, sy 2, ss. 189-207, Şub. 2011, doi: 10.17705/1jais.00256.

- [321] X. Zhao, B. Huo, W. Selen, ve J. H. Y. Yeung, "The impact of internal integration and relationship commitment on external integration*", *J. Oper. Manag.*, c. 29, sy 1-2, ss. 17-32, Oca. 2011, doi: 10.1016/j.jom.2010.04.004.
- [322] M. T. Frohlich ve R. Westbrook, "Arcs of integration: an international study of supply chain strategies", *J. Oper. Manag.*, c. 19, sy 2, ss. 185-200, Şub. 2001, doi: 10.1016/S0272-6963(00)00055-3.
- [323] S. Devaraj, L. Krajewski, ve J. C. Wei, "Impact of e-business technologies on operational performance: The role of production information integration in the supply chain", *J. Oper. Manag.*, c. 25, sy 6, ss. 1199-1216, Kas. 2007, doi: 10.1016/j.jom.2007.01.002.
- [324] N. R. Sanders, "An empirical study of the impact of e-business technologies on organizational collaboration and performance", *J. Oper. Manag.*, c. 25, sy 6, ss. 1332-1347, Kas. 2007, doi: 10.1016/j.jom.2007.01.008.
- [325] V. Bhakoo ve T. Choi, "The iron cage exposed: Institutional pressures and heterogeneity across the healthcare supply chain", *J. Oper. Manag.*, c. 31, sy 6, ss. 432-449, Eyl. 2013, doi: 10.1016/j.jom.2013.07.016.
- [326] J. Löhe ve C. Legner, "SOA adoption in business networks: do service-oriented architectures really advance inter-organizational integration?", *Electron. Mark.*, c. 20, sy 3-4, ss. 181-196, Ara. 2010, doi: 10.1007/s12525-010-0046-7.
- [327] S. Solaimani, N. Guldemond, ve H. Bouwman, "Dynamic stakeholder interaction analysis: Innovative smart living design cases", *Electron. Mark.*, c. 23, sy 4, ss. 317-328, Ara. 2013, doi: 10.1007/s12525-013-0143-5.
- [328] K. Riemer ve N. Vehring, "Virtual or vague? a literature review exposing conceptual differences in defining virtual organizations in IS research", *Electron. Mark.*, c. 22, sy 4, ss. 267-282, Ara. 2012, doi: 10.1007/s12525-012-0094-2.
- [329] K. Reimers, "Markets for electronic markets? The non-market preconditions of electronic markets", *Electron. Mark.*, c. 5, sy 1, ss. 12-13, Oca. 1995, doi: 10.1080/10196789500000016.
- [330] Z. Song, Y. Sun, J. Wan, L. Huang, ve J. Zhu, "Smart e-commerce systems: current status and research challenges", *Electron. Mark.*, c. 29, sy 2, ss. 221-238, Haz. 2019, doi: 10.1007/s12525-017-0272-3.
- [331] B. Chae, H. R. Yen, ve C. Sheu, "Information technology and supply chain collaboration: moderating effects of existing relationships between partners", *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 52, sy 4, ss. 440-448, Kas. 2005, doi: 10.1109/TEM.2005.856570.
- [332] R. Shah, S. M. Goldstein, ve P. T. Ward, "Aligning supply chain management characteristics and interorganizational information system types: an exploratory study", *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 49, sy 3, ss. 282-292, Ağu. 2002, doi: 10.1109/TEM.2002.803382.
- [333] B. Y. Iskandar, S. Kurokawa, ve L. J. LeBlanc, "Adoption of electronic data interchange: the role of buyer-supplier relationships", *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 48, sy 4, ss. 505-517, Kas. 2001, doi: 10.1109/17.969427.
- [334] J. D. Wareham, "Information assets in interorganizational governance: Exploring the property rights perspective", *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 50, sy 3, ss. 337-351, Ağu. 2003, doi: 10.1109/TEM.2003.817291.
- [335] K. Ramamurthy ve G. Premkumar, "Determinants and outcomes of electronic data interchange diffusion", *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 42, sy 4, ss. 332-351, Kas. 1995, doi: 10.1109/17.482083.
- [336] C. J. Ibbott ve R. M. O'Keefe, "Trust, planning and benefits in a global interorganizational system", *Inf. Syst. J.*, c. 14, sy 2, ss. 131-152, Nis. 2004, doi: 10.1111/j.1365-2575.2004.00167.x.
- [337] M. J. Gallivan ve G. Depledge, "Trust, control and the role of interorganizational systems in electronic partnerships", *Inf. Syst. J.*, c. 13, sy 2, ss. 159-190, Nis. 2003, doi: 10.1046/j.1365-2575.2003.00146.x.
- [338] H. R. Rao, C. C. Pegels, A. F. Salam, K. T. Hwang, ve V. Seth, "The impact of EDI implementation commitment and implementation success on competitive advantage and firm performance", *Inf. Syst. J.*, c. 5, sy 3, ss. 185-202, Tem. 1995, doi: 10.1111/j.1365-2575.1995.tb00107.x.
- [339] V. Grover ve T. C. Teng, "Facilitating the implementation of customer-based inter-organizational systems: an empirical analysis of innovation and support factors", *Inf. Syst. J.*, c. 4, sy 1, ss. 61-89, Oca. 1994, doi: 10.1111/j.1365-2575.1994.tb00043.x.
- [340] S. Kurokawa, S. Manabe, ve B. Rassameethes, "Determinants of EDI adoption and integration by U.S. and Japanese automobile suppliers", *J. Organ. Comput. Electron. Commer.*, c. 18, sy 1, ss. 1-33, Oca. 2008, doi: 10.1080/10919390701807459.

- [341] L. Chi, C. W. Holsapple, ve C. Srinivasan, "Digital systems, partnership networks, and competition: the co-evolution of IOS use and network position as antecedents of competitive action", *J. Organ. Comput. Electron. Commer.*, c. 18, sy 1, ss. 61-94, Oca. 2008, doi: 10.1080/10919390701807350.
- [342] H.-L. Chang, "Factors affecting the offshore deployment of interorganizational systems in China: A case study analysis", *J. Organ. Comput. Electron. Commer.*, c. 29, sy 3, ss. 163-189, Tem. 2019, doi: 10.1080/10919392.2019.1583811.
- [343] I. K. W. Lai, V. W. L. Tong, ve D. C. F. Lai, "Trust factors influencing the adoption of internet-based interorganizational systems", *Electron. Commer. Res. Appl.*, c. 10, sy 1, ss. 85-93, Oca. 2011, doi: 10.1016/j.elerap.2010.07.001.
