

ISSN : 1305-7820
E-ISSN : 2587-165X

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

Yıl:20 **Sayı:39** **2021-Bahar**
Year:20 **Vol:39** **2021-Spring**

Istanbul Commerce University
Journal of Science

ISSN : 1305-7820
E-ISSN: 2587-165X



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

DERGİSİ

Yıl: 20

Sayı: 39

Bahar 2021

Year: 20

Volume: 39

Spring 2021

Istanbul Commerce University
Journal of Science



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

<http://dergipark.gov.tr/ticaretfbd>



İstanbul Ticaret Üniversitesi Adına Sahibi <i>Owner on behalf of İstanbul Commerce University</i>	Prof. Dr. Yücel OĞURLU <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi Rektörü İstanbul Commerce University Rector</i>
Yayın Kurulu <i>Editorial Board</i>	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Prof. Dr. Abdül Halim ZAIM <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Prof. Dr. Muammer KALYON <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Dr. Öğr. Üyesi Muhammet CEYLAN <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Editör <i>Editor</i>	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Yardımcı Editör <i>Assistant Editor</i>	Arş. Gör. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Fen Bilimleri Alan Editörü <i>Associate (Science) Editor</i>	Prof. Dr. Doğan KAYA <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Mühendislik Alan Editörü <i>Associate (Engineering) Editor</i>	Dr. Öğr. Üyesi Muhammet CEYLAN <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Dil Editörü <i>Language Editor</i>	Arş. Gör. Elif NURAY YILDIRIM <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü <i>Publishing Manager</i>	Yasin DEMİRBAŞ <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Yönetim Yeri <i>Head Office</i>	İstanbul Ticaret Üniversitesi / İstanbul Commerce University
Yazışma Adresi <i>Corresponding Address</i>	Küçükyalı E-5 Kavşağı, İnönü Cad. No: 4 Küçükyalı-34840 İstanbul-TÜRKİYE Tel: 0 216 444 0 413 (3141) e-posta: fendergi@ticaret.edu.tr
İnternet Adresi <i>Web Address</i>	https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbd
Yayın Türü <i>Publication Type</i>	Yerel Süreli / <i>Periodical</i> Yılda iki sayı yayımlanır: Bahar (Haziran) ve Güz (Aralık) <i>Two issues per year: Spring (June) and Fall (December)</i>
Yayın Dili <i>Publication Language</i>	Türkçe ve İngilizce <i>Turkish and English</i>
Online Yayınlanmaktadır <i>Published Online</i>	ISSN : 1305-7820 E-ISSN : 2587-165X
Derginin Tarandığı Kaynaklar	

Danışma Kurulu <i>Advisory Board</i>	Prof. Dr. Abdül Halim ZAIM	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Adnan ÇALIK	Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye
	Prof. Dr. Ahmet Şükrü ÖZDEMİR	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Ali FARAJZADEH	Razi Üniversitesi, Kermanshah, İran
	Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Aslan GÜLCÜ	Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye
	Prof. Dr. A. Göksel AĞARGÜN	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. A. Işık AYDEMİR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Bilal BİLALOV	Azerbaycan Milli İlimler Akademisi, Bakü, Azerbaycan
	Prof. Dr. Betül SAF	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Doğan KAYA	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Emrah Evren KARA	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
	Prof. Dr. Fahreddin ABDULLAYEV	Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye
	Prof. Dr. Farman MAMEDOV	Azerbaycan Milli İlimler Akademisi, Bakü, Azerbaycan
	Prof. Dr. Fatih NURAY	Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye
	Prof. Dr. Habip DAYIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Harun POLAT	Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye
	Prof. Dr. Hasan GENÇ	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye
	Prof. Dr. Heybetkulu S. MUSTAFAYEV	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye
	Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İbrahim BAZ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İdris KABALCI	Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye
	Prof. Dr. İdris OĞURLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İsmail DEMİR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İsmail KÜÇÜK	İstanbul Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İsmail KÖMBE	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Kemal VAROL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mehmet AKBABA	Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye
	Prof. Dr. Metin BAŞARIR	Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
	Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mikail ET	Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
	Prof. Dr. Muammer KALYON	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Murat KOCA	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye
	Prof. Dr. Murat SARI	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mustafa ILICALI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mustafa KURT	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Münevver TURANLI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. M. Emin ÖZDEMİR	Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye
	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Nigar MERDAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Oğuz BORAT	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Orhan İÇELLİ	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Osman YAZICIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Özlem DENİZ BAŞAR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Prof. Dr. Qamrul Hasan ANSARI	Aligarh Muslim University, Aligarh, India	
Prof. Dr. Rifat YAZICI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. S. Ahmet OYMAK	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. Seyit TEMİR	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye	
Prof. Dr. Sibkat KAÇTIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. Temel KOTİL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. Ünal Halit ÖZDEN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. Vagif GULİYEV	Bakü Devlet Üniversitesi, Bakü, Azerbaycan	
Prof. Dr. Vatan KARAKAYA	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye	
Prof. Dr. Yasin ÜST	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Ali Osman KUŞAKÇI	İbn Haldun Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Asif YOKUŞ	Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye	

Danışma Kurulu <i>Advisory Board</i>	Doç. Dr. Berk AYVAZ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Faik GÜRSOY	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye
	Doç. Dr. Fatma Serab ONURSAL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Fuat USTA	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
	Doç. Dr. Halit ÖZEN	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. İbrahim DEMİR	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Kadri DOĞAN	Artvin Çoruh Üniversitesi
	Doç. Dr. Merve İLKHAN	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
	Doç. Dr. Murat KİRİŞÇİ	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Müzeyyen ERTÜRK	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye
	Doç. Dr. Özgür YILDIRIM	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Seda BAĞDATLI KALKAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Serhan YARKAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Yunus ATALAN	Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye
	Doç. Dr. Yusuf ZEREN	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah YENER	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Ali BOYACI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Amer ALSHAHA	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Arzu KAKIŞIM	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Burhan SATICI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Çınar NARTER	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Emel Ş. K.ÇİFTBUDAK	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi E. Başar BAYLAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZTÜRK	İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Fernaz ÖNCEL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Feyza M.HAFIZOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Fuat Ali PAKER	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Irmak BAYBURTLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Leyla SURİ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Metin TURAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi Muhammet CEYLAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Dr. Öğr. Üyesi M. Cem KASAPBAŞI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Dr. Öğr. Üyesi M. Alper ÖZPINAR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Dr. Öğr. Üyesi Nour El H.BOUZARA	Uni. Sci. Tec. Houari Boumediene, Algiers, Algeria	
Dr. Öğr. Üyesi Özdemir SÖNMEZ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Dr. Öğr. Üyesi Pınar Ö. DEMİRTAŞ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAVAS	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Dr. Öğr. Üyesi Yalçın EYİGÜN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	

39. Sayı HAKEM LİSTESİ / REVIEWER LIST

Prof. Dr. Ali ATAHAN	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet BECERİR	Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Prof. Dr. Sıbrat KAÇTIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Emre PUSANE	Boğaziçi Üniversitesi
Doç. Dr. Berk AYVAZ	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Doç. Dr. Indrit MYDERRIZI	İstanbul Gelişim Üniversitesi
Doç. Dr. Serpil KORAL KOÇ	Uludağ Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR	Marmara Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emine Elif NEBATİ	İstanbul Sebahattin Zaim Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Enver Cenani İNCE	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÜNDOĞAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZTÜRK	İstanbul Medeniyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İlker ÜSTOĞLU	İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Cem KASAPBAŞI	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Leyla SURİ	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAVAS	İstanbul Ticaret Üniversitesi

EDİTÖRDEN

Değerli İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Okurları,

Dergimizin 20. yılına girmişken, 2021 Bahar döneminde yayınlanan 39. sayıyı değerli okurlara ulaştırmaktan onur duymaktayız.

Dergimizin bu sayısında Endüstri Mühendisliği, Mekatronik Mühendisliği, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İnşaat Mühendisliği, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İş Sağlığı ve Güvenliği ve Tekstil Mühendisliği alanlarından sekiz makaleyi siz okurlarımızın istifadesine sunmaktan mutluyuz.

Bu sayıda, üniversitemiz içinden ve dışından çalışmalarını bizim aracılığımızla okuyucularıyla paylaşan yazarlarımıza, makalelerin hakemlik süreçlerine itinalı çalışmaları ile katkıda bulunan değerli akademisyenlere ve derginin hazırlanmasında emeği geçen çalışma arkadaşlarımıza teşekkürlerimizi sunarız.

39. sayının fen bilimleri alanında değindiği konulara farklı ve güncel bakış açıları kazandırmasını temenni eder, bir sonraki sayıda okuyucularımızla buluşmayı dileriz.

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Fen Bilimleri Dergisi Editörü

EDITORIAL POST

Dear Istanbul Commerce University Journal of Science Readers,

In the 20th year of our journal, we are honored to share with you our esteemed readers the 39th issue of the Spring 2021 edition.

In this issue, we are pleased to present eight articles from the fields of Industrial Engineering, Mechatronics Engineering, Urban Systems and Transport Management, Civil Engineering, Electronics and Communication Engineering, Occupational Health and Safety and Textile Engineering to the readers.

We present our thanks to our writers who share their work with our readers through our university and our colleagues who have contributed to the preparation of the magazine and the valuable academicians who contributed to their studies.

We hope that the issue will give you different and actual insights into the subjects of science. Hope to meet to the reader with the next issue on Fall.

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Editor

YAYIN POLİTİKASI

Dergimizde yazarların çalışmalarını makale olarak yayımlamaları, okuyucuların makale okumaları ve indirmeleri ücretsizdir. Aynı şekilde hakem değerlendirmesi ve yayımlanma sürecinde de ücret talep edilmemektedir. Dergimizin tüm sayılarına <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbd> adresinden ulaşılabilir.

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilen makaleler, benzerlik kontrol yazılımı olan i-Thenticate ile kontrol edilir. Çift-körleme hakem değerlendirme sürecine sadece benzerlik oranı \leq % 25 makaleler alınır. Kaynakların tekil bazda benzerlik oranı \leq % 4 olmalıdır. Bu durumda değilse yazar/lar'dan makalenin tekrar revize edilerek yüklenmesi istenir. Benzerlik oranı % 25'den yüksekse, başvuru reddedilir.

Dergimize gönderilen makaleler için değerlendirme aşamaları aşağıdaki gibidir;

1. Makale Ön İncelemeye alınır;

- Makalenin yazım formatı incelenir ve i-Thenticate programı ile benzerlik taraması yapılır.
- Makalenin örnek makale şablonuna uygunluğu kontrol edilir.
- Şablona uymayan makaleler yazara bildirilir ve makalenin düzeltilmesi istenir.
- Makale sunum ve telif hakkı devir formu bilgilerinin kontrolü yapılır.

2. Makale Değerlendirme aşamasına geçer.

- Dergimiz makale değerlendirme sürecinde hakem ve yazarlar birbirlerinin bilgilerini göremediği çift-körleme hakemlik sistemini kullanmaktadır.
- Makaleye en az iki hakem ataması yapılır. Hakemlere değerlendirme için 21 gün süre tanınır. Değerlendirme süreci tamamlanmazsa ek 7 gün süre verilir.
- Makalenin sonucu ret, düzeltme ya da kabul olabilir. Sonuca göre aşağıdaki madde/maddeler uygulanır:
 - Hakem görüşlerinin çoğunluğu doğrultusunda makale ret edilmişse süreç sonlandırılır ve makale reddedilir. Eşitlik durumu söz konusu ise üçüncü hakem ataması yapılır.
 - Makale için düzeltme istenirse hakem görüşleri doğrultusunda yazarın düzeltmeleri yapması istenir.
 - Makale kabul alırsa düzenleme aşamasına geçilir.

3. Mizanpaj aşamasında, düzeltmeler gerekirse yazardan istenir.

4. Süreç tamamlanır ve yazara bilgilendirme mesajı gönderilir.

Makale kabul süreci ortalama 3 ay sürmektedir.

İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Budapeşte Açık Erişim Girişimi'ne bağlı kalır ve Açık Erişim politikasını orijinal BOAI'da geliştirilen tanıma göre tanımlar:

Açık Erişim, “Hakem denetimli bilimsel literatürün, internet aracılığıyla; finansal, yasal ve teknik engeller olmaksızın, erişilebilir, okunabilir, kaydedilebilir, kopyalanabilir, yazdırılabilir, taranabilir, tam metne bağlantı verilebilir, dizinlenebilir, yazılıma veri olarak aktarılabilir ve her türlü yasal amaç için kullanılabilir olması”dır. [Bknz, <https://www.budapestopenaccessinitiative.org/translations/turkish-translation>]

PUBLICATION POLICY

In our journal, it is free for authors to publish their works as articles, and for readers to read and download articles. Likewise, no fee is charged during the referee evaluation and publication process. All issues of our journal can be accessed at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbd>.

Articles sent to our journal for publication are checked with i-Thenticate, a similarity checking software. Only articles with a similarity rate $\leq 25\%$ are included in the double-blind peer-review process. The similarity rate of the sources on a singular basis should be $\leq 4\%$. If this is not the case, the author/s are requested to revise and upload the article again. If the similarity rate is higher than 25%, the application is rejected.

The evaluation stages for the articles sent to our journal are as follows;

1. The article is taken to Preliminary Review;
 - The format of manuscript is checked and i-Thenticate programme is used for the plagiarism.
 - Compliance of the article with the sample article template is checked.
 - Articles that do not fit the template are reported to the author and the article is requested to be corrected.
 - Article presentation and copyright transfer form information is checked.
2. The article goes to the evaluation stage.
 - The journal has double-blind peer-review system in which the referees and authors cannot see each other's information in the article review process.
 - At least two referees are assigned to the article. Referees are given 21 days for review. If the evaluation process is not completed, an additional 7 days is given.
 - Conclusion to the article can be rejection, correction or acceptance. According to the result, the following article/s are applied:
 - If the article is rejected in line with the majority of the referee's opinions, the process is terminated and the article is rejected. In case of equality, the 3rd referee is appointed.
 - If corrections are requested for the article, the author is requested to make them in line with the referee's comments.
 - If the article is accepted, it goes to the editing stage.
3. At the layout stage, if some corrections needed, it is requested from the author.
4. The process is completed and a notification message is sent to the author.