- [344] S. C. Lee, B. Y. Pak, ve H. G. Lee, "Business value of B2B electronic commerce: the critical role of inter-firm collaboration", *Electron. Commer. Res. Appl.*, c. 2, sy 4, ss. 350-361, Ara. 2003, doi: 10.1016/S1567-4223(03)00003-6.
- [345] Y. Xu, W. F. Boh, C. Luo, ve H. Zheng, "Leveraging industry standards to improve the environmental sustainability of a supply chain", *Electron. Commer. Res. Appl.*, c. 27, ss. 90-105, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.elerap.2017.12.002.
- [346] I.-L. Wu ve C.-H. Chuang, "Analyzing contextual antecedents for the stage-based diffusion of electronic supply chain management", *Electron. Commer. Res. Appl.*, c. 8, sy 6, ss. 302-314, Kas. 2009, doi: 10.1016/j.elerap.2009.04.013.
- [347] M. Grieger, "An empirical study of business processes across Internet-based electronic marketplaces: A supply-chain-management perspective", *Bus. Process Manag. J.*, c. 10, sy 1, ss. 80-100, Şub. 2004, doi: 10.1108/14637150410518347.
- [348] G. Kim, "E-business strategy in Western Europe: offshore BPO model perspective", *Bus. Process Manag. J.*, c. 14, sy 6, ss. 813-828, Kas. 2008, doi: 10.1108/14637150810915991.
- [349] R. Agarwal ve N. Bajaj, "Managing outsourcing process: applying six sigma", *Bus. Process Manag. J.*, c. 14, sy 6, ss. 829-837, Kas. 2008, doi: 10.1108/14637150810916008.
- [350] S. Laukkanen, S. Sarpola, ve K. Kemppainen, "Dual role of extranet portals in buyer-supplier information exchange", *Bus. Process Manag. J.*, c. 13, sy 4, ss. 503-521, Tem. 2007, doi: 10.1108/14637150710763540.
- [351] A. Yee-Loong Chong, K. Ooi, B. Lin, ve S. Yi Tang, "Influence of interorganizational relationships on SMEs' e-business adoption", *Internet Res.*, c. 19, sy 3, ss. 313-331, Haz. 2009, doi: 10.1108/10662240910965379.
- [352] G. Lee, H. Lin, ve J. Pai, "Influence of environmental and organizational factors on the success of internet-based interorganizational systems planning", *Internet Res.*, c. 15, sy 5, ss. 527-543, Ara. 2005, doi: 10.1108/10662240510629466.
- [353] C. Fearon, J. Ballantine, ve G. Philip, "Understanding the role of electronic trading and inter-organisational cooperation and coordination: A conceptual matrix framework", *Internet Res.*, c. 20, sy 5, ss. 545-562, Eki. 2010, doi: 10.1108/10662241011084095.
- [354] D. Hee Shin, "Distributed inter-organizational systems and innovation processes", *Internet Res.*, c. 16, sy 5, ss. 553-572, Eki. 2006, doi: 10.1108/10662240610711012.
- [355] N. Archer ve Y. Yuan, "Managing business-to-business relationships throughout the e-commerce procurement life cycle", *Internet Res. Electron. Netw. Appl. Policy*, c. 10, sy 5, ss. 385-395, Ara. 2000, doi: 10.1108/10662240010349390.
- [356] D. Kardaras ve E. Papathanassiou, "The development of B2C e-commerce in Greece: current situation and future potential", *Internet Res. Electron. Netw. Appl. Policy*, c. 10, sy 4, ss. 284-294, Eki. 2000, doi: 10.1108/10662240010342568.
- [357] P. Ratnasingam, "Inter-organizational trust in EDI adoption: the case of Ford Motor Company and PBR Limited in Australia", *Internet Res. Electron. Netw. Appl. Policy*, c. 11, sy 3, ss. 261-269, Ağu. 2001, doi: 10.1108/10662240110396441.
- [358] J. Kauremaa ve K. Tanskanen, "Designing interorganizational information systems for supply chain integration: a framework", *Int. J. Logist. Manag.*, c. 27, sy 1, ss. 71-94, May. 2016, doi: 10.1108/IJLM-01-2013-0008.
- [359] D. J. Closs ve K. Savitskie, "Internal and external logistics information technology integration", *Int. J. Logist. Manag.*, c. 14, sy 1, ss. 63-76, Oca. 2003, doi: 10.1108/09574090310806549.
- [360] A. Blankley, "A conceptual model for evaluating the financial impact of supply chain management technology investments", *Int. J. Logist. Manag.*, c. 19, sy 2, ss. 155-182, Ağu. 2008, doi: 10.1108/09574090810895942.
- [361] R. Angeles, "Revisiting the role of Internet-EDI in the current electronic commerce scene", *Logist. Inf. Manag.*, c. 13, sy 1, ss. 45-57, Şub. 2000, doi: 10.1108/09576050010306396.

- [362] M. Warkentin, R. Bapna, ve V. Sugumaran, “E-knowledge networks for inter-organizational collaborative e-business”, *Logist. Inf. Manag.*, c. 14, sy 1/2, ss. 149-163, Mar. 2001, doi: 10.1108/09576050110363040.
- [363] M. Morrell ve J. Ezingard, “Revisiting adoption factors of inter-organisational information systems in SMEs”, *Logist. Inf. Manag.*, c. 15, sy 1, ss. 46-57, Mar. 2002, doi: 10.1108/09576050210412666.
- [364] R. “Bryan” Jean, R. R. Sinkovics, ve D. Kim, “Information technology and organizational performance within international business to business relationships: A review and an integrated conceptual framework”, *Int. Mark. Rev.*, c. 25, sy 5, ss. 563-583, Eyl. 2008, doi: 10.1108/02651330810904099.
- [365] E. Kaynak, E. Tatoglu, ve V. Kula, “An analysis of the factors affecting the adoption of electronic commerce by SMEs: Evidence from an emerging market”, *Int. Mark. Rev.*, c. 22, sy 6, ss. 623-640, Ara. 2005, doi: 10.1108/02651330510630258.
- [366] R. “Bryan” Jean ve R. R. Sinkovics, “Relationship learning and performance enhancement via advanced information technology: The case of Taiwanese dragon electronics firms”, *Int. Mark. Rev.*, c. 27, sy 2, ss. 200-222, Nis. 2010, doi: 10.1108/02651331011037520.
- [367] M. Bensaou ve N. Venkatraman, “Configurations of interorganizational relationships: a comparison between U.S. and Japanese automakers”, *Manag. Sci.*, c. 41, sy 9, ss. 1471-1492, Eyl. 1995, doi: 10.1287/mnsc.41.9.1471.
- [368] K. Zhu, K. L. Kraemer, ve S. Xu, “The process of innovation assimilation by firms in different countries: a technology diffusion perspective on e-business”, *Manag. Sci.*, c. 52, sy 10, ss. 1557-1576, a 2006, doi: 10.1287/mnsc.1050.0487.
- [369] F. J. Riggins, C. H. Kriebel, ve T. Mukhopadhyay, “The growth of interorganizational systems in the presence of network externalities”, *Manag. Sci.*, c. 40, sy 8, ss. 984-998, Ağu. 1994, doi: 10.1287/mnsc.40.8.984.
- [370] A. Wu ve Y. Li, “Interorganisational trust in B2B commerce”, *Int. J. Netw. Virtual Organ.*, c. 6, sy 3, ss. 303-317, 2009.
- [371] T. McNichols ve L. Brennan, “Evaluating partner suitability for collaborative supply networks”, *Int. J. Netw. Virtual Organ.*, c. 3, sy 2, s. 220, 2006, doi: 10.1504/IJNVO.2006.009536.
- [372] L. Deng ve Z. Liu, “Research on cost allocation for interorganisational systems”, *Int. J. Netw. Virtual Organ.*, c. 6, sy 4, s. 344, 2009, doi: 10.1504/IJNVO.2009.025931.
- [373] R. Rajaguru ve M. J. Matanda, “Effects of inter-organizational compatibility on supply chain capabilities: Exploring the mediating role of inter-organizational information systems (IOIS) integration”, *Ind. Mark. Manag.*, c. 42, sy 4, ss. 620-632, May. 2013, doi: 10.1016/j.indmarman.2012.09.002.
- [374] F. Wu, S. Yenyurt, D. Kim, ve S. T. Cavusgil, “The impact of information technology on supply chain capabilities and firm performance: A resource-based view”, *Ind. Mark. Manag.*, c. 35, sy 4, ss. 493-504, May. 2006, doi: 10.1016/j.indmarman.2005.05.003.
- [375] H. Makkonen ve V. Mervi, “The role of information technology in strategic buyer-supplier relationships”, *Ind. Mark. Manag.*, c. 43, sy 6, ss. 1053-1062, Eyl. 2014, doi: 10.1016/j.indmarman.2014.05.018.
- [376] P. Y. Sun ve J. L. Scott, “An investigation of barriers to knowledge transfer”, *J. Knowl. Manag.*, c. 9, sy 2, ss. 75-90, Nis. 2005, doi: 10.1108/13673270510590236.
- [377] E. Randeree, “Knowledge management: securing the future”, *J. Knowl. Manag.*, c. 10, sy 4, ss. 145-156, Tem. 2006, doi: 10.1108/13673270610679435.
- [378] G. Wang, W. Dou, W. Zhu, ve N. Zhou, “The effects of firm capabilities on external collaboration and performance: The moderating role of market turbulence”, *J. Bus. Res.*, c. 68, sy 9, ss. 1928-1936, Eyl. 2015, doi: 10.1016/j.jbusres.2015.01.002.
- [379] W. G. Qu ve Z. Yang, “The effect of uncertainty avoidance and social trust on supply chain collaboration”, *J. Bus. Res.*, c. 68, sy 5, ss. 911-918, May. 2015, doi: 10.1016/j.jbusres.2014.09.017.
- [380] G. Philip ve M. E. Booth, “A new six ‘S’ framework on the relationship between the role of information systems (IS) and competencies in ‘IS’ management”, *J. Bus. Res.*, c. 51, sy 3, ss. 233-247, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0148-2963(99)00051-X.
- [381] M. Madlberger, “What drives firms to engage in interorganizational information sharing in supply chain management?”, *Int. J. E-Collab.*, c. 5, sy 2, ss. 18-42, 2009.
- [382] M. Ali, S. Kurnia, ve R. B. Johnston, “Investigating IOS adoption maturity using a dyadic approach”, *Int. J. E-Collab.*, c. 5, sy 2, ss. 43-60, Nis. 2009, doi: 10.4018/jec.2009040103.

- [383] W. Prinz, M. A. Martínez-Carreras, ve M. Pallot, “From collaborative tools to collaborative working environments”, *Int. J. E-Collab.*, c. 6, sy 1, ss. 1-13, Oca. 2010, doi: 10.4018/jec.2010091101.
- [384] T. A. Horan ve B. Schooley, “Inter-organizational emergency medical services: case study of rural wireless deployment and management”, *Inf. Syst. Front.*, c. 7, sy 2, ss. 155-173, May. 2005, doi: 10.1007/s10796-005-1476-1.
- [385] J. Fedorowicz ve J. L. Gogan, “Reinvention of interorganizational systems: A case analysis of the diffusion of a bio-terror surveillance system”, *Inf. Syst. Front.*, c. 12, sy 1, ss. 81-95, Mar. 2010, doi: 10.1007/s10796-009-9167-y.
- [386] S. F. Wamba, A. Anand, ve L. Carter, “RFID applications, issues, methods and theory: a review of the AIS basket of TOP journals”, *Procedia Technol.*, c. 9, ss. 421-430, 2013, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.047.
- [387] P. Suriyantphupha ve M. Bournlakis, “Information technology in a traditional retail supply chain: a structured literature review”, *Proj. Proyéctica Proj.*, c. 22, sy 1, ss. 89-102, Haz. 2019, doi: 10.3917/proj.022.0089.
- [388] A. Thöni ve A. M. Tjoa, “Information technology for sustainable supply chain management: a literature survey”, *Enterp. Inf. Syst.*, c. 11, sy 6, ss. 828-858, Tem. 2017, doi: 10.1080/17517575.2015.1091950.
- [389] M. D. Kakhki ve V. B. Gargeya, “Information systems for supply chain management: a systematic literature analysis”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 57, sy 15-16, ss. 5318-5339, Ağu. 2019, doi: 10.1080/00207543.2019.1570376.
- [390] R. L. Wichmann, B. Eisenbart, ve K. Gericke, “The direction of industry: a literature review on industry 4.0”, *Proc. Des. Soc. Int. Conf. Eng. Des.*, c. 1, sy 1, ss. 2129-2138, Tem. 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.219.
- [391] T. Zheng, M. Ardolino, A. Bacchetti, ve M. Perona, “The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 59, sy 6, ss. 1922-1954, Mar. 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1824085.