The article review process is almost 3 months.

Istanbul Commerce University Journal of Sciences adheres to the Budapest Open Access Initiative and defines Open Access policy according to the definition developed in the original BOAI:

By "open access" to peer-reviewed scientific literature, we mean its free availability on the public internet, permitting any users to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of these articles, crawl them for indexing, pass them as data to software, or use them for any other lawful purpose, without financial, legal, or technical barriers other than those inseparable from gaining access to the internet itself. [See, <https://www.budapestopenaccessinitiative.org/read>]



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

- BİTKİSEL TARIM ETKİNLİĞİNİN VERİ ZARFLAMA ANALİZİ İLE ÖLÇÜMÜ: TÜRKİYE'DE İL DÜZEYİNDE BİR ÇALIŞMA** 1
MEASUREMENT OF HERBAL AGRICULTURAL EFFICIENCY WITH DATA ENVELOPMENT ANALYSIS: A CASE STUDY AT PROVINCIAL LEVEL IN TURKEY
Betül IŞIK AYDIN, Oğuz BORAT

Mechatronics Engineering / Mekatronik Mühendisliği

- ALTITUDE-HOLD FLIGHT CONTROL SYSTEM DESIGN FOR LONGITUDINAL MOTION** 19
UZUNLAMASINA HAREKET KAPSAMINDA İRTİFA KİLİTLEME UÇUŞ KONTROL SİSTEMİ TASARIMI
Ahmet Hulusi ÖZ, Muammer KALYON

- ESTIMATING DOMINANT PARAMETERS OF AIRCRAFT LINEAR DYNAMICAL MODEL VIA LEAST SQUARE METHOD** 35
EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ İLE DOĞRUSAL DİNAMİK UÇAK MODELİNİN DOMİNANT PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ
Mehmet ŞAHİN, Muammer KALYON

Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi / Urban Systems and Transport Management

- TRAMVAY SİSTEMLERİNDE KATENERSİZ ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE KATENERLİ SİSTEMLER İLE KIYASLANMASI** 57
EXAMINATION OF CATENARY-FREE SOLUTIONS IN TRAM SYSTEMS AND COMPARISON WITH CATENARY SYSTEMS SPECIFIC TO İSTANBUL
Alper Yavuz BAHADİROĞLU, Yalçın EYİĞÜN

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- İSTANBUL TOPLU TAŞIMA SİSTEM ALGISININ MEVCUT VE SANAL TERCİHLER ÇERÇEVESİNDE LOJİT MODEL İLE İNCELENMESİ** 96
INVESTIGATION OF THE İSTANBUL PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEM PERCEPTION WITH THE LOGIT MODEL WITHIN THE FRAMEWORK OF REVEALED AND STATED PREFERENCES
Mahmut Esad ERGİN, Hüseyin Onur TEZCAN

- Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği / Electronics and Communication Engineering**
VERİLOG İLE TAUSWORTHE DENKLEMİNE DAYANAN YENİ BİR RASTGELE SAYI ÜRETECİ TASARIMI 112
A NEW RANDOM NUMBER GENERATOR DESIGN BASED ON TAUSWORTHE EQUATION WITH VERILOG
Minare HASANBEYLİ, Vedat TAVAS

- İş Sağlığı ve Güvenliği / Occupational Health and Safety**
İTFAİYE İSTASYONLARINDAKİ TEHLİKELERİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE ÖLÇÜLMESİ 127
MEASURING THE HAZARDS IN FIRE STATIONS WITH MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS
Muhammed Ali GÜLEÇ, Berk AYVAZ

Tarama Makaleleri / Review Articles

- Tekstil Mühendisliği / Textile Engineering**
TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE PİGMENTLERİN KULLANIMI VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 146
THE USAGE OF PIGMENTS IN TEXTILE INDUSTRY AND INVESTIGATION OF THEIR EFFECTS ON HUMAN HEALTH
Ashlhan KORUYUCU



Araştırma Makalesi / Research Article

**BİTKİSEL TARIM ETKİNLİĞİNİN VERİ ZARFLAMA ANALİZİ İLE
ÖLÇÜMÜ: TÜRKİYE’DE İL DÜZEYİNDE BİR ÇALIŞMA ***

**MEASUREMENT OF HERBAL AGRICULTURAL EFFICIENCY WITH DATA
ENVELOPMENT ANALYSIS: A CASE STUDY AT PROVINCIAL LEVEL IN TURKEY**

Betül İŞİK AYDIN¹

Oğuz BORAT²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
betulisik@yandex.com

Geliş Tarihi / Received
28.05.2020

Kabul Tarihi / Accepted
06.08.2020

Öz

Veri Zarflama Analizi; etkinlik, verimlilik veya performans terimlerinin hızla önem kazandığı her alanda aklı gelen ilk yöntemlerden biridir. Bu makalede, tarım sektöründe Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılarak 2019 yılına ait etkinlik ölçümü yapılmıştır. Çalışmada Türkiye’de bitkisel üretim hasılası yüksek olan 20 il ele alınmıştır. Girdi olarak ‘İşlenen Tarım Alanı’, ‘Tarımsal Mekanizasyon’, ‘Tarımsal Sulamada Kullanılan Enerji’ ve ‘Gübre Tüketimi’ verileri kullanılmıştır. Çıktı olarak ise ‘Sebze Meyve Üretim’ ve ‘Tahıl ve Diğer Bitkisel Üretim’ verileri kullanılmıştır. Sonuçta göre; CCR Model çözümünde 11 tane il ‘etkin’, 9 tane il ‘etkinsiz’, BCC Model çözümünde ise 10 tane il ‘etkin’, 10 tane il ise ‘etkinsiz’ bulunmuştur. Çalışmanın sonuç bölümünde illerin etkinlikleri karşılaştırılarak yorumlanmış ve performans iyileştirmeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bitkisel tarım, etkinlik, performans, veri zarflama analizi.

Abstract

Data Envelopment Analysis; is one of methods that come to mind first in every field where the terms efficiency, productivity or performance gain importance. In this paper, relative efficiency is measured by using Data Envelopment Analysis (DAE) for the year of 2019 in the field of herbal agriculture. In this study, Turkey’s 20 different cities were selected according to their agricultural revenues. The data of ‘Processed Agricultural Area’, ‘Agricultural Mechanization’, ‘Energy Used in Agricultural Irrigation’ and ‘Fertilizer Consumption’ were used as input while Vegetable Fruit Production and ‘Grain and Other Crop Production’ were used as output. According to the results; in the CCR Model solution, 11 provinces were “effective”, 9 provinces were “ineffective”, whereas in the BCC Model solution, 10 provinces were “effective” and 10 provinces were found “ineffective”. In the conclusion part of the study, the efficiencies of the provinces were compared, interpreted, then accordingly performance improvements were made.

Keywords: Data envelopment analysis, efficiency, herbal agricultural, performance.

*Bu yayın Betül İŞİK AYDIN isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye.
betulisik@yandex.com, [Orcid.org/0000-0002-7903-5788](https://orcid.org/0000-0002-7903-5788).

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye.
oborat@ticaret.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-2242-6024](https://orcid.org/0000-0002-2242-6024).

1. GİRİŞ

Tarım sektörü ülkelerin gelişmişlik düzeyine bakılmaksızın her toplum ve ülke için önemlidir. Tarım, toplumun besin ve hammadde ihtiyacını karşılamak maksadıyla, bitkisel ve hayvansal varlıkların, biyolojik olarak üretim yeteneklerini planlı ve yönlendirilmiş bir biçimde uygulamaktır (Gürler, 2008). Ülkelerin ve toplumların gelişiminde kilit role sahip olan tarım sektörünün önemi, küreselleşen ekonomik sistem, rekabetin yoğunlaştığı ortamlar ve hızla değişen pazar şartları gibi sebepler nedeniyle giderek artmaktadır.

Türkiye, tarih boyunca çeşitli uygarlıklara ev sahipliği yapmış bir coğrafya üzerinde bulunmaktadır. Bu uygarlıklarda tarımsal faaliyetler, iklimin bölgelere göre çeşitlilik göstermesi ve Anadolu’nun eski bir dünya ticaret merkezlerinden birisi olması sebebiyle, birçok farklı alan ve türde yoğun bir şekilde gerçekleşmiştir (Doğan vd., 2015).

Türkiye’de son yetmiş yıllık sürede, ülke nüfusunda yaklaşık 6 kat artış meydana gelmiştir. 1920’li yıllarda ortalama dört kişiden yalnızca biri kent yaşamı sürdürürken, başka bir ifade ile kentleşme oranı %25 iken, 2010 yılına gelindiği zaman ortalama dört kişiden yalnızca bir kişi kırsal kesimde yaşamını sürdürmektedir, başka bir deyişle kentleşme oranı %75 olarak tespit edilmiştir (Demir ve Çubuk, 2010). Sanayileşme ve kentleşme sonucu ortaya çıkan bu durumlar sebebiyle, tarım sektöründe etkinliğin önemi artmıştır.

Günümüzde işletmelerin ihtiyaç duyduğu kaynakların giderek azalması sebebiyle, eldeki kaynakların etkin kullanılmasının önemi artmıştır. Bu kaynakların hangi derecede etkin kullanılabildiğinin ölçülmesi ve bu etkinliğin artırılabilmesi; benzer sektörde faaliyet gösteren, birbirine yakın üretim girdileriyle, benzer ürünler sunan işletmelerin mukayesesi ile yapılmaktadır. Birden çok girdi ve çıktının mevcut olduğu ve bunların farklı ölçü birimlerine sahip olduğu durumlar için görece olarak etkinlik ölçen Veri Zarflama Analizi diğer yöntemlere nazaran daha fazla tercih edilmektedir (Öztürk, 2009).

Veri zarflama analizi, çok sayıda girdi ve çıktının mukayese edilmesinin güç olduğu durumlarda, üretilen mal veya hizmet açısından birbirine benzer karar birimlerinin görece etkinliklerini ölçmek maksadıyla geliştirilmiş bir doğrusal programlama yöntemidir. Bu konuda gerçekleştirilen ilk araştırma, kâr amacı güzetmeyen kurumların karşılaştırılmalı etkinliklerini ölçebilmek maksadıyla Charnes ve arkadaşları (1978) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu metod, daha sonradan kâr amaçlı mal ve hizmet üreten işletmeler arası görece etkinliğin ölçümünde de uygulanmaya başlanmıştır (Banker, 1992).

Bu çalışmada Türkiye’ye ait tarımsal üretimi en yüksek olan ilk 20 ilin tarımsal etkinlikleri ölçülmüş ve birbirleri arasında mukayese edilmiştir. Çalışmanın örneklemini Türkiye’de yer alan 20 il oluşturmaktadır. Çalışmanın amacı Türkiye’nin bitkisel tarım üretimi yüksek illerinin etkinliklerinin ölçülmesi ve etkin olmayan iller için çeşitli iyileştirmeler sunulmasıdır.

Doğrusal programlama tabanlı, etkinliklerin ölçümünde uygulanan bir yöntem olan Veri Zarflama Analizi (VZA) ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. İşçi (2013), veri zarflama analizi yöntemini uygulayarak, Türkiye’de faaliyet gösteren 25 gıda firmasının görece etkinliklerini ölçmüştür. Çalışma neticesinde, CCR modeline göre 10 firma etkin olarak, BCC modeline göre ise 12 firma etkin olarak tespit edilirken, etkin olmayan firmalar için referans kümeleri bulunmuş ve etkin olmaları için hedefler belirlenmiştir. Baysal vd. (2005), Türkiye’deki 50 devlet üniversitesinin 2014 yılına ait görece etkinliklerini VZA ile ölçmüş ve performanslarını baz alarak 2015 yılı için bütçe tahsislerini sunmuştur. Şahin (2019), Dumlupınar Üniversitesine bağlı 14 meslek yüksekokulunun performansını VZA ile ölçmüştür. Çalışma neticesinde 5 meslek yüksekokulu etkin olarak belirlenmiştir. Şenol vd. (2019), VZA ile OECD ülkelerinin sağlık

göstergelerini kıyaslamıştır. Kıyaslama sonunda verimlilik oranları CCR girdi yönelimli tekniğe göre %85, BCC girdi yönelimli tekniğe göre ise %92 olarak tespit edilmiştir. Kocakalay ve Işık (2003), VZA'nın temel esasları ve uygulama aşamalarını açıklamışlardır. Peyrache vd. (2020), VZA yapılırken en önemli adımlardan birisi olan girdi ve çıktı değişkenlerin seçilmesini incelemiştir. Kedzo ve Lukac (2020), seçili Avrupa ülkelerinde faaliyet gösteren küçük ölçekli gıda ve içecek üreticilerinin finansal etkinliklerini VZA yardımıyla ölçmüşlerdir. Çalışma neticesinde incelenen firmaların yaklaşık %23'ü verimli olarak belirlenmiştir. Top vd. (2020), 36 Afrika ülkesinin sağlık sistemlerinin verimliliklerini ölçmüş ve bu ülkelerinin verimliliklerini birbirleri arasında kıyaslamıştır. Analiz neticesinde 21 (%58.33) ülkenin sağlık sistemi verimli olarak tespit edilmiştir. Mahmoudi vd. (2019), termal elektrik santrallerin performanslarını, karbondioksit salınımı açısından VZA ile ölçmüşlerdir. Khezrimotlagh vd. (2019), VZA'nde çok yüksek sayıda verilerin işlenmesi ile alakalı önerilerde bulunmuşlardır. Yıldırım ve Ayvaz (2019), 15 farklı ülkenin lojistik performanslarını VZA ile ölçmüşlerdir. Bu çalışmalarında etkin ve etkin olmayan ülkeleri belirlemişler, etkin olmayan ülkeler için muhtemel iyileştirme çalışmaları sunmuşlardır.