- [392] X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang, Y. Wang, ve K. Wang, “The application of industry 4.0 technologies in sustainable logistics: a systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, c. 29, sy 7, ss. 9560-9591, Şub. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17693-y.
- [393] M. Gebhardt, M. Kopyto, H. Birkel, ve E. Hartmann, “Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, c. 60, sy 23, ss. 6967-6995, Ara. 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1999521.
- [394] A. Jede ve F. Teuteberg, “Integrating cloud computing in supply chain processes: A comprehensive literature review”, *J. Enterp. Inf. Manag.*, c. 28, sy 6, ss. 872-904, Eki. 2015, doi: 10.1108/JEIM-08-2014-0085.
- [395] M. M. Queiroz, R. Telles, ve S. H. Bonilla, “Blockchain and supply chain management integration: a systematic review of the literature”, *Supply Chain Manag. Int. J.*, c. 25, sy 2, ss. 241-254, Ağu. 2019, doi: 10.1108/SCM-03-2018-0143.
- [396] W. Elgarah, N. Falaleeva, C. C. Saunders, V. Ilie, J. T. Shim, ve James. F. Courtney, “Data exchange in interorganizational relationships: review through multiple conceptual lenses”, *ACM SIGMIS Database DATABASE Adv. Inf. Syst.*, c. 36, sy 1, ss. 8-29, Şub. 2005, doi: 10.1145/1047070.1047073.
- [397] N. Lang, H. M. Moonen, F. J. Srour, ve R. A. Zuidwijk, “Multi agent systems in logistics: a literature and state-of-the-art review”, *ERIM Rep. Ser. Res. Manag. Erasmus Res. Inst. Manag.*, ss. 1-69, 2008.
- [398] X. Xue, Q. Shen, H. Fan, H. Li, ve S. Fan, “IT supported collaborative work in A/E/C projects: A ten-year review”, *Autom. Constr.*, c. 21, ss. 1-9, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.05.016.
- [399] A. Z. Bigdeli, M. Kamal, ve S. De Cesare, “Information sharing through inter-organisational systems in local government”, *Transform. Gov. People Process Policy*, c. 7, sy 2, ss. 148-176, May. 2013, doi: 10.1108/17506161311325341.
- [400] T. Heart, O. Ben-Assuli, ve I. Shabtai, “A review of PHR, EMR and EHR integration: A more personalized healthcare and public health policy”, *Health Policy Technol.*, c. 6, sy 1, ss. 20-25, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.hlpt.2016.08.002.
- [401] K. A. Saeed, M. K. Malhotra, ve V. Grover, “Interorganizational system characteristics and supply chain integration: an empirical assessment*: Saeed, Malhotra, and Grover”, *Decis. Sci.*, c. 42, sy 1, ss. 7-42, Şub. 2011, doi: 10.1111/j.1540-5915.2010.00300.x.

- [402] C. Marinagi, P. Trivellas, ve D. P. Sakas, “The impact of information technology on the development of supply chain competitive advantage”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, c. 147, ss. 586-591, Ağu. 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.161.
- [403] N. R. Sanders, “IT alignment in supply chain relationships: a study of supplier benefits”, *J. Supply Chain Manag.*, c. 41, sy 2, ss. 4-13, May. 2005, doi: 10.1111/j.1055-6001.2005.04102001.x.
- [404] A. Kayabaşı ve Y. Gümüş, “The impact of using e-business technologies on organizational collaboration and performance in supply chain”, *Afr. J. Bus. Manag.*, c. 6, sy 8, Şub. 2012, doi: 10.5897/AJBM11.2389.
- [405] N. C.-A. Lee ve E. T. G. Wang, “Translation to inter-organizational Systems integration: The effect of power and the mediating role of the obligatory passage point”, *Pac. Asia J. Assoc. Inf. Syst.*, ss. 45-76, 2016, doi: 10.17705/1pais.08303.
- [406] N. C.-A. Lee, E. T. G. Wang, ve V. Grover, “Inter-organizational system integration: introducing compromise as a key construct for manufacturing firms and their suppliers”, *Data Base Adv. Inf. Syst.*, 2022.
- [407] C. A. De Mattos ve F. J. B. Laurindo, “Information technology adoption and assimilation: Focus on the suppliers portal”, *Comput. Ind.*, c. 85, ss. 48-57, Şub. 2017, doi: 10.1016/j.compind.2016.12.009.
- [408] G. J. C. D. Silveira ve R. Cagliano, “Antecedents of inter-organisational systems adoption in manufacturing”, *Int. J. Product. Qual. Manag.*, c. 1, sy 1/2, s. 37, 2006, doi: 10.1504/IJPMQ.2006.008372.
- [409] M. A. Taher, R. Bandarian, ve M. R. S. Moghadam, “Surveying the effects of CKMP of strategic managers on supply chain performance in Iran oil industry”, *Int. J. Bus. Perform. Supply Chain Model.*, 2017.
- [410] Y. Xu, J. Liu, J. Wu, ve C. Luo, “Improving supply chain performance through industry standards use and community socialization: A perspective of standards consortia”, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, c. 46, sy 8, ss. 763-782, Eyl. 2016, doi: 10.1108/IJPDLM-10-2015-0255.
- [411] B. DhaifAllah, S. Md-Auzair, R. Maelah, ve M. D. Ismail, “The effect of product complexity and communication quality on IOCM and OBA in buyer– supplier relationships”, *J. Account. Organ. Change*, c. 16, sy 1, ss. 1-29, Ara. 2019, doi: 10.1108/JAOC-04-2017-0035.
- [412] S. S. Chaurasia, “I can’t but we can!: Impact of goal compatibility on value co-creation in retailer– manufacturer outsourcing relationship”, *J. Glob. Oper. Strateg. Sourc.*, c. 11, sy 1, ss. 123-144, Şub. 2018, doi: 10.1108/JGOSS-04-2017-0010.
- [413] E. J. Riddle, D. A. Bradbard, J. Boyd Thomas, ve D. H. Kincade, “The role of electronic data interchange in Quick Response”, *J. Fash. Mark. Manag. Int. J.*, c. 3, sy 2, ss. 133-146, Şub. 1999, doi: 10.1108/eb022555.
- [414] K.-P. Chang ve G. Graham, “E-business strategy in supply chain collaboration: an empirical study of B2B e-commerce project in Taiwan”, *Int. J. Electron. Bus. Manag.*, c. 10, sy 2, 2012.
- [415] J. Bahlmann ve A. Spiller, “Inter-organizational information systems in meat chains: the linkage between supply chain organization and system requirements”, *J. Chain Netw. Sci.*, c. 9, sy 1, ss. 59-69, Oca. 2009, doi: 10.3920/JCNS2009.x159.
- [416] M. Rahim, G. Shanks, R. Johnston, ve P. Sarker, “Organizational motivation and interorganizational systems adoption process: empirical evaluation in the Australian automotive industry”, *J. Electron. Commer. Organ.*, c. 5, sy 3, ss. 1-16, 2007.
- [417] J.-D. Leu, Y.-T. Huang, ve L.-T. Huang, “Effectiveness of inter-organizational systems in global manufacturing: evidence from industrial cases in Taiwan”, *Int. J. Strateg. Decis. Sci.*, c. 2, sy 1, 2013.
- [418] N. Berente, R. Baxter, ve K. Lyytinen, “Dynamics of inter-organizational knowledge creation and information technology use across object worlds: the case of an innovative construction project”, *Constr. Manag. Econ.*, c. 28, sy 6, ss. 569-588, Haz. 2010, doi: 10.1080/01446193.2010.489926.
- [419] C. Merschbrock, “Unorchestrated Symphony: The case of inter-organizational collaboration in digital construction design”, *J. Inf. Technol. Constr.*, c. 17, ss. 333-350, 2012.
- [420] S. Massa ve S. Testa, “ICTs adoption and knowledge management: the case of an e-procurement system”, *Knowl. Process Manag.*, c. 14, sy 1, ss. 26-36, Oca. 2007, doi: 10.1002/kpm.267.
- [421] D. C. L. Kuo, W. H. Chen, ve M. T. Smits, “SME-based collaborative supply chain management: the impact of information technologies”, *Int. J. Manag. Enterpr. Dev.*, c. 2, sy 3/4, s. 360, 2005, doi: 10.1504/IJMED.2005.006567.
- [422] C. Quetti, F. Pigni, ve A. Clerici, “Factors affecting RFID adoption in a vertical supply chain: the case of the silk industry in Italy”, *Prod. Plan. Control*, c. 23, sy 4, ss. 315-331, Nis. 2012, doi: 10.1080/09537287.2011.627661.

- [423] M. M. Rahim, G. Shanks, ve R. B. Johnston, "A cross industry comparison of inter-organisational systems implementation activities", *Electron. Commer. Res.*, c. 11, sy 2, ss. 215-243, May. 2011, doi: 10.1007/s10660-010-9074-9.
- [424] G. Dhillon ve M. Caldeira, "Interpreting the adoption and use of EDI in the Portuguese clothing and textile industry", *Inf. Manag. Comput. Secur.*, c. 8, sy 4, ss. 184-188, Eki. 2000, doi: 10.1108/09685220010344934.
- [425] G. Qu, S. Ji, ve Q. Min, "Inter-organizational coordination, IT support, and environment", *Tsinghua Sci. Technol.*, c. 13, sy 3, ss. 374-382, Haz. 2008, doi: 10.1016/S1007-0214(08)70060-9.
- [426] S. A. Raj ve S. Vinodh, "Forty criteria based agility assessment using scoring approach in an Indian relays manufacturing organization", *J. Eng. Des. Technol.*, c. 12, sy 4, ss. 507-518, Eyl. 2014, doi: 10.1108/JEDT-10-2010-0065.
- [427] [Arshinder, A. Kanda, ve S. G. Deshmukh, "Supply chain coordination issues: an SAP-LAP framework", *Asia Pac. J. Mark. Logist.*, c. 19, sy 3, ss. 240-264, Tem. 2007, doi: 10.1108/13555850710772923.
- [428] M. P. Iacono, V. Esposito, L. Mercurio, ve M. Martinez, "Bridging business model and inter-organizational coordination mechanisms in the Italian wine industry", *Meas. Bus. Excell.*, c. 20, sy 4, ss. 61-71, Kas. 2016, doi: 10.1108/MBE-08-2016-0043.
- [429] S. A. Spralls, S. D. Hunt, ve J. B. Wilcox, "Extranet use and building relationship capital in interfirm distribution networks: the role of extranet capability", *J. Retail.*, c. 87, sy 1, ss. 59-74, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jretai.2010.09.001.
- [430] R. O'Callaghan, P. J. Kaufmann, ve B. R. Konsynski, "Adoption correlates and share effects of electronic data interchange systems in marketing channels", *J. Mark.*, c. 56, sy 45-56, 1992.
- [431] K. A. Al-Busaidi, "Knowledge workers' perceptions of potential benefits and challenges of inter-organizational knowledge sharing systems: a Delphi study in the health sector", *Knowl. Manag. Res. Pract.*, c. 12, sy 4, ss. 398-408, Kas. 2014, doi: 10.1057/kmrp.2013.4.
- [432] J. R. Vest, "More than just a question of technology: Factors related to hospitals' adoption and implementation of health information exchange", *Int. J. Med. Inf.*, c. 79, sy 12, ss. 797-806, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.ijmedinf.2010.09.003.
- [433] J. G. Anderson, R. Ramanujam, D. J. Hensel, ve C. A. Sirio, "Reporting trends in a regional medication error data-sharing system", *Health Care Manag. Sci.*, c. 13, sy 1, ss. 74-83, Mar. 2010, doi: 10.1007/s10729-009-9111-1.
- [434] K. A. Al-Busaidi, "Inter-organizational knowledge sharing system in the health sector: physicians' perspective", *Int. J. Knowl. Manag.*, c. 11, sy 3, ss. 37-54, Tem. 2015, doi: 10.4018/IJKM.2015070103.
- [435] K. A. Al-Busaidi ve L. Olfman, "Knowledge sharing through inter-organizational knowledge sharing systems", *VINE J. Inf. Knowl. Manag. Syst.*, c. 47, sy 1, ss. 110-136, Şub. 2017, doi: 10.1108/VJIKMS-05-2016-0019.
- [436] C. Mafini, "Predicting organisational performance through innovation, quality and inter-organisational systems: a public sector perspective", *J. Appl. Bus. Res. JABR*, c. 31, sy 3, s. 939, May. 2015, doi: 10.19030/jabr.v31i3.9227.
- [437] V. W. L. Tong ve I. K. W. Lai, "A preliminary study of trust in internet-based inter-organisational systems", *Int. J. Electron. Cust. Relatsh. Manag.*, c. 2, sy 3, s. 215, 2008, doi: 10.1504/IJECRM.2008.020407.
- [438] D. Bodega, G. Cioccarelli, ve S. Denicolai, "New inter-organizational forms: Evolution of relationship structures in mountain tourism", *Tour. Rev.*, c. 59, sy 3, ss. 13-19, Mar. 2004, doi: 10.1108/eb058437.