2. METODOLOJİ

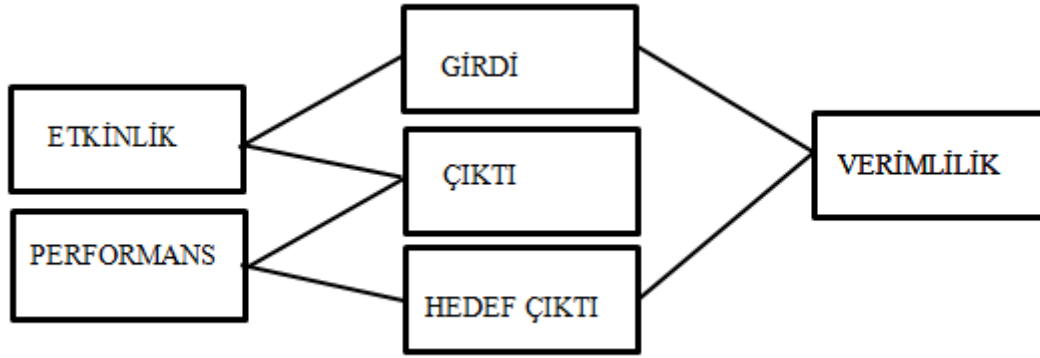
2.1. Verimlilik, Etkinlik ve Performans Kavramları

Verimlilik (productivity), üretim aşamasında kullanılan muhtelif faktörler ile (girdi olarak isimlendirilir) bütün bu üretim aşamalarının sonunda elde edilen nihai ürünler (çıkıtı olarak isimlendirilir) arasında bulunan ilişkiyi ortaya koyar. Bunun yanında israfın en az yapıldığını fakat kaynakların en iyi şekilde kullanıldığını ifade eder (Yükçü ve Atağan, 2009). Verimlilik kavramı teknik olarak, “Verimlilik = $\frac{\text{çıkıtı}}{\text{girdi}}$ ” şeklinde formüle edilir ve “üretilen her türlü mal veya hizmet bileşeninin bu mal veya hizmetleri üretirken kullanılan girdi bileşenine oranı” olarak tanımlanır (Prokopenko, 2005).

Etkinlik (efficiency), bir işletmenin üretim ve hizmet faktörleri için kendisinin önceden ortaya koyduğu amaçlara ulaşıp ulaşılmadığını ve bunların derecesini gösterir. Yani etkinlikte verimlilikten farklı olarak bir amaca ulaşma hedefi vardır ve bu hedefe ne kadar ulaşılabildiği önemlidir (Yükçü ve Atağan, 2009).

Etkinlik kavramı teknik olarak, “Etkinlik = $\frac{\text{gerçekleşen çıkıtı}}{\text{planlanan çıkıtı}}$ ” şeklindedir. Etkinlik değerinin 1 olması optimal durumdur. Etkinlik değeri 1'in üstünde ise hedef üstü performans, etkinlik değeri 1'in altında ise hedefin altında performansa sahip olduğunu göstermektedir (Özbek, 2007).

Performans kelimesi sözlükte “*uygulama, bir görevi tam olarak yerine getirme veya bu görevi başarı ile sonuçlandırabilme gücü*” olarak (Merriam-Webster online, 2020), keza TDK çevrimiçi Güncel Türkçe Sözlük (2020) “performans=başarım, herhangi bir olayı veya durumu başarma isteği ve gücü” olarak tanımlanmaktadır. Etkinlik, performans, girdi, çıkıtı, hedef çıkıtı ve verimlilik ilişkileri Büyükkılıç (2004) tarafından Şekil 1'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 1. Etkinlik, Performans ve Verimlilik İlişkileri (Büyükkılıç, 2004)

Etkinliklerin ölçüm yöntemleri incelendiğinde ise en çok kullanılan üç yöntem şu şekilde açıklanmıştır (Bozdağ vd., 2001).

1. Oran analizi,
2. Parametrel yöntemler,
3. Parametresiz yöntemler.

Bu yöntemlerin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (Karasoy, 2000). Bu tabloda görüldüğü gibi, çalışma için seçilen VZA Modeli; çözüm tekniği matematiksel programlamaya dayanan, çok girdi ve çok çıktı içeren, kullanılan girdi ve çıktıya yönelik detaylı ve dikkatli bir veri temin etme şekline sahip, uygulaması kolay fakat yine diğer ölçüm yöntemlerinden daha detaylı olan ve diğer ölçüm yöntemlerine göre daha geniş bir performans ölçümüne uyan Parametresiz bir yöntemdir.

Tablo 1. Performans Ölçüm Yöntemlerinin Özellikleri (Karasoy, 2000)

ÖZELLİKLER	YÖNTEMLER		
	ORAN ANALİZİ	PARAMETRELİ YÖNTEMLER	PARAMETRESİZ YÖNTEMLER
ÇÖZÜM TEKNİĞİ	Oranlar	Regresyon	Matematik Programlama
İÇERİK	Tek Girdi/Tek Çıktı (Tek Boyutlu)	Çok Girdi/Tek Çıktı (Tek Boyutlu)	Çok Girdi/Çok Çıktı (Çok Boyutlu)
VERİ TEMİN ETME	Basit	Basit (Ölçülecek Birim Analitik Forma Uygun Olmalı)	Detaylı (Kullanılacak Girdi Ve Çıktıya Bağlı)
UYGULAMA	Kolay	Kolay	Kolay (Detaylı)
PERFORMANS ÖLÇÜMÜNE UYGUNLUK	Kısıtlı	Kısıtlı	Geniş

2.2. Veri Zarflama Analizi

VZA, doğrusal programlama tabanlı, parametresiz ve çok sayıda girdi ile çok sayıda çıktı bileşenlerine sahip olan karar verme birimlerinin göreceli etkinlik ölçümünü yapan matematiksel bir metottür. VZA ilk kez Charnes, Cooper, Rhodes tarafından 1978 yılında kâr amacı gütmeyen şirketlerin teknik etkinliklerini ölçmek için kullanılmıştır (Banker, 1992). Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında VZA’nın birçok sektörün verimlilik çalışmalarına ışık tutmuş olduğu görülmekle beraber en çok eğitim, sağlık ve bankacılık gibi kurumlarda kullanılmıştır.

Veri Zarflama Analizinin özellikleri (Özden, 2008):

- Çok sayıda girdi ve çıktı kullanılabilir,
- Girdiler ve çıktılar arasında bir formülasyon kurmaya gerek olmaz,
- Girdi ve çıktı bileşenlerinde farklı ölçü birimleri kullanılabilir (kg, TL vb.),
- Etkinlikler en iyi uç değerlere göre hesaplandığı için uç değerlerden etkilenirler,
- Parametresiz bir metot olduğundan dolayı sonuçlarının istatistiksel test edilmesi zor olur,
- Malmquist toplam faktör verimlilik indeksi ile kullanılarak zaman içinde etkinlik değişimi görülebilir,
- Etkinliğin daha iyi ve kolay ölçülmesi için girdi ve çıktı bileşenlerinin sayısının mümkün olduğunca az olması yanında az sayıda girdiye nazaran daha çok sayıda çıktı tercih edilir.

VZA'nin uygulanması çeşitli adımlardan oluşur. Bu adımların aşamaları ve nasıl uygulanabileceği Tablo 2'de açıklanmıştır (Baysal vd., 2005).

Tablo 2. VZA Aşamaları ve Uygulaması (Baysal vd., 2005).

ADIM	AŞAMA	UYGULAMA
1	Homojen bir gözlem kümesine sahip olmak	Sağlık sektöründe yapılan bir çalışmada sadece devlet hastanelerinden küme oluşturulmak.
2	Girdi ve çıktıyı oluşturan bileşenleri belirlemek	Üniversitede yapılan bir çalışmada lisans, yüksek lisans, doktora öğrencilerini çıktı, personel giderleri, yatırım giderleri gibi kalemleri gider olarak belirlemek.
3	Girdi bileşeninin minimize edilmesi veya çıktı bileşeninin maksimize edilmesi gibi en uygun modeli belirlemek	Girdilerin azaltılmasına gidilemediği durumda çıktının maksimizasyonuna karar vermek.
4	Modelin sabit getiri mi (girdi bileşeninde yapılan bir birim değişimin çıktı bileşenini de aynı oranda etkileme durumu) yoksa değişken getiri mi (girdi bileşeninde yapılan bir birim değişimin çıktı bileşenini daha az veya daha fazla etkileme durumu) sağladığı belirlemek	Üniversitede yapılan bir çalışmada üniversitelerin özerk olduklarından dolayı ölçeğe göre değişken getiriye sahip model olarak belirlemek.
5	Modelin kurulması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesidir	

VZA diğer metotlara kıyasla, kullananlara avantajlar sağladığından ve daha iyi neticeler verdiği için kullanım alanı ve sıklığı giderek artmıştır. Bu durum VZA metodunun modellerinin çeşitlenmesine neden olmuştur. VZA modeli çeşitleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. VZA Modelleri

VZA MODELİ YÖNTEMLERİ		
CCR (Charnes-Cooper-Rhodes) Yöntemi	BCC (Banker-Chaenes-Cooper) Yöntemi	Toplamsal Yöntem
Girdi Odaklı CCR Yöntem Çıktı Odaklı CCR Yöntem	Girdi Odaklı BCC Yöntem Çıktı Odaklı BCC Yöntem	

2.2.1. CCR (Charnes-Cooper-Rhodes) modeli

Bu model Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından 1978 yılında kullanılan ve ismini bu kişilerin baş harflerinden alan ilk ve esas VZA modelidir. Bu model ölçeğe göre sabit getiri düşüncesi ile karar birimlerinin toplam etkinlik değerlerini bulmaktadır (Behdioğlu ve Özcan, 2009). Yani CCR yöntemi ölçeğe göre sabit getiri düşüncesine dayanmaktadır. Kullanılan en yaygın ve en bilindik bu model girdi odaklı ve çıktı odaklı olmak üzere iki çeşit uygulamaktadır.

2.2.1.1. Girdi odaklı CCR modeli

Girdi odaklı CCR modelinde, girdi bileşenlerinin minimize edilmesi fakat aynı zamanda bu değişimin elde var olan çıktı bileşenlerinin aynı şekilde karşılanmaya devam edilmesi amaçlanmaktadır (Kıran, 2008). Girdi odaklı CCR Modelin formüle hali aşağıdaki gibidir (Ulucan, 2000).

Amaç Fonksiyonu

$$E_k = maks \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

E_k = k karar verme birimi etkinlik değeri,

n = Karar birim sayısı,

s = Çıktı bileşen sayısı,

m = Girdi bileşen sayısı,

u_r = k. Karar birimi tarafından r. çıktıya verilen ağırlık,

v_i = k. Karar birimi tarafından i. girdiye verilen ağırlık,

x_{ij} = j. Karar birimi tarafından kullanılan girdi miktarı,

y_{rj} = j. Karar birimi tarafından üretilen çıktı miktarı,

x_{ik} = k. Karar birimi tarafından kullanılan i. girdi miktarı,

y_{rk} = k. Karar birimi tarafından kullanılan r. çıktı miktarını ifade eder.

2.2.1.2. Çıktı odaklı CCR modeli

Çıktı odaklı CCR modelinde ise çıktı bileşenlerinin maksimize edilmesi fakat aynı zamanda bu değişimin girdi bileşenlerinde daha fazlasına ihtiyaç duyulmasına neden olmaması amaçlanmaktadır (Kıran, 2008). Çıktı odaklı CCR Modelin formüle hali aşağıdaki gibidir (Ulucan, 2000).

Amaç Fonksiyonu

$$\min \sum_{i=1}^m v_i x_{ik}$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

2.2.2. BCC (Banker-Charnes-Cooper) modeli

Bu model Banker, Charnes ve Cooper tarafından 1984 yılında kullanılan ve ismini bu kişilerin baş harflerinden alan bir VZA modelidir. Bu model CCR modelinden farklı olarak ölçeğe göre değişken getiri düşüncesini de katarak karar birimlerinin toplam etkinlik değerlerini bulmaktadır (Behdioğlu ve Özcan, 2009).

BCC modelinin CCR modeline göre en önemli özelliği, ölçeğe göre değişken getiri düşüncesini temel alarak her bir karar birimi için ulaşılabilecek doğrusal program sonucu elde edilen λ (etkin olmayan bir karar noktasının etkin olabilmesi için lazım olan bilgiyi sağlayan girdi ve çıktı bileşimi) değerlerin toplamının 1 olmasıdır (Yaralıoğlu, 2006).

2.2.2.1. Girdi odaklı BCC modeli

Girdi odaklı BCC modelinde, girdi bileşenlerinin oransal minimize edilmesi sonuçta maksimum etkinliği amaçlamaktadır (Behdioğlu ve Özcan, 2009). Girdi odaklı BCC Modelin formüle hali aşağıdaki gibidir (Ulucan, 2000).

Amaç Fonksiyonu

$$\max \left(\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - u_k \right)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

E_k = k karar verme birimi etkinlik değeri,

n = Karar birim sayısı,

s = Çıktı bileşen sayısı,

m = Girdi bileşen sayısı,

u_r = k. Karar birimi tarafından r. çıktıya verilen ağırlık,

v_i = k. Karar birimi tarafından i. girdiye verilen ağırlık,

x_{ij} = j. Karar birimi tarafından kullanılan girdi miktarı,

y_{rj} = j. Karar birimi tarafından üretilen çıktı miktarı,

x_{ik} = k. Karar birimi tarafından kullanılan i. girdi miktarı,

y_{rk} = k. Karar birimi tarafından kullanılan r. çıktı miktarını ifade eder.

2.2.2.2. Çıktı odaklı BCC modeli

Çıktı odaklı BCC modelinde, çıktı bileşenlerinin oransal maksimize edilmesine rağmen sonuçta da maksimum etkinliği amaçlamaktadır (Behdioğlu ve Özcan, 2009). Çıktı odaklı BCC Modelin formüle hali aşağıdaki gibidir (Ulucan, 2000).