- [439] M. Sigala, "Examining the adoption of destination management systems: An inter-organizational information systems approach", *Manag. Decis.*, c. 51, sy 5, ss. 1011-1036, May. 2013, doi: 10.1108/MD-11-2012-0800.
- [440] E. Mu ve H. Stern, "A contingent/assimilation framework for public interorganizational systems decisions: should the city of Pittsburgh and allegheny county consolidate information technology services?", *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, c. 17, sy 06, ss. 1611-1658, Kas. 2018, doi: 10.1142/S0219622018420014.
- [441] J. Fedorowicz, J. L. Gogan, ve C. B. Williams, "A collaborative network for first responders: Lessons from the CapWIN case", *Gov. Inf. Q.*, c. 24, sy 4, ss. 785-807, Eki. 2007, doi: 10.1016/j.giq.2007.06.001.
- [442] M. W. Lawless ve R. A. Moore, "Interorganizational systems in public service delivery: a new application of the dynamic network framework", *Hum. Relat.*, c. 42, sy 12, ss. 1167-1184, 1989.

- [443] S. S. Feldman, B. L. Schooley, ve G. P. Bhavsar, “Health information exchange implementation: lessons learned and critical success factors from a case study”, *JMIR Med. Inform.*, c. 2, sy 2, s. e3455, Ağu. 2014, doi: 10.2196/medinform.3455.
- [444] J. L. Gogan, R. J. Baxter, M. J. Garfield, ve C. Usoff, “Pilot-testing inter-organizational systems to reveal relational feasibility issues”, *Eng. Manag. J.*, c. 23, sy 3, ss. 22-25, Eyl. 2011, doi: 10.1080/10429247.2011.11431904.
- [445] M. Ali ve S. Kurnia, “Inter-organizational systems (IOS) adoption in the Arabian Gulf region: the case of the Bahraini grocery industry”, *Inf. Technol. Dev.*, c. 17, sy 4, ss. 253-267, Eki. 2011, doi: 10.1080/02681102.2011.561278.
- [446] D. R. Chandra ve J. Van Hillegersberg, “Governance of inter-organizational systems: a longitudinal case study of Rotterdam’s Port Community System”, *Int. J. Inf. Syst. Proj. Manag.*, c. 6, sy 2, ss. 47-68, Oca. 2022, doi: 10.12821/ijispm060203.
- [447] D. D. Lee, W. Y. C. Wang, ve P. Leong, “An explanatory case study on passenger service systems adoption: A Taiwanese air carrier”, *Pac. Asia J. Assoc. Inf. Syst.*, ss. 25-64, 2019, doi: 10.17705/1pais.11102.
- [448] G. O. Wiredu, “The implementation of G2B inter-organizational information systems: A dialectical design perspective”, *Afr. J. Inf. Syst.*, c. 4, sy 4, ss. 137-157, 2012.
- [449] Z. Ahmed, U. Kumar, ve V. Kumar, “Managing critical success factors for IS implementation: A stakeholder engagement and control perspective”, *Can. J. Adm. Sci. Rev. Can. Sci. Adm.*, c. 35, sy 3, ss. 403-418, Eyl. 2018, doi: 10.1002/cjas.1441.
- [450] A. Briggs ve L. Brooks, “Electronic payment systems development in a developing country: The role of institutional arrangements”, *Electron. J. Inf. Syst. Dev. Ctries.*, c. 49, sy 1, ss. 1-16, Kas. 2011, doi: 10.1002/j.1681-4835.2011.tb00347.x.
- [451] G. Piccoli, M. K. Brohman, R. T. Watson, ve A. Parasuraman, “Process completeness: Strategies for aligning service systems with customers’ service needs”, *Bus. Horiz.*, c. 52, sy 4, ss. 367-376, Tem. 2009, doi: 10.1016/j.bushor.2009.03.001.
- [452] J. Fedorowicz vd., “Design observations for interagency collaboration”, *Gov. Inf. Q.*, c. 31, sy 2, ss. 302-316, Nis. 2014, doi: 10.1016/j.giq.2013.11.006.
- [453] T. Van Den Broek ve A. F. Van Veenstra, “Governance of big data collaborations: How to balance regulatory compliance and disruptive innovation”, *Technol. Forecast. Soc. Change*, c. 129, ss. 330-338, Nis. 2018, doi: 10.1016/j.techfore.2017.09.040.
- [454] S. Sawyer, R. Schrier, J. Fedorowicz, M. Dias, C. Williams, ve M. Tyworth, “U.S. public safety networks: Architectural patterns and performance”, *Inf. Polity*, c. 18, sy 2, ss. 139-156, May. 2013, doi: 10.3233/IP-130305.
- [455] S. Thrane, “The complexity of management accounting change: Bifurcation and oscillation in schizophrenic inter-organisational systems”, *Manag. Account. Res.*, c. 18, sy 2, ss. 248-272, Haz. 2007, doi: 10.1016/j.mar.2007.03.004.
- [456] E. Penttinen ve T. Rinta-Kahila, “Onboarding customer companies to electronic invoicing platform – developing a marketing and a partnering strategy for Tieto, an e-invoicing service provider”, *J. Inf. Technol. Teach. Cases*, c. 7, sy 1, ss. 43-50, May. 2017, doi: 10.1057/s41266-016-0015-x.
- [457] S. V. Gudmundsson, “A Global Electronic Market (GEM) for logistics services and supply-chain management: the expert view”, *World Rev. Intermodal Transp. Res.*, c. 1, sy 1, s. 3, 2006, doi: 10.1504/WRITR.2006.011148.
- [458] J. Rooney ve Y. Cao, “Outsourced supply chains as a complex adaptive system”, *Meditari Account. Res.*, c. 27, sy 2, ss. 170-195, Nis. 2019, doi: 10.1108/MEDAR-02-2018-0296.
- [459] I. Bose, H. Liu, ve A. Ye, “Implementation of an interorganizational system: The case of medical insurance e-clearance”, *J. Inf. Syst. Educ.*, c. 23, sy 1, ss. 29-39, 2012.
- [460] J. Fedorowicz vd., “Modelling physical barriers to interorganisational system implementation success”, *Int. J. Inf. Technol. Manag.*, c. 9, sy 4, s. 365, 2010, doi: 10.1504/IJITM.2010.035460.
- [461] F. Wang, S. K. Chou, ve B. Lin, “Developing fully functional e-healthcare information systems: a four-stage framework”, *Electron. Gov. Int. J.*, c. 3, sy 3, s. 256, 2006, doi: 10.1504/EG.2006.010409.
- [462] D.-H. Shin, “Inter-institutional communications and process innovation: inter-institutional system and collaborative work process”, *J. Comput. Inf. Technol.*, c. 12, sy 1, s. 55, 2004, doi: 10.2498/cit.2004.01.05.
- [463] S. Elliot ve C. Loebbecke, “Interactive, inter-organizational innovations in electronic commerce”, *Inf. Technol. People*, c. 13, sy 1, ss. 46-67, Mar. 2000, doi: 10.1108/09593840010312753.
- [464] S. R. Croom ve A. Brandon-Jones, “Key issues in e-procurement: procurement implementation and operation in the public sector”, *J. PUBLIC Procure.*, c. 5, sy 3, ss. 367-387, 2005.

- [465] P. Finnegan, R. D. Galliers, ve P. Powell, “Applying triple loop learning to planning electronic trading systems”, *Inf. Technol. People*, c. 16, sy 4, ss. 461-483, Ara. 2003, doi: 10.1108/09593840310509662.
- [466] M. Hughes, W. Golden, ve P. Powell, “Inter-organisational ICT systems: the way to innovative practice for SMEs?”, *J. Small Bus. Enterp. Dev.*, c. 10, sy 3, ss. 277-286, Eyl. 2003, doi: 10.1108/14626000310489754.
- [467] M. Fahy, J. Feller, P. Finnegan, ve C. Murphy, “Complexity and context: emerging forms of collaborative inter-organizational systems”, *J. Inf. Technol. Theory Appl.*, c. 8, sy 4, ss. 1-19, 2007.
- [468] I. K. W. Lai, “The strategic changes by adopting internet-based interorganizational systems”, *Manag. Res. News*, c. 30, sy 7, ss. 495-509, Haz. 2007, doi: 10.1108/01409170710759711.
- [469] A. Singh ve J. T. C. Teng, “Enhancing supply chain outcomes through information technology and trust”, *Comput. Hum. Behav.*, c. 54, ss. 290-300, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.chb.2015.07.051.
- [470] M. P. V. De Oliveira, K. McCormack, M. Bronzo Ladeira, P. Trkman, ve J. Van Den Bergh, “Supply chain process collaboration and internet utilization: an international perspective of business to business relationships”, *Econ. Bus. Rev.*, c. 13, sy 4, Ara. 2011, doi: 10.15458/2335-4216.1223.
- [471] C. Yılmaz ve E. Tümtürk, “Kurumlar-arası sistem kullanımının işletme performansı üzerindeki etkisinde tedarik zinciri işbirliğinin aracılık rolünün analizi: Türk inşaat sektöründe bir uygulama”, *Önetim Ve Ekon. Celal Bayar Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, c. 23, sy 1, Nis. 2016, doi: 10.18657/yeabu.65228.
- [472] H. İ. Yazgan ve M. S. Yıldız, “Bilgi sistemleri stratejilerinin tedarik zinciri performansına etkisi: ihracat yapan işletmeler üzerine bir araştırma”, *J. Int. Soc. Res.*, c. 10, sy 52, ss. 1260-1277, Eki. 2017, doi: 10.17719/jisr.2017.1978.
- [473] H.-F. Lin, “Understanding the determinants of electronic supply chain management system adoption: Using the technology–organization–environment framework”, *Technol. Forecast. Soc. Change*, c. 86, ss. 80-92, Tem. 2014, doi: 10.1016/j.techfore.2013.09.001.
- [474] Y. Wang ve X. Shi, “Thrive, not just survive: enhance dynamic capabilities of SMEs through IS competence”, *J. Syst. Inf. Technol.*, c. 13, sy 2, ss. 200-222, May. 2011, doi: 10.1108/13287261111136016.
- [475] R. Bi, R. Davidson, B. Kam, ve K. Smyrnios, “Developing organizational agility through IT and supply chain capability”, *J. Glob. Inf. Manag.*, c. 21, sy 4, ss. 38-55, Eki. 2013, doi: 10.4018/jgim.2013100103.
- [476] R. E. Spekman, J. W. Kamauff, ve N. Myhr, “An empirical investigation into supply chain management: a perspective on partnerships”, *Supply Chain Manag.*, c. 3, sy 2, ss. 53-67, 1998.
- [477] D. Kim, T. Cavusgil, ve R. J. Calantone, “Information system innovations and supply chain management: channel relationships and firm performance”, *J. Acad. Mark. Sci.*, c. 34, sy 1, ss. 40-54, Oca. 2006, doi: 10.1177/0092070305281619.
- [478] M. Kumar ve M. Sareen, “Environment related issues”, içinde *Trust and technology in B2B e-commerce: practices and strategies for assurance*, içinde Advances in Electronic Commerce. , IGI Global, 2012. doi: 10.4018/978-1-61350-353-9.
- [479] M. Kumar ve M. Sareen, “Trust related technology practices”, içinde *Trust and technology in B2B e-commerce: practices and strategies for assurance*, içinde Advances in Electronic Commerce. , IGI Global, 2012. doi: 10.4018/978-1-61350-353-9.
- [480] E. Daniel, “An exploration of the inside-out model: e-commerce integration in UK SMEs”, *J. Small Bus. Enterp. Dev.*, c. 10, sy 3, ss. 233-249, Eyl. 2003, doi: 10.1108/14626000310489691.
- [481] W. Golden ve P. Powell, “Inter-organisational information systems as enablers of organisational flexibility”, *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, c. 16, sy 3, ss. 299-325, Eyl. 2004, doi: 10.1080/0953732042000251115.
- [482] Y. Benslimane, L. M. Cysneiros, ve B. Bahli, “Assessing critical functional and non-functional requirements for web-based procurement systems: a comprehensive survey”, *Requir. Eng.*, c. 12, sy 3, ss. 191-198, Tem. 2007, doi: 10.1007/s00766-007-0050-4.
- [483] Y.-M. Hwang ve J.-J. Rho, “Strategic value of RFID for inter-firm supply chain networks: An empirical study from a resource and social capital perspective”, *Inf. Dev.*, c. 32, sy 3, ss. 509-526, Haz. 2016, doi: 10.1177/0266666914556910.
- [484] M. Seth, D. P. Goyal, ve R. Kiran, “Development of a model for successful implementation of supply chain management information system in Indian automotive industry”, *Vis. J. Bus. Perspect.*, c. 19, sy 3, ss. 248-262, Eyl. 2015, doi: 10.1177/0972262915599465.

- [485] C. Dubelaar, A. Sohal, ve V. Savic, “Benefits, impediments and critical success factors in B2C E-business adoption”, *Technovation*, c. 25, sy 11, ss. 1251-1262, Kas. 2005, doi: 10.1016/j.technovation.2004.08.004.