Amaç Fonksiyonu

$$\min \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - v_k$$

Kısıtlar

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} v_i - v_k$$

CCR Modelin ve BCC modelin genel kullanım formülasyonları yukarıda açıklandığı şekildedir. Fakat hedef girdi ve çıktılarının değerlerinin bulunmasında kolaylık sağlaması açısından CRR ve BCC Modellerin dual gösterimi de önemlidir (Kocakalay ve Işık, 2003). Aşağıda Tablo 4’de modellerin amaç fonksiyonlarının dual gösterimi ve etkinlik değerinin alacağı değer açıklamaları verilmiştir (Norman ve Stoker, 1991; Seiford ve Zhu, 1999; Kıran, 2008).

Tablo 4. CRR ve BCC Dual Modelleri Gösterimi ve Açıklaması

CRR DUAL MODELİ AÇIKLAMASI	
Girdi Odaklı CCR Modeli	Çıktı Odaklı CCR Modeli
<u>Min</u> θ^*	<u>Max</u> θ^*
θ^* = Etkinlik değeri ise;	θ^* = Etkinlik değeri ise;
$\theta^* = 1$ ise karar verme birimi etkin	$\theta^* = 1$ ise karar verme birimi etkin
$\theta^* < 1$ ise karar verme birimi etkin değildir.	$\theta^* > 1$ karar verme birimi etkin değildir.
BCC DUAL MODELİ AÇIKLAMASI	
Girdi Odaklı BCC Modeli	Çıktı Odaklı BCC Modeli
<u>Min</u> θ^*	<u>Max</u> θ^*
θ^* = Etkinlik değeri ise;	θ^* = Etkinlik değeri ise;
$\theta^* = 1$ ise karar verme birimi etkin	$\theta^* = 1$ ise karar verme birimi etkin
$\theta^* < 1$ ise karar verme birimi etkin değildir.	$\theta^* > 1$ ise karar birimi etkin değildir.

Karar verme birimlerinin (KVB) görelî etkinliği Dual modelde bulunan ‘ θ ’ simgesi ile gösterilmektedir (Kocakalay ve Işık, 2003).

2.2.3. Toplamsal model

Bu model Chaenes, Cooper, Golany, Seiford ve Stutz tarafından 1985 yılında kullanılan ayrıca ismini CCR ve BCC modellerinin girdi ve çıktı birleşenlerini beraber değerlendirmesi bakımından toplamsal olarak alan bir VZA modelidir (Cook ve Seiford, 2008).

3. BULGULAR

VZA'nın en doğru şekilde uygulanabilmesi ve güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için uygulamaya hazırlık süreci oldukça önemlidir. Bu hazırlık sürecinin çeşitli aşamaları bulunmaktadır. Bu aşamalar Metodoloji bölümünde 'Veri Zarflama Analizi' başlığı altında detaylı gösterilmiştir. Aşamalar sırası ile aşağıda verilen şekilde uygulanmıştır (Yavuz, 2001).

Uygulama İçin Karar Birimlerinin Seçimi: VZA'nın ilk aşaması birbirleri ile göreceli etkinlikleri ölçülecek karar verme birimlerinin seçimidir (Yolalan, 1993). KVB seçiminde girdi ve çıktı sayılarının ne oldukları da önem arz eder. Şöyle ki 'm' girdi sayısı, 'n' çıktı sayısı ise KVB sayısının en az 'm+n+1' olması istenir (Motroi, 2018). Bir başka şekilde ise, KVB sayısı en az tüm değişkenlerin sayısının toplamının iki katı olarak seçilmelidir (Boussofiene, 1991).

Çalışmada karar birimleri olarak, Türkiye'de bulunan 81 il içerisinde 20 il seçilmiştir. Bu iller, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından hazırlanan 2019 yılı için 'bitkisel üretim değeri (bin TL)' verileri alınarak sıralamada en yüksek olan 20 il şeklinde belirlenmiştir. Bunun nedeni verilerin homojenliğe daha yakın olmasının istenmesidir. Seçilen iller sırası ile şekildedir: Antalya, Konya, Mersin, Adana, Şanlıurfa, İzmir, Bursa, Manisa, Ankara, Aydın, Samsun, Denizli, Çanakkale, Muğla, Diyarbakır, Niğde, Ordu, Balıkesir ve Karaman.

Uygulama Girdi ve Çıktılarının Belirlenmesi: KVB'nin gerçekleştirdiği değerleri bulabilmek ve sonrasında yorumlayabilmek için girdi ve çıktılarının doğru bir şekilde belirlenmesi son derece önemlidir. Girdi ve çıktılar araştırılan konu çerçevesinin içinden ve konu ile ilişkilendirilebilir şekilde seçilmelidir (Öztürk, 2009). Tablo 5'de çalışmada kullanılan girdi ve çıktı verileri gösterilmiştir.

Tablo 5. Girdi ve Çıktı Verileri (TÜİK)

İLLER	GİRDİLER				ÇIKTILAR	
	İŞLENEN TARIM ALANI (HEKTAR)	TARIMSAL MEKANİZASYON (ADET)	TARIMSAL SULAMA KULLANILAN ENERJİ (MWH)	GÜBRE TÜKETİMİ (TON)	SEBZE MEYVE ÜRETİM (TON)	TAHİL VE DİĞER BİTKİSEL ÜRETİM (TON)
Antalya	281.993	139676	177316	121986	3.917.418	1.133.785
Konya	1.820.271	287058	1301531	503277,4	10.231	15.641.522
Mersin	186.071	90109	180388	87812,3	1.637.065	580.273
Adana	398.128	95455	138606	353807,7	1.046.556	2.550.927
Şanlıurfa	912.439	74120	1911646	477130,7	15.134	3.533.190
İzmir	174.819	170273	398288	143418,5	163.594	4.488.633
Bursa	206.824	163204	82159	92280,5	12.541	2.385.819
Hatay	128.817	63780	205913	119345,9	52.499	785.700
Manisa	275.691	227038	313876	138289,8	52.701	1.751.602
Ankara	1.123.000	135179	157408	206254,9	4.989	3.189.228
Aydın	136.230	119929	72741	103027,1	62.670	3.309.190
Samsun	254.450	114708	35867	131360	29.550	1.995.946
Denizli	267.730	102673	72940	97335,9	34.941	2.448.196
Çanakkale	234.566	95200	36148	70907,7	8.518	2.802.597
Muğla	105.641	97632	42294	45124,7	694.137	1.462.898
Diyarbakır	531.641	42130	433438	256566,7	6.454	1.911.728
Niğde	243.091	63001	163216	109786,5	0	1.864.151
Ordu	24.856	7587	223	61934,7	2.194	46.095
Balıkesir	292.589	123692	41329	121705,6	9.208	3.484.518
Karaman	293.229	55903	223849	69770,1	347	2.009.196

Çalışmada tarımsal etkinliği ölçmek için 4 tanesi girdi değişkeni ve 2 tanesi ise çıktı değişkeni olmak üzere 6 adet farklı değişken kullanılmıştır. Girdi değişkenleri; ‘İşlenen Tarım Alanı (Dekar)’, ‘Tarımsal Mekanizasyon (Adet)’, ‘Tarımsal Sulamada Kullanılan Enerji (MWH)’ ve ‘İl Gübre Tüketimi (Ton)’ olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkenleri ise; ‘Sebze Meyve Üretimi (Ton)’ ve ‘Tahıl ve Diğer Bitkisel Üretim (Ton)’ olarak belirlenmiştir.

Güvenilir Veriler Toplanması: Girdi ve çıktı değişkenleri belirlendikten sonra verilerin toplanması aşamasına geçilir. Veri toplama aşaması için mutlaka güvenilir kaynaklara başvurulmalıdır. Güvenilir olmayan veriler kendi veri setlerini olumsuz etkilerken diğer yandan uygulamada görelî etkinlik ölçümü yapıldığı için diğer veri setlerinin doğruluğunu da riske ederler (Yavuz, 2001).

Bu çalışmada yer alan veriler (il gübre tüketimi hariç), Türkiye İstatistik Kurumu’ndan, ‘iller bazında gübre tüketim’ girdi verisi ise Tarım ve Orman Bakanlığından alınmıştır.

Kullanılacak VZA Yöntemi veya Yöntemlerinin Belirlenerek Modelin Kurulması: Bu çalışmada Veri Zarflama Analizi modelleri kullanılmıştır. Klasik Veri Zarflama Analizinin iki modeli, toplam etkinliği ölçen CCR ve BCC modeli, iki yönelimli (Girdi Odaklı ve Çıktı Odaklı) olarak çözülmüştür. Modelin çözüm aşamasında doğrusal programlama paket programlarından ‘GAMS Paket programı’ kullanılmıştır.

Aşağıda çalışmada yapılan CCR Model Girdiye Yönelik bir doğrusal programlama örneği verilmektedir. Bu model her bir karar birimi için, girdi veya çıktıya yönelik değişkenler olmak üzere farklı şekillerde modellenmiştir.

CRR Girdiye Yönelik Model yazım örneği;

Girdi değişkenleri;

$$\text{Girdi1.}(281993*v_1)+(1820271*v_2)+(186071*v_3)+(398128*v_4)+(912439*v_5)+(174.819*v_6)+(206824*v_7)+(128817*v_8)+(275691*v_9)+(1123000*v_{10})+(136230*v_{11})+(254450*v_{12})+(267730*v_{13})+(234566*v_{14})+(105641*v_{15})+(531.641*v_{16})+(243091*v_{17})+(24856*v_{18})+(292.589*v_{19})+(293229*v_{20})=I=\mathbf{\Theta}^*$$

$$\text{Girdi2.}(139676*v_1)+(287058*v_2)+(90109*v_3)+(95455*v_4)+(74120*v_5)+(170273*v_6)+(163204*v_7)+(63780*v_8)+(227038*v_9)+(135179*v_{10})+(119929*v_{11})+(114708*v_{12})+(102673*v_{13})+(95200*v_{14})+(97632*v_{15})+(42130*v_{16})+(63001*v_{17})+(7587*v_{18})+(123692*v_{19})+(55903*v_{20})=I=\mathbf{\Theta}^*$$

$$\text{Girdi3.}(177316*v_1)+(1301531*v_2)+(180388*v_3)+(138606*v_4)+(1911646*v_5)+(398288*v_6)+(82159*v_7)+(205913*v_8)+(313876*v_9)+(157408*v_{10})+(72741*v_{11})+(35867*v_{12})+(72940*v_{13})+(36148*v_{14})+(42294*v_{15})+(433438*v_{16})+(163216*v_{17})+(223*v_{18})+(41329*v_{19})+(223849*v_{20})=I=\mathbf{\Theta}^*$$

$$\text{Girdi4.}(121986*v_1)+(503277.4*v_2)+(87812.3*v_3)+(353807.7*v_4)+(477130.7*v_5)+(143418.5*v_6)+(92280.5*v_7)+(119345.9*v_8)+(138289.8*v_9)+(206254.9*v_{10})+(103027.1*v_{11})+(131360*v_{12})+(97335.9*v_{13})+(70907.7*v_{14})+(45124.7*v_{15})+(256566.7*v_{16})+(109786.5*v_{17})+(61934.7*v_{18})+(121705.6*v_{19})+(69770.1*v_{20})=I=\mathbf{\Theta}^*$$

Çıktı değişkenleri;

$$\text{Çıktı1.}(3917418*v1)+(10231*v2)+(1637065*v3)+(1046556*v4)+(15134*v5)+(163594*v6)+(12541*v7)+(52499*v8)+(52701*v9)+(4989*v10)+(62670*v11)+(29550*v12)+(34941*v13)+(8518*v14)+(694137*v15)+(6454*v16)+(*v17)+(2194*v18)+(9208*v19)+(347*v20)=g=$$

$$\text{Çıktı2.}(1133785*v1)+(15641522*v2)+(580273*v3)+(2550927*v4)+(3533190*v5)+(4488633*v6)+(2385819*v7)+(785700*v8)+(1751602*v9)+(3189228*v10)+(3309190*v11)+(1995946*v12)+(2448196*v13)+(2802597*v14)+(1462898*v15)+(1911728*v16)+(1864151*v17)+(46095*v18)+(3484518*v19)+(2009196*v20) =g=$$

Birinci karar verme birimi ve birinci girdi kullanılarak oluşturulan model örneği:

Amaç fonksiyonu: $\min \theta$

$$(\underline{281993}*kvb1)+(1820271*kvb2)+(186071*kvb3)+(398128*kvb4)+(912439*kvb5)+(174.819*kvb6)+(206824*kvb7)+(128817*kvb8)+(275691*kvb9)+(1123000*kvb10)+(136230*kvb11)+(254450*kvb12)+(267730*kvb13)+(234566*kvb14)+(105641*kvb15)+(531.641*kvb16)+(243091*kvb17)+(24856*kvb18)+(292.589*kvb19)+(293229*kvb20)=l=Theta*\underline{281993}$$

Etkinliğin Ölçümü: Yukarıdaki modelin çözümünden her karar verme birimi için bir etkinlik değeri elde edilir. Bu değer 0 ile 1 arasındadır. Etkinlik değeri 1 bulunan karar birimleri için etkin, 1 değerinin altında olan karar birimleri için etkinsiz denilmiştir (Yavuz, 2001). Tablo 6’da CCR ve BCC model etkinlik ölçümü sonuçları verilmiştir.

Tablo 6. Etkinlik Ölçümü Tablosu

KVB	CCR MODELİ		BCC MODELİ	
	GİRDİ ODAKLI	ÇIKTI ODAKLI	GİRDİ ODAKLI	ÇIKTI ODAKLI
Antalya	1	1	1	1
Konya	1	1	1	1
Mersin	0.679	1.472	0.903	1,252
Adana	1	1	1	1
Şanlıurfa	0.880	1.136	0.95	1.058
İzmir	1	1	1	1
Bursa	0.727	1.375	0.747	1.353
Hatay	0.401	2.496	0.544	2.333
Manisa	0.367	2.723	0.415	2.553
Ankara	0.690	1.448	0.696	1.418
Aydın	1	1	1	1
Samsun	0.681	1.468	0.688	1.463
Denizli	0.774	1.293	0.795	1.292
Çanakkale	1	1	1	1
Muğla	1	1	1	1
Diyarbakır	0.837	1.195	0.976	1.030
Niğde	0.715	1.398	0.830	1.282
Ordu	1	1	1	1
Balıkesir	1	1	1	1
Karaman	0.857	1.167	1	1

Uygulama Sonucu: Bütün modellerin sonuçları değerlendirilerek etkin olan ve etkinsiz olan iller belirlenir. Tablo 6’da verilen değerleri yorumlaması şu şekildedir.

Girdi yönelimli CCR-Model çözümü yapıldığında elde edilen sonuçlar;

Seçilen 20 ilden; 11 tanesinin tarımsal performans sonucu etkinlik skoru θ^* olmak üzere $\theta^* < 1$ olduğu için etkinsiz çıkmıştır. Bu iller sırası ile Mersin, Şanlıurfa, Bursa, Hatay, Manisa, Ankara, Samsun, Denizli, Diyarbakır, Niğde ve Karaman’dır.

Diğer 9 tane il ise tarımsal performans etkinlik sonucu etkinlik skoru θ^* olmak üzere $\theta^* = 1$ sonucuna göre etkin çıkmıştır. Bu iller sırası ile Antalya, Konya, Adana, İzmir, Aydın, Çanakkale, Muğla, Ordu ve Balıkesir’dir.

Çıktı Yönelimli CCR-Model çözümü yapıldığında elde edilen sonuçlar;

Gözlem altındaki 20 ilden 11 tanesinin etkinlik skoru θ^* olmak üzere $\theta^* > 1$ olduğu için etkinsiz çıkmıştır. Diğer 9 tane ilin $\theta^* = 1$ sonucuyla etkin çıkmıştır.

Etkinsiz olan illere bakıldığında en yüksek skorlara göre sırasıyla; Manisa 2,723, Hatay 2,496, Mersin 1,472, Samsun 1,468, Ankara 1,448, Niğde 1,398, Bursa 1,375, Denizli 1,293, Diyarbakır 1,195, Karaman 1,167 ve Şanlıurfa 1,139 şeklindedir. Çıktı yönlü CCR modeline göre en etkinsiz il en yüksek çıktı oranı puanıyla Manisa’dır.

Girdi yönelimli BCC Modeli incelendiğinde; etkinsiz bulunan illerin değerleri ise sırasıyla; Manisa 0,415, Hatay 0,544, Samsun 0,688, Ankara 0,696, Bursa 0,747, Denizli 0,795, Niğde 0,830, Mersin 0,903, Şanlıurfa 0,95 ve Diyarbakır 0,976 şeklindedir. Uygulamada en etkinsiz il 0,425 değeri ile Manisa olduğu görülmüştür.

Çıktı yönelimli BCC Modeli incelendiğinde; etkinsiz bulunan illerin değerleri ise sırasıyla; Manisa 2,553, Hatay 2,333, Samsun 1,463, Ankara 1,418, Bursa 1,353, Denizli 1,292, Niğde 1,282, Mersin 1,252, Şanlıurfa 1,058 ve Diyarbakır 1,030 şeklindedir. Uygulamada en etkinsiz il 2,553 değeri ile Manisa olduğu görülmüştür.

Referans kümeleri belirlenmesi: BBC ve CCR modeli çözümlerine göre etkinsiz olan illerin etkinliğe ulaşabilmeleri için referans kümeleri ve bu referans kümelerinin ağırlık değerleri bulunmuştur. Bu referans kümeleri performans iyileştirme çalışmaları için kullanılmıştır.

Potansiyel iyileştirme yüzdesi şu formülle hesaplanmaktadır:

$$\text{Potansiyel İyileştirme Yüzdesi} = \frac{\text{Hedef Değer} - \text{Gerçekleşen Değer}}{\text{Gerçekleşen Değer}} \times 100$$

Tablo 7’de referans kümeleri ve yoğunluk oranları gösterilmiştir.

Tablo 7. Etkinsiz Şehirler İçin Referans Setleri ve Yoğunluk Değerleri

CCR GİRDİYE YÖNELİK	REFERANS KÜMELERİ	YOĞUNLUK ORANLARI
Mersin	K1, K2, K11	(0,418) (0,004) (0,015)
Şanlıurfa	K1, K2	(0,003) (0,226)
Bursa	K11, K14	(0,350) (0,438)
Hatay	K1, K2, K11	(0,011) (0,014) (0,166)
Manisa	K11, K14, K15	(0,317) (0,228) (0,045)
Ankara	K2, K14	(0,061) (0,795)
Samsun	K15	0,034
Denizli	K1, K2, K11, K14	(0,006) (0,020) (0,065) (0,683)
Diyarbakır	K1, K2	(0,001) (0,122)
Niğde	K2, K11, K14	(0,080) (0,163) (0,027)
Karaman	K2, K14	(0,083) (0,252)

3.1. Performans İyileştirme Çalışması

Çalışma uygulamasında etkinsiz çıkan illeri etkinliğe ulaşabilmeleri için belirlenen referans kümeleri ve yoğunluk oranlarından faydalanarak performans iyileştirme çalışması yapılmıştır. Çalışma sonuçları aşağıda Tablo 8, Tablo 9, Tablo 10, Tablo 11, Tablo 12 ve Tablo 13’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Etkinsiz İllerin İşlenen Tarım Alanı Girdisinde Azaltılması Gereken PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	İŞLENEN TARIM ALANI (HEKTAR)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	186.071	127.197,61	-58873,39	-31,64
Şanlıurfa	912.439	412227,225	-500211,8	-54,82
Bursa	206.824	150420,408	-56403,59	-27,27
Hatay	128.817	51199,897	-77617,1	-60,25
Manisa	275.691	101419,803	-174271,2	-63,21
Ankara	1.123.000	297516,501	-825483,5	-73,51
Samsun	254.450	173167,756	-81282,24	-31,94
Denizli	267.730	207160,906	-60569,09	-22,62
Diyarbakır	531.641	222355,055	-309285,9	-58,18
Niğde	243.091	51098,212	-191992,8	-78,98
Karaman	293.229	210193,125	-83035,88	-28,32

Tablo 9. Etkinsiz İllerin Tarımsal Mekanizasyon Girdisinde Azaltması Gereken PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	TARIMSAL MEKANİZASYON (ADET)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	90.109	61.331,74	-28.777,27	-31,94
Şanlıurfa	74.120	65.294,14	-8.825,86	-11,91
Bursa	163.204	83.672,75	-79.531,25	-48,73
Hatay	63.780	25.463,46	-38.316,54	-60,08
Manisa	227.038	64.116,53	-162.921,47	-71,76
Ankara	135.179	93.194,54	-41.984,46	-31,06
Samsun	114.708	74.128,54	-40.579,46	-35,38
Denizli	102.673	79.396,20	-23.276,80	-22,67
Diyarbakır	42130	35.160,75	-6.969,25	-16,54
Niğde	63.001	33.292,91	-29.708,09	-47,15
Karaman	55.903	47.816,21	-8.086,79	-14,47

Tablo 10. Etkinsiz İllerin Tarımsal Sulamada Kullanılan Enerji Girdisinde Azaltması Gereken PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	TARIMSAL SULAMADA KULLANILAN ENERJİ (MWH)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	180.388	80415,33	-99972,67	-55,42
Şanlıurfa	1.911.646	294678	-1616968	-84,59
Bursa	82.159	41292,17	-40866,83	-49,74
Hatay	205.913	32246,92	-173666,1	-84,34
Manisa	313.876	33203,87	-280672,1	-89,42
Ankara	157.408	108131,1	-49276,9	-31,31
Samsun	35.867	24401,39	-11465,62	-31,97
Denizli	72.940	56511,77	-16428,24	-22,52
Diyarbakır	433.438	158964,1	-274473,9	-63,32
Niğde	163.216	27018,06	-136197,9	-83,45
Karaman	223.849	117136,4	-106712,6	-47,67

Tablo 11. Etkinsiz İllerin Gübre Tüketimi Girdisinde Azaltması Gereken PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	GÜBRE TÜKETİMİ (TON)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	87.812,3	54548,6641	-33263,64	-37,88
Şanlıurfa	477.130,7	114106,65	-363024,1	-76,08
Bursa	92.280,5	67117,0576	-25163,44	-27,27
Hatay	119.345,9	25490,2282	-93855,67	-78,64
Manisa	138.289,8	50857,16	-87432,64	-63,22
Ankara	206.254,9	87071,54	-119183,4	-57,78
Samsun	131.360,0	87601,4869	-43758,51	-33,31
Denizli	97.335,9	65924,1846	-31411,72	-32,27
Diyarbakır	256.566,7	61521,8288	-195044,9	-76,02
Niğde	109.786,5	28466,81	-81319,69	-74,07
Karaman	69.770,1	59640,76	-10129,34	-14,52

Tablo 12. Etkinsiz İllerin Sebze Meyve Üretim Çıktısı PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	SEBZE MEYVE ÜRETİM (TON)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	1.637.065	1638461,7	1396,7	0,09
Şanlıurfa	15.134	14064,5	-1069,5	-7,07
Bursa	12.541	25665,384	13124,384	104,65
Hatay	52.499	53638,052	1139,052	2,17
Manisa	52.701	53044,7	343,7	0,65
Ankara	4.989	7395,9	2406,9	48,24
Samsun	29.550	29362,3	-187,7	-0,64
Denizli	34.941	33600,5	-1340,5	-3,84
Diyarbakır	6.454	5165,6	-1288,4	-19,96
Niğde	0	11263,7	11263,7	0,00
Karaman	347	2995,71	2648,71	763,32

Tablo 13. Etkinsiz İllerin Tahıl ve Diğer Bitkisel üretim çıktısı PI Yüzdeleri

ŞEHİRLER	TAHIL VE DİĞER BİTKİSEL ÜRETİM (TON)			
	Gerçekleşen	Hedef	Fark	PI(%)
Mersin	580.273	586126,1	5853,07	1,01
Şanlıurfa	3.533.190	3538385	5195	0,15
Bursa	2.385.819	2385754	-65,014	0,00
Hatay	785.700	780778,5	-4921,52	-0,63
Manisa	1.751.602	1753836	2234	0,13
Ankara	3.189.228	3182197	-7031	-0,22
Samsun	1.995.946	1994036	-1910	-0,10
Denizli	2.448.196	2448904	708	0,03
Diyarbakır	1.911.728	1909399	-2328,531	-0,12
Niğde	1.864.151	1866390	2239	0,12
Karaman	2.009.196	2004501	-4695	-0,23

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çıktı yönelimli ve girdi yönelimli VZA, ayrı noktalara odaklanmaktadır. Girdi yönelimli modeller; en az girdiyle maksimum çıktı üretmeye, çıktı yönelimli modeller ise aynı girdi miktarıyla maksimum çıktı üretmeye odaklanmaktadır (Yıldırım, 2019). CCR modeline göre etkin çıkan iller, Antalya, Konya, Adana, İzmir, Aydın, Çanakkale, Muğla, Ordu ve Balıkesir olmak üzere dokuz tanedir. BCC modeline göre etkin çıkan iller ise CCR modelde etkinsiz çıkan Karaman ilinin de etkinliğe ulaşması ile 10 il olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde BCC Modeli ile yapılan girdi ve çıktı yönelimli uygulamaların ikisinde de etkinsiz bulunan iller sıralamasının aynı olduğu görülmüştür. CCR Model ve BCC Modelleri değerleri bakımından büyük farklar görülmemiştir. Sadece yönelim değişikliklerine göre sonuçlarda farklılıklar meydana gelmiştir.

Sonuçta odaklanılması gereken durum etkinsiz olma durumu ve bu durumun düzeltilmesi çalışması olduğundan etkinsiz çıkan iller için performans iyileştirme çalışması yapılmıştır. Performans iyileştirme çalışması CCR girdi modelinde etkinsiz bulunan 11 ilde yapılmıştır. Bu iller Mersin, Şanlıurfa, Bursa, Hatay, Manisa, Ankara, Samsun, Denizli, Diyarbakır, Niğde ve Karaman'dır.

Girdiye yönelik PI çalışmasında incelendiğinde ikinci ve üçüncü girdide en yüksek değerlere sahip olması nedeniyle en verimsiz il Manisa çıkmıştır.

Çıktılara yönelik PI çalışması incelendiğinde artış beklenen iller; ilk çıktı olan ‘Sebze ve Meyve Üretimi’nde sırasıyla %760 ve %100 değerleri ile Karaman ve Bursa illeridir. Karaman ilinde beklenen yüksek artışın sebebi bu ilin tarımda önceliği sebze ve meyve üretimine değil tahıl ürünlerinin üretimine vermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu teorimizi, ikinci çıktı olan ‘Tahıl ve Diğer Bitkisel Üretim’de Karaman ilinde bir artış beklenmemesi durumu desteklemektedir.

Artışın yanı sıra etkinsiz bazı illerin çıktıları azaltmaları gerekmektedir. Çıktılardaki azaltmanın muhtemel sebebi girdi faktörlerindeki yetersizliklerdir.

Tarımsal etkinlik ölçümünde tarımsal işgücünün de oldukça önemli olduğu bilinmektedir. İllere yönelik tarımsal işgücü verisine ulaşamadığı için bu çalışmaya konulamamıştır fakat bu verilere ulaşılarak yapılacak bir etkinlik çalışmasının daha doğru bir etkinlik sonucuna ulaştıracağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Yazarlar çalışmada kullanılan verilerin temini için Türkiye İstatistik Kurumuna ve Tarım ve Orman Bakanlığına; veri toplama, kaynak yardımı, analiz ve yorumlama konusunda katkı sağlayan Ziraat Mühendisi Sayın Yahya IŞIK’a teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Banker, R.D., (1992), “Estimation of Returns To Scale Using Data Envelopment Analysis, European Journal of Operational Research”, 62, 74-84.

Baysal, M.E., Alçılar, B., Çerçioğlu, H., Toklu, B., (2006), “Türkiye’deki Devlet Üniversitelerinin Performanslarının Değerlendirilmesi ve Görelî Etkinliklerinin Belirlenmesi”, Verimlilik Dergisi, 2.

Behdioğlu, S., Özcan, G., (2009), “Veri Zarflama Analizi ve Bankacılık Sektöründe Bir Uygulama”, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(3), 301-326.

Bousofiane, A., Dyson, R., Rhodes, E., (1991), “Applied Data Envelopment Analysis”, European Journal of Operational Research, 2(6), 1-15.

Bozdağ, N., Altan Ş., Atan M., (2001), “Toplam Etkinlik Ölçümü: Türkiye’deki Özel ve Kamu Bankaları İçin Bir Uygulama”, 03.04.2009, <http://idari.cu.edu.tr/sempozyum/bil54.htm>.

Büyükkılıç, D., (2004), “Kâr Amacı Gütmeyen Örgütlerde Verimlilik”, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, 680, 34.

Cook, W.D., Seiford, L. M., (2008), “Data Envelopment Analysis (DEA) - Thirty Years On”, European Journal of Operational Research, 192(1), 1-17.

Demir, K., Çabuk, S., (2010), “Türkiye’de Metropolitan Kentlerin Nüfus Gelişimi”, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 28(1), 193-215.

Doğan, Z., Arslan, S., Berkman, A.N., (2015), “Türkiye’de Tarım Sektörünün İktisadi Gelişimi ve Sorunları: Tarihsel Bir Bakış”, Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, 8(1), 29-41.

Gürler, A.Z., (2008), Tarım Ekonomisi, Ankara, Nobel Yayın ve Dağıtım.

İşçi, Ö., (2013), “Veri Zarflama Analizi ile Türkiye’de Gıda İmalatı Yapan Firmaların Etkinliklerinin Ölçülmesi”, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 36, 157-173.

Meriam-Webster Online, (2020), Dictionary: Performance, 02.04.2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/performance>.

Karasoy, H., (2000), “Veri Zarflama Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kedzo, G.M., Lukac, Z., (2020), “The Financial Efficiency of Small Food and Drink Producers Across Selected European Union Countries Using Data Envelopment Analysis”, European Journal of Operational Research.

Khezrimotlagh, D., Zhu, J., Cook, W.D., Toloo M., (2019), “Data Envelopment Analysis and Big Data”, European Journal of Operational Research, 274, 1047-1054.

Kıran, B., (2008), “Kalkınmada Öncelikli İllerin Ekonomik Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi Yöntemi ile Değerlendirilmesi”, Çukurova Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

Kocakalay, Ş., Işık, A., (2003), “Veri Zarflama Analizi”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5, 163-171.

Mahmoudi, R., Emrouznejad, A., Khosroshahi, H., Khashei, M., Rajabi, P., (2019), “Performance Evaluation of Thermal Power Plants Considering CO2 Emission: A Multistage PCA, Clustering, Game Theory and Data Envelopment Analysis”, Journal of Cleaner Production, 223, 641-650.

Motroi, A., (2018), “İmalat İşletmelerinde Veri Zarflama Analizi ile Verimlilik Ölçümü”, Bankacılık ve Finansal Araştırmalar Dergisi, 5, 1.

Norman, M., Stoker, B., (1991), Data Envelopment Analysis, John Wiley&Sons, 262.

Özbek, S., (2007), “Sigorta Şirketlerinin Etkinliğinin Veri Zarflama Analizi ile İncelenmesi”, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Özden, Ü.H., (2008), “Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Türkiye’deki Vakıf Üniversitelerinin Etkinliğinin Ölçülmesi”, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37(2), 167-185.

Öztürk, Y.E., (2009), “Veri Zarflama Analizi ve Hastane Etkinliğinin Ölçülmesinde Kullanımı”, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler MYO Dergisi, 12(1-2), 97-118.

Peyrache, A., Rose, C., Sicilia G., (2020), “Variable Selection in Data Envelopment Analysis”, European Journal of Operational Research, 282, 644-659.

Şahin, H., (2019), “Dumlupınar Üniversitesi Meslek Yüksekokullarının Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi ile Karşılaştırılması”, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 1(1), 49-63.

Şenol, O., Kişi, M., Eroymak, S., (2019), “OECD Ülkelerinin Sağlık Göstergelerini Veri Zarflama Analiz Yöntemiyle Karşılaştırılması”, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 35, 277-293.

TDK, (2020), Güncel Türkçe Sözlük: Performance=Başarım, 02.04.2020,
<https://sozluk.gov.tr/?kelime=performans>,
<https://sozluk.gov.tr/?kelime=ba%C5%9Far%C4%B1m>.

Tetko, V.I., Gasteiger, J., Todeschini, R., Mauri A., Livingstone, D., Ertl, P., Palyulin, V.A., Radchenko, E.V., Zefirov, N.S., Makarenko, A.S., Tanchuk, V.Y., Prokopenko, V.V., (2005), “Virtual Computational Chemistry Laboratory – Design and Description”, Journal of Computer-Aided Molecular Design, 19, 453-463.

Top, M., Konca, M., Sapaz, B., (2020), “Technical Efficiency of Healthcare Systems in African Countries: An Application Based on Data Envelopment Analysis”, Health Policy and Technology, 9, 62-68.

Turhan, Ş., Vural, H., Erdal, B., (2013), “Bursa Tarımının Sosyo-Ekonomik Yapısının Analizi”, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 27-38.

Ulucan, A., (2000), “Şirket Performansı Ölçülmesinde Veri Zarflama Analizi Yaklaşımı: Genel ve Sektörel Bazda Değerlendirmeler”, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18(1), 405-418.

Yaralıoğlu, K., (2006), Ders Notları: Veri Zarflama Analizi.

Yavuz, İ., (2001), “Sağlık Sektöründe Etkinlik Ölçümü”, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, 654, 113.

Yıldırım, M., Ayvaz B., (2019), “Ülkelerin Lojistik Performanslarının Veri Zarflama Analizi ile Ölçümü”, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 18(35), 57-73.

Yolalan, R., (1993), “İşletmeler Arası Görelilik Etkinlik Ölçümü”, MPM Yayınları, 483, Ankara.

Yükçü, S., Atağan, G., (2009), “Etkinlik, Etkililik ve Verimlilik Kavramlarının Yarattığı Karışıklık”, Atatürk Üniversitesi İBBF Dergisi, 23, 4.



ALTITUDE-HOLD FLIGHT CONTROL SYSTEM DESIGN FOR LONGITUDINAL MOTION

UZUNLAMASINA HAREKET KAPSAMINDA İRTİFA KİLİTLEME UÇUŞ KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Ahmet Hulusi ÖZ¹

Muammer KALYON²

Corresponding Author / Sorumlu Yazar
ahmethulusi.oz@tai.com.tr

Received / Geliş Tarihi
28.05.2021

Accepted / Kabul Tarihi
02. 06. 2021

Abstract

This article proposes the conventional implementation of a “Altitude-Hold Controller” for a high speed hypothetical aircraft. The static stability, which is called as *Stability Augmentation System (SAS)*, is studied for the system. The stability conditions are analyzed and suitable controller design is developed over the longitudinal motion. The controller is designed by linearizing the longitudinal equation of motions and it is studied for performance issue. The controller design is optimized in order to get a good approximation for the overall flight system. The Root-Locus method is used to get the controller coefficients. The controller is divided into two sections which are; the inner loop that deals with the pitching motion parameters and the outer loop that deals with the altitude reference, flight-path angle on the vertical motion of the aircraft. The simulations, analysis and results are developed in MATLAB/Simulink program. The final results are discovered and expressed over the MATLAB/Simulink.

Keywords: Altitude-Hold control, flight mechanics, flight control systems, longitudinal motion control, Pitch control.

Öz

Bu makale, yüksek hızlı varsayımsal bir uçak için “İrtifa-Kilitleme Kontrolcü”sünün geleneksel uygulamasını göstermektedir. Sistem için “Kararlılık Arttırma Sistemi (SAS)” olarak adlandırılan statik kararlılık çalışılmıştır. Kararlılık koşulları analiz edilmiş ve uçağın uzunlamasına hareketi üzerinden uygun kontrolcü tasarımı geliştirilmiştir. Kontrolcü, uzunlamasına hareket denklemlerinin lineerleştirilmesi ile birlikte tasarlanmış ve performans sorunu için incelenmiştir. Kontrolcü tasarımı, genel uçuş sistemi için iyi bir yaklaşım elde etmek adına optimize edilmiştir. Kontrolcü katsayılarını elde etmek için Root-Locus yöntemi kullanılmıştır. Kontrolcü iki bölüme ayrılmıştır: yunuslama hareketi parametreleri ve açıları ile ilgilenen iç kontrol döngüsü ve uçağın dikey hareketindeki irtifa referansı ve uçuş-yolu açısı ile ilgilenen dış kontrol döngüsüdür. Simülasyonlar, analizler ve sonuçlar MATLAB/Simulink programında geliştirilmiştir. Nihai sonuçlar keşfedilmiş ve MATLAB/Simulink üzerinden ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İrtifa-Kilitleme kontrolü, Pitch açısı kontrolü, uçuş kontrol sistemleri, uçuş mekaniği, uzunlamasına hareket kontrolü.

¹This publication was produced from the Master thesis of Ahmet Hulusi ÖZ in the Mechatronics Engineering Program of Istanbul Commerce University, Institute of Science and Technology.

¹Istanbul Commerce University, Institute of Science and Technology, Department of Mechatronics Engineering, Küçükyalı, İstanbul, Turkey. ahmethulusi.oz@tai.com.tr, Orcid.org/0000-0003-4374-7932.

²Istanbul Commerce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Küçükyalı, İstanbul, Turkey. mkalyon@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8168-2773.

Abbreviations

F_D	: Drag Force
F_Y	: Side Force
F_L	: Lift Force
C_D	: Drag coefficient
C'_D	: Equivalent drag coefficient for level flight
C_{D_0}	: Mean Drag coefficient
$C_{D_{CL^2}}$: Drag coefficient with respect to lift coefficient
$C_{D_{flaps}}$: Drag coefficient with respect to flaps
$C_{D_{control\ surfaces}}$: Drag coefficient with respect to control surfaces
C_{Y_β}	: Side-force coefficient with respect to side-slip angle
$C_{Y_{\delta r}}$: Side-force coefficient with respect to rudder deflection
C_Y	: Mean Side-force coefficient
C_L	: Lift coefficient
C'_L	: Equivalent lift coefficient for level flight
C_{L_0}	: Mean Lift coefficient
C_{L_α}	: Lift coefficient with respect to angle of attack
$C_{L_{\delta e}}$: Lift coefficient with respect to elevator deflection
LL	: Rolling Moment
MM	: Pitching Moment
NN	: Yawing
C_l	: Rolling moment coefficient
C_m	: Pitching moment coefficient
C_n	: Yawing moment coefficient
C_{l_β}	: Rolling moment coefficient with respect to side-slip angle
C_{l_p}	: Rolling moment coefficient with respect to roll rate
C_{l_r}	: Rolling moment coefficient with respect to yaw rate
$C_{l_{\delta a}}$: Rolling moment coefficient with respect to aileron deflection
$C_{l_{\delta r}}$: Rolling moment coefficient with respect to rudder deflection
C_{M_0}	: Mean Pitching moment coefficient
C_{M_α}	: Pitching moment coefficient with respect to angle of attack
$C_{M_{\delta e}}$: Pitching moment coefficient with respect to elevator deflection
C_{M_q}	: Pitching moment coefficient with respect to pitch rate
$C_{M_{\dot{\alpha}}}$: Pitching moment coefficient with respect to angle of attack rate
C_{N_β}	: Yawing moment coefficient with respect to side-slip angle
C_{N_p}	: Yawing moment coefficient with respect to roll rate
C_{N_r}	: Yawing moment coefficient with respect to yaw rate
$C_{N_{\delta a}}$: Yawing moment coefficient with respect to aileron deflection
$C_{N_{\delta r}}$: Yawing moment coefficient with respect to rudder deflection
δ_a	: Aileron deflection
δ_e	: Elevator deflection
δ_r	: Rudder deflection
$RCAM$: Research Civilization Aircraft Model
m	: Mass of the aircraft
V_p	: Velocity of the aircraft
g	: Gravity acceleration

1. INTRODUCTION

The Altitude-Hold control system is one of the most important control segment for the aircrafts. It forces the overall system on a designed altitude which is a significant flight. If the aircraft is supersonic, which is like in this study, this control system is getting important. Therefore, over the years, so many control methods were developed and studied to overcome this problem. The common method is dealing with the characteristic of the longitudinal motion of the aircraft via classical methods. Some of these methods are Eigenvalue assignment which is known as pole placement method, Root-Locus method and Routh-Hurwitz Criteria. The common feature of these methods is that they have to be all built with linear mathematical background. So that, the system has to be linearized to design and develop a proper controller.

Supersonic longitudinal flight control system is studied for the modern civil supersonic transport aircraft. Since the supersonic regime is increasing complex input command set and more nonlinearity for the aircraft, the stability augmentation system is also not easy to control (Steer, 2004). In this study, the set of input command response for one phase of flight, which is longitudinal flight, and handling qualities is revised.

Nonlinear Dynamic Inversion control method is implemented to a supersonic aircraft for the longitudinal motion to get handling qualities in steady conditions (Steer, 2001). The NDI control system is based on the pitch rate criteria and pitch attitude, and also the normal acceleration commands. Hence, the pitching motion response and behaviour is analyzed for a longitudinal flight control system in this study.

In another way, angle of attack can be used as an input command for the longitudinal control of a supersonic aircrafts (Lee, 2020). In order to increase the aerodynamic performance of the aircraft, static stability is analyzed. The longitudinal control law is based on dynamic inversion and proportional and integral control methods in this study.

In latest years of 70's, there are some flight experience beyond the altitude hold and mach hold autopilots on YF-12 aircraft at mach number 3 (Gilyard, 1978). The main reason is to obtain the maximum range at high altitude and high mach number. The controller is designed as two sections, which are high-pass filtered pitch rate feedback for inner loop with altitude rate proportional and integral gains and auto-throttle control for mach number conditions

2. AIRCRAFT PLANT MODEL

Hypothetical supersonic aircraft is evaluated for the airframe model, since the behaviour of the aircraft will be shown in this study. The controller is also designed from this plant model. The mathematical representation of the plant model is explained.

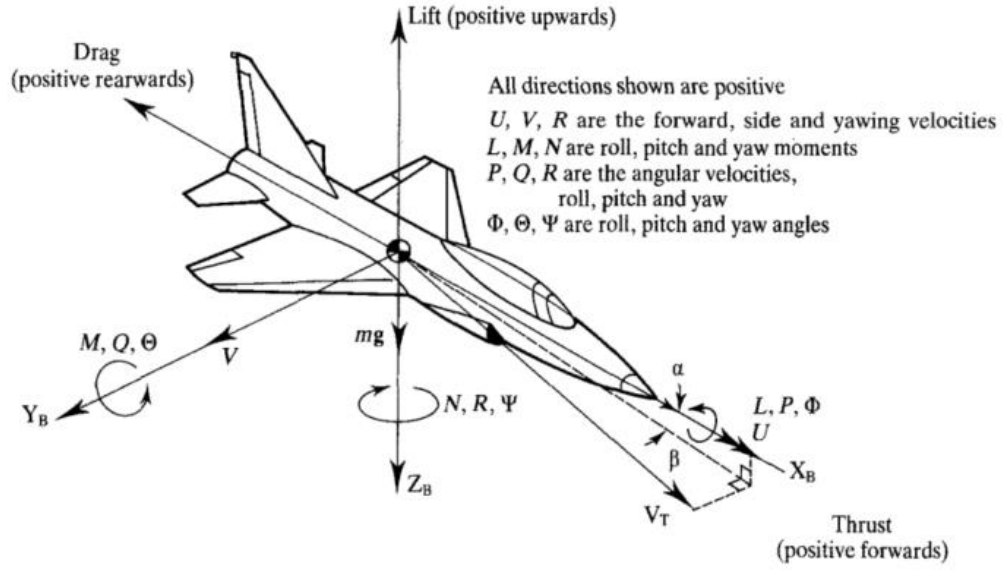


Figure 1: Body Axis System of Aircraft (McLean, 1990)

The following definitions contain the states of the dynamics for aircraft (McLean, 1990). These parameters are used for the feeding the control system and analyzing the behaviour of the aircraft. Therefore, it is useful to write the aerodynamic forces and moments and also the angular rates.

$[u, v, w, p, q, r, \Phi, \theta, \psi]^T$ are the states which will be derived from the state equations given below, and the expressions are velocity on x, y and z-axis, angular roll, pitch and yaw rates, phi, theta, psi Euler-Angles, respectively. Aerodynamic forces F_D, F_Y and F_L , drag, side and lift forces (Blakelock, 1991), are given below:

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho V_p^2 C_D, \text{ where, } C_D = C_{D0} + C_{Dc_L^2} C_L^2 + C_{Dflaps} + C_{Dcontrol\ surfaces}$$

$$\mathbf{F}_Y = \frac{1}{2} \rho V_p^2 C_Y, \text{ where, } C_Y = C_{Y\beta} \beta + C_{Y\delta_r} \delta_r \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} \rho V_p^2 C_L, \text{ where, } C_L = C_{L0} + C_{L\alpha} \alpha + C_{L\delta_e} \delta_e + C_{Lflaps} + C_{Lcontrol\ surfaces}$$

Aerodynamic moments LL, MM, NN , rolling, pitching and yawing moments, are given below:

$$\mathbf{LL} = \frac{1}{2} \rho V_p^2 S b C_l, \text{ where, } C_l = C_{l\beta} \beta + C_{l_p} \bar{p} + C_{l_r} \bar{r} + C_{l\delta_a} \delta_a + C_{l\delta_r} \delta_r$$

$$\mathbf{MM} = \frac{1}{2} \rho V_p^2 S c C_M, \text{ where, } C_M = C_{M0} + C_{M\alpha} \alpha + C_{M\delta_e} \delta_e + C_{M_q} \bar{q} + C_{M\dot{\alpha}} \dot{\alpha}_{bar} \quad (2)$$

$$\mathbf{NN} = \frac{1}{2} \rho V_p^2 S b C_N, \text{ where, } C_N = C_{N\beta} \beta + C_{N_p} \bar{p} + C_{N_r} \bar{r} + C_{N\delta_a} \delta_a + C_{N\delta_r} \delta_r$$

$$\text{Where, } \bar{p} = \frac{b}{2V_p} (p \cos \alpha + r \sin \alpha), \bar{r} = \frac{b}{2V_p} (-p \sin \alpha + r \cos \alpha)$$

$$\bar{q} = \frac{c}{2V_p} q, \quad \dot{\alpha}_{bar} = \frac{c}{2V_p} \dot{\alpha}$$

Angular rate definitions are given below:

$$\dot{p} = \frac{M_x}{I_{xx}} + (I_{yy} - I_{zz}) \frac{qr}{I_{xx}} + \frac{I_{xz}}{I_{xx}} (pq - \dot{r})$$

$$\dot{q} = \frac{M_y}{I_{yy}} + (I_{zz} - I_{xx}) \frac{rp}{I_{yy}} + \frac{I_{xz}}{I_{yy}} (r^2 - p^2) \quad (3)$$

$$\dot{r} = \frac{M_z}{I_{zz}} + (I_{xx} - I_{yy}) \frac{pq}{I_{zz}} + \frac{I_{xz}}{I_{zz}} (p - qr)$$

And, Euler-Angles are given below:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta \sin\Phi & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \frac{\sin\Phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4)$$

For the Altitude-Hold control system, the longitudinal motion of the aircraft is analyzed. Therefore, the overall longitudinal airframe structure is linearized and studied, since the method used in this study is based on linear control strategy. When the linearization is applied to the airframe, the longitudinal equations can be expressed with State-Space, transfer functions or total linear airframe.

On the translational equation for the symmetric and longitudinal flight, the wind and stability axis are coincided. There are total forces, which are aerodynamic, propulsive and gravitational forces has to be considered deriving the above perturbation equations acting along the x,y and z-axis. These are expressed below:

If G_x, G_y and G_z are the gravitational terms and P_x, P_y and P_z are the propulsive terms, the combination of these equations along the stability axes are:

$$\begin{aligned} P_{x_s} + G_{x_s} &= (P_x - mg \sin\theta) \cos\alpha + (P_z + mg \cos\theta \cos\Phi) \sin\alpha \\ P_{y_s} + G_{y_s} &= mg \cos\theta \sin\Phi \\ P_{z_s} + G_{z_s} &= (P_x - mg \sin\theta) \sin\alpha + (P_z + mg \cos\theta \cos\Phi) \cos\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

2.1. Linearization of Longitudinal Equations

Linearization to the airframe is applied by using Taylor Series expansion method. The reference or trim conditions is added up the linearized small perturbations. Therefore, the desired, reference or operating points are considered and implemented to the airframe with linearization. The trim conditions are chose to get fully longitudinal motion over the total equations of motions. So that, the lateral effects are assumed as there are no influence to the linearized system. Then, the linearized airframe is simplified and the total longitudinal motion equations are derived easily. The longitudinal motion state equations, initial states and linearization assumptions are expressed below:

Lateral effects assumptions $\rightarrow \beta = p = r = \Phi = 0$

Initial states and operating/trim points $\rightarrow V_p = V_{p_0} = \text{constant}$
 $\alpha = \alpha_0 = \text{constant}$
 $q = q_0 = 0$
 $\theta = \theta_0 = \text{constant}$

If the angle of attack operating points is chose so that the $\alpha_0 = 0$, the derivation of the linearized longitudinal motion state is simplified further:

$$\begin{aligned}
V_p &= V_{p_0} + \delta v_p \\
\alpha &= \alpha_0 + \delta\alpha; \quad \dot{\alpha} = \delta\dot{\alpha} \\
q &= q_0 + \delta q; \quad \dot{q} = \delta\dot{q} \\
\theta &= \theta_0 + \delta\theta; \quad \dot{\theta} = \delta\dot{\theta}
\end{aligned}$$

The velocity term, V_p and α , are expressed below according to above equations:

$$\dot{V}_p = \sum \frac{F_{xw}}{m} = \frac{F_D + P_{x_s} + G_{x_s}}{m} \quad (6)$$

$$\dot{\alpha} = q + \sum \frac{F_{zw}}{mV_p} = q + \frac{F_L + P_{z_s} + G_{z_s}}{mV_p} \quad (7)$$

The pitching motion terms, q and θ , are expressed below according to above equations:

$$\dot{q} = \frac{MM}{I_{yy}} \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (9)$$

If the expressions like $\cos\alpha \cong 1$, $\sin\alpha \cong \alpha$ and $C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha}\alpha + C_{L_{\delta e}}\delta e$ are considered as these values for the equations (6)-to-(9), the linearization can be simplified and expressed in a general form by using Taylor Series Expansion. Considering initial states and trim points, the equation (6) is linearized like below in order to get perturbation expression of velocity term and angle of attack:

$$\begin{aligned}
\delta\dot{v}_p &= \frac{-0.5\rho V_{p_0}^2 S}{m} (C_{D_0} + C_{D_{CL^2}} C_{L_0}^2) + \frac{-0.5\rho V_{p_0}^2 S}{m} (2C_{D_{CL^2}} C_{L_0} C_{L_\alpha}) \delta\alpha + \frac{-0.5\rho V_{p_0} S}{m} 2 (C_{D_0} + \\
&C_{D_{CL^2}} C_{L_0}^2) \delta v_p - g(\delta\theta - \delta\alpha) + \frac{P_x}{m} + \frac{P_z}{m} \delta\alpha
\end{aligned} \quad (10)$$

The equation (7) is linearized like below according to the initial states and trim points:

$$\begin{aligned}
\delta\dot{\alpha} &= \delta q + \frac{-0.5\rho V_{p_0} S C_{L_0}}{m} + \frac{-0.5\rho S C_{L_0}}{m} \delta v_p + \frac{-0.5\rho V_{p_0} S C_{L_\alpha}}{m} \delta\alpha + \frac{-0.5\rho V_{p_0} S C_{L_{\delta e}}}{m} \delta e + \frac{g}{V_{p_0}} - \frac{g}{V_{p_0}^2} \delta v_p - \\
&\frac{P_x}{mV_{p_0}} \delta\alpha + \frac{P_z}{mV_{p_0}} - \frac{P_z}{mV_{p_0}^2} \delta v_p
\end{aligned} \quad (11)$$

The equations (10) and (11) can be simplified so that the aircraft is in a level flight. In this form of flight, $\delta e = 0$. Therefore, those equations are simplified by considering following expressions:

$$\frac{\rho V_{p_0}^2 S}{2} (C_{D_0} + C_{D_{CL^2}} C_{L_0}^2) + P_x = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\rho V_{p_0}^2 S}{2} C_{L_0} = mg + P_z \quad (\text{There is no propulsion force in } z \text{ - direction, } P_z = 0) \quad (13)$$

According to equations (12) and (13), the aerodynamic coefficients can be simplified like below, if it is considered that the aircraft is in a level flight:

$$\begin{aligned}
C'_L &= C_{L_0} \\
C'_D &= (C_{D_0} + C_{D_{CL^2}} C_{L_0}^2)
\end{aligned}$$

In conclusion, the pitching moment equation is expressed and linearized below:

$$\begin{aligned} \delta \dot{q} = & \frac{0.5\rho(V_{p0})^2 Sc}{I_{yy}} C_{M_0} + \frac{0.5\rho V_{p0} Sc}{I_{yy}} 2C_{M_0} \delta v_p + \frac{0.5\rho(V_{p0})^2 Sc}{I_{yy}} C_{M_\alpha} \delta \alpha + \frac{0.5\rho(V_{p0})^2 Sc}{I_{yy}} C_{M_{\delta e}} \delta e + \\ & \frac{0.5\rho(V_{p0})^2 Sc^2}{I_{yy}} C_{M_q} \delta q + \frac{0.5\rho(V_{p0})^2 Sc^2}{I_{yy}} C_{M_{\dot{\alpha}}} \delta \dot{\alpha} + \frac{T_y}{I_{yy}} \end{aligned} \quad (14)$$

Finally, the total linearized longitudinal motion state equations can be wrote like below in a general and simplified form:

$$\delta \dot{v}_p = a_{11} \delta v_p + a_{12} \delta \alpha - a_{14} \delta \theta \quad (15)$$

$$\delta \dot{\alpha} = a_{21} \delta v_p + a_{22} \delta \alpha + a_{23} \delta q + b_2 \delta e \quad (16)$$

$$\delta \dot{q} = a_{31} \delta v_p + a_{32} \delta \alpha + a_{33} \delta q - c_{32} \delta \dot{\alpha} + b_3 \delta e \quad (17)$$

$$\delta \dot{\theta} = \delta q \quad (18)$$

Where,

$$a_{11} = -\frac{2gC'_D}{V_{p0}C'_L}, \quad a_{12} = -g(1 - 2C_{D_{c_L^2}}C_{L_\alpha}), \quad a_{14} = -g$$

$$a_{21} = -\frac{2g}{V_{p0}^2}, \quad a_{22} = -\frac{g}{V_{p0}} \left[\frac{C_{L_\alpha}}{C'_L} + \frac{C'_D}{C'_L} \right], \quad a_{23} = 1$$

$$a_{31} = 0, \quad a_{32} = \frac{mgcC_{M_\alpha}}{I_{yy}C'_L}, \quad a_{33} = \frac{mgc^2C_{M_q}}{2I_{yy}V_{p0}C'_L}$$

$$a_{43} = 1$$

$$b_2 = \frac{-gC_{L_{\delta e}}}{V_{p0}C'_L}, \quad b_3 = \frac{mgcC_{M_{\delta e}}}{I_{yy}C'_L}, \quad c_{23} = \frac{-mgc^2C_{M_{\dot{\alpha}}}}{2I_{yy}V_{p0}C'_L}$$

If the above equations is expressed in a state space form, it is like below:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \dot{v}_p \\ \delta \dot{\alpha} \\ \delta \dot{q} \\ \delta \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_p \\ \delta \alpha \\ \delta q \\ \delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix} \delta e \quad (19)$$

3. ALTITUDE-HOLD CONTROL SYSTEM BEYOND LONGITUDINAL MOTION

Since the longitudinal motion state equations are linearized, the further control methods can be applied to the linear airframe. Applying those methods lead to get a proper, optimized control constant coefficient for the system by using suitable control rules such as Root-Locus, Routh-Hurwitz Criteria. However, the first thing is to guarantee the static stability for the aircraft.

The controller which is designed in this study has two sections. The first one is the inner loop which consists of pitching motion expressions. The pitching motion expression is dealing with the pitching angle, θ (*linearized* $\cong \delta\theta$), for the system by choosing and controlling the elevator displacement, δe . The second section is the outer loop which contains the altitude, flight-path angle and velocity calculations. The controller for the outer loop is designed when a suitable and optimized inner loop controller is developed.

3.1. Inner Loop Controller Design

The pitching motion expression has to be expressed in linear form in order to design the controller. Therefore, the pitching angle, θ (*linearized* $\cong \delta\theta$), is used from the linearized state equations with respect to the elevator displacement, δe . After the static stability conditions for this state is guaranteed and analyzed, the proper controller coefficients is derived for the inner loop.

From the equations (15)-to-(18), the following transfer function of pitching angle with respect to elevator displacement can be obtained and expressed in equation (20a):

$$\frac{Y_{\theta\delta e}(s)}{\delta e(s)} = \frac{(b_3 - c_{32}b_2)s^2 + [b_2(c_{32}a_{11} + a_{32}) - b_3(a_{11} + a_{22})]s + b_3(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}) - b_2a_{32}a_{11}}{Den(s)} \quad (20a)$$

Where,

$$Den(s) = s^4 + (c_{32} - a_{11} - a_{22} - a_{33})s^3 + [a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} + a_{33}(a_{11} + a_{22}) - c_{32}a_{11} - a_{32}]s^2 + [c_{32}a_{21}a_{14} + a_{32}a_{11} - a_{33}(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12})]s + a_{32}a_{21}a_{14} \quad (20b)$$

When the pitching motion analyzed, it can be divided into two sections which are short-period and phugoid motion. At first, it is better to guarantee the stability for short-period approximation, since the roots of the transfer operators are closer to the imaginary axis (unstable region). If the stability is guaranteed in this period of motion, the other periods can follow the reference commands in a stable way. The other reason of using the short-period approximation at first is that the derivation of the velocity does not affect the angle of attack. Therefore, the designing of the controller can be studied with different velocity regimes.

$$\frac{Y_{\theta\delta e}(s)}{\delta e(s)} = \frac{\left(\frac{b_3 - b_2c_{32}}{a_{22}a_{33} - a_{32}}\right)s + \left(\frac{b_2a_{32} - b_3a_{22}}{a_{22}a_{33} - a_{32}}\right)}{s\left[\left(\frac{1}{a_{22}a_{33} - a_{32}}\right)s^2 + \left(\frac{c_{32} - a_{33} - a_{22}}{a_{22}a_{33} - a_{32}}\right)s + 1\right]} = \frac{-0.7206s - 0.5144}{0.03087s^3 + 0.08553s^2 + s} \quad (21)$$

The characteristic equation of the equation (21) has to be analyzed for the static stability in order to decide and understand whether the aircraft is stable in level flight or not. Root-Locus method is used for analyzing the static stability. The Figure 2 shows the expression beyond the pole and zero branches of the pitching motion of the linearized aircraft airframe:

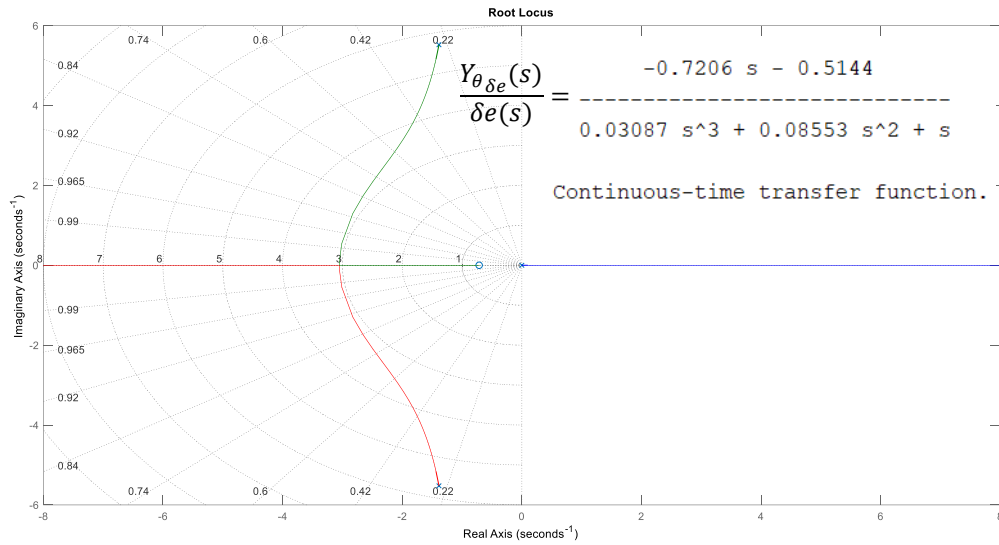


Figure 2:Root-Locus Diagram of Theta over Elevator Displacement

The result for the pitching angle by feeding a small elevator displacement motion can be seen in Figure 3:

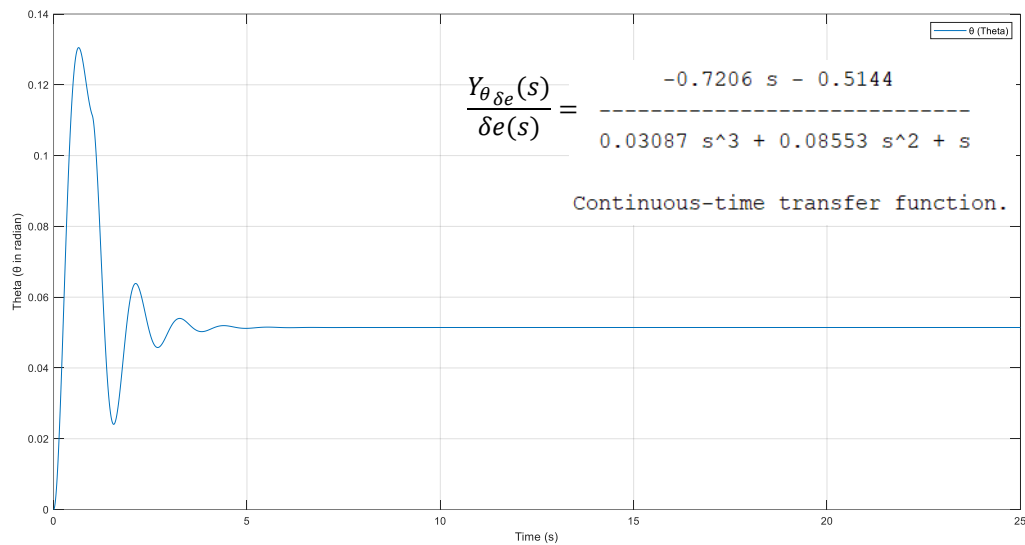


Figure 3: Time response of Pitching Angle Theta

The further dynamic which will be applied to the inner loop pitching motion is the elevator servo dynamics. This dynamic leads to the system in a more reality analysis. The common servo dynamic in terms of transfer function expression is like below:

$$Y_{elevator}(s) = -\frac{10}{s+10} \tag{22}$$

When the equations (21) and (22) are considered as the inner loop plant transfer operator, it is better to analyze the static stability by multiplying of these two equations, since they can be considered as a combined open-loop transfer function.

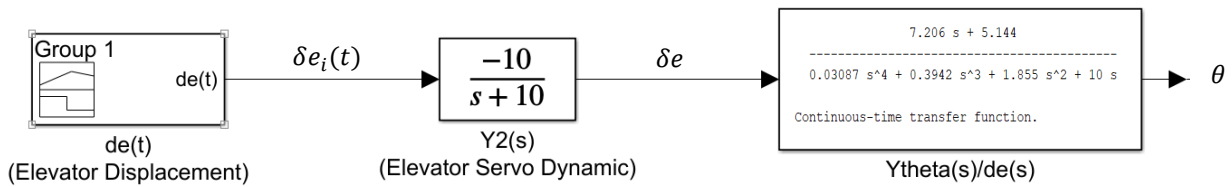


Figure 4: Body Diagram of Elevator Servo and Theta over Elevator Displacement Tr. Function

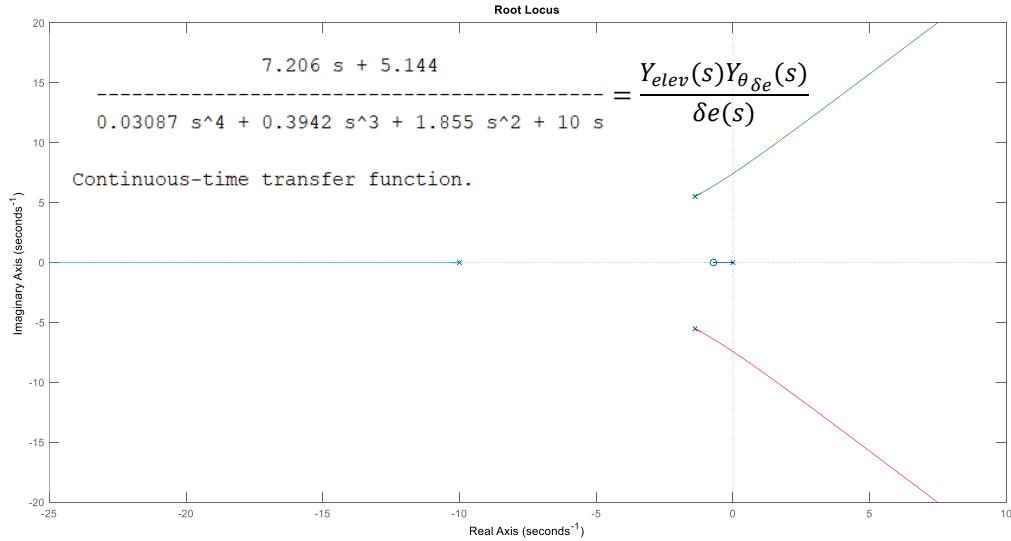


Figure 5: Root-Locus Diagram of Elevator Servo and Theta over Elevator Displacement Tr. Function

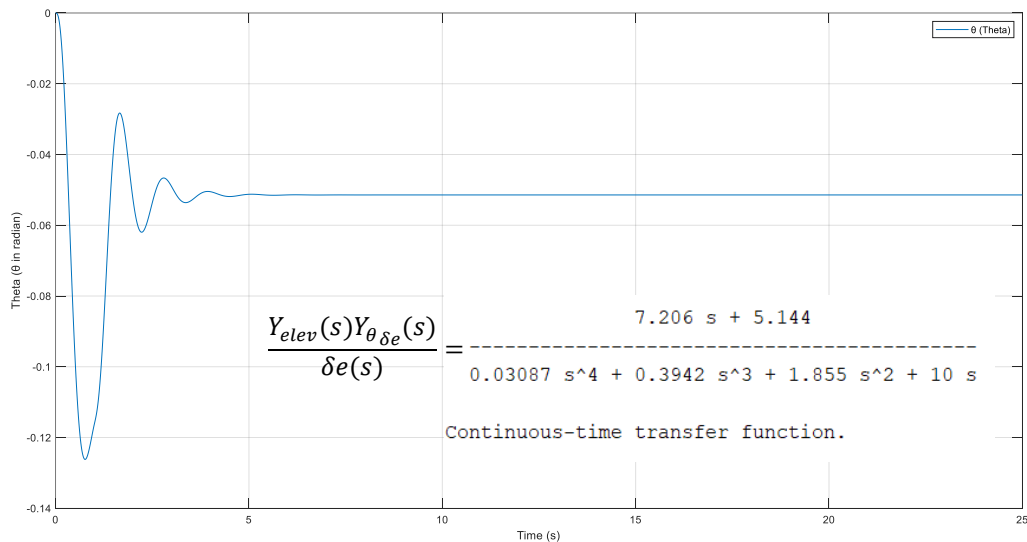


Figure 6: Time response of Elevator Servo and Theta over Elev. Displ.

According to the Figure 5 and Figure 6, the system more stable if it is compared with the Figure 2 and Figure 3. The way which has to be followed should be adding poles and zeros to the controller, in order to get the pitching angle following the reference pitching angle. The following diagram shows that the inner loop with the controller:

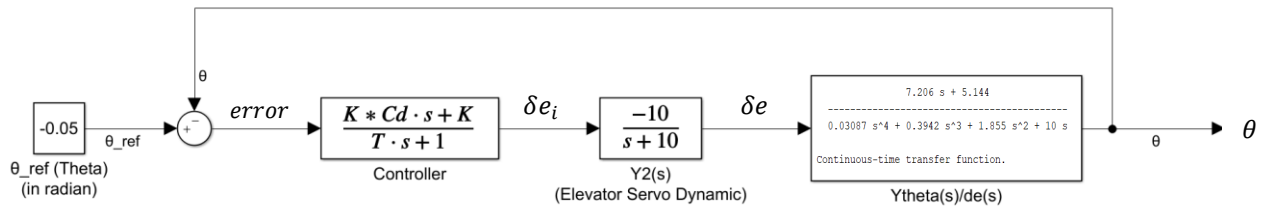


Figure 7: Body Diagram of Inner Loop Control System

If the Figure 5 is analyzed, it can be seen that the place of the controller coefficients can be estimated roughly in Root-Locus diagram. However, to get an optimum solution, Routh-Hurwitz Criteria can be used. The controller transfer operator is below:

$$C(s) = \frac{K(C_d s + 1)}{T s + 1} \tag{23}$$

Inserted additional pole to the plant is equal to $\rightarrow s = -1/\tau$

Inserted additional zero to the plant is equal to $\rightarrow s = -1/C_d$

If the above expressions are placed