- [486] W. Lee, P. Aggarwal, H. Shin, T. Cha, ve S. Kim, “A Typology of interorganizational relationships: a marriage, a fling, or something in between”, *Int. J. E-Bus. Res.*, c. 2, sy 2, ss. 1-21, 2006.
- [487] J. Järveläinen, “Information security and business continuity management in interorganizational IT relationships”, *Inf. Manag. Comput. Secur.*, c. 20, sy 5, ss. 332-349, Kas. 2012, doi: 10.1108/09685221211286511.
- [488] B. C. Williams, K. L. Hood, J. Chen, ve P. O. Russell, “Understanding changes in systems, accounting and auditing: the impact of EDI”, *Manag. Audit. J.*, c. 12, sy 6, ss. 298-304, Ağu. 1997, doi: 10.1108/02686909710180652.
- [489] P. Ratnasingam, “Trust and business-to-business e-commerce communications and performance”, *Eval. Mark. Actions Outcomes*, ss. 359-434, 2015.
- [490] H. Boeck ve S. F. Wamba, “RFID and buyer-seller relationships in the retail supply chain”, *Int. J. Retail Distrib. Manag.*, c. 36, sy 6, ss. 433-460, May. 2008, doi: 10.1108/09590550810873929.
- [491] A. Kaushik, “Interorganisational systems in an automotive supply network: the Indian case of Maruti Udyog”, *Int. J. Automot. Technol. Manag.*, c. 9, sy 4, ss. 394-414, 2009, doi: 10.1504/IJATM.2009.028526.
- [492] W. Golden ve P. Powell, “Exploring inter-organisational systems and flexibility in Ireland: a case of two value chains”, *Int. J. Agile Manag. Syst.*, c. 1, sy 3, ss. 169-176, Ara. 1999, doi: 10.1108/14654659910296544.
- [493] S. Croom ve R. Johnston, “E-service: enhancing internal customer service through e-procurement”, *Int. J. Serv. Ind. Manag.*, c. 14, sy 5, ss. 539-555, Ara. 2003, doi: 10.1108/09564230310500219.
- [494] T. O’Toole, “E-relationships – emergence and the small firm”, *Mark. Intell. Plan.*, c. 21, sy 2, ss. 115-122, Nis. 2003, doi: 10.1108/02634500310465434.
- [495] R. Rajaguru ve M. J. Matanda, “Role of inter-organisational compatibility and IOIS integration in large firms and SMEs retailing chains”, *Asia Pac. J. Mark. Logist.*, c. 23, sy 2, ss. 177-199, Mar. 2011, doi: 10.1108/13555851111120489.
- [496] Tornatzky, L.G., Eveland, J., ve Fleischer, M., “Technological innovation as a process”, içinde *Technological Innovation as a Process*, Lexington Books, 1990.
- [497] J. D. Bryan ve T. Zuva, “A review on TAM and TOE framework progression and how these models integrate”, *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, c. 6, sy 3, ss. 137-145, May. 2021, doi: 10.25046/aj060316.
- [498] S. V. Grabski, S. A. Leech, ve P. J. Schmidt, “A review of ERP research: A future agenda for accounting information systems”, *J. Inf. Syst.*, c. 25, sy 1, ss. 37-78, Mar. 2011, doi: 10.2308/jis.2011.25.1.37.
- [499] K. Bouchbout ve Z. Alimazighi, “A framework for identifying the critical factors affecting the decision to adopt and use inter-organizational information systems”, 2008.
- [500] N. Janom ve M. S. Zakaria, “The development of B2B e-commerce readiness assessment model for SMEs: identification of barriers using AHP method”, *Int. J. Inf. Sci. Manag.*, ss. 61-75, 2010.
- [501] J. P. Glaser ve H. G. Lo, “Concepts for building inter-organizational systems in healthcare: lessons from other industries”, *J. Healthc. Inf. Manag.*, c. 20, sy 3, ss. 54-62, 2006.
- [502] S.-W. Lin, H.-P. Fu, ve A. J. Lin, “Critical success factors and implementation strategies for B2B electronic procurement systems in the travel industry”, *J. Hosp. Tour. Technol.*, c. 14, sy 4, ss. 505-522, Ağu. 2023, doi: 10.1108/JHTT-08-2021-0230.
- [503] F. G. Goethals, J. Vandenbulcke, W. Lemahieu, ve M. Snoeck, “Structuring the development of inter-organizational systems”, içinde *Web Information Systems – WISE 2004*, c. 3306, X. Zhou, S. Su, M. P. Papazoglou, M. E. Orłowska, ve K. Jeffery, Ed., içinde *Lecture notes in computer science*, vol. 3306, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, ss. 454-465. doi: 10.1007/978-3-540-30480-7_47.
- [504] D. L. Bryan ve M. E. O’Kelly, “Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review”, *J. Reg. Sci.*, c. 39, sy 2, ss. 275-295, May. 1999, doi: 10.1111/1467-9787.00134.
- [505] F. Sağkan ve İ. M. Başaran, “Tedarik zinciri dayanıklılığı ve tedarik zinciri esnekliği: değişen kurumsal değer yaklaşımları perspektifinden bir yazın taraması”, *Strat. Önetim Araştırmaları Derg.*, c. 7, sy 2, ss. 84-141, Eyl. 2024, doi: 10.54993/syad.1449614.

Özgeçmiş**Aykan UNCU**

1993 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi İİBF İşletme bölümünde, yüksek lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalı Yönetim ve Organizasyon programında tamamlamıştır. Şu an Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalı İşletme doktora programına kayıtlıdır. İlgi alanına giren araştırma konuları, tedarik zinciri entegrasyonu, iş birlikleri, organizasyonlar arası sistemler ve bu sistemlerin entegrasyon amaçlı kullanımı olarak sıralanabilmektedir.

E-Posta: uncuaykan@eposta.com

**İbrahim Müjdat BAŞARAN**

1997 yılında TCDD Meslek Lisesinden mezun olmuştur. Kocaeli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi İşletme ve Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği bölümlerinden Lisans dereceleri almıştır. Mali Hukuk Alanında Yüksek Lisans; Yönetim ve Organizasyon alanında Doktora derecesine sahip olan Başaran, TCDD bünyesinde yürütmekte olduğu SAP uzmanlığı görevinden 2015 yılında ayrılmıştır. Bu tarihten bu yana Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi İşletme Bölümünde Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: imbasaran@beun.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Aykan UNCU: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Tarama. İbrahim Müjdat BAŞARAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Tarama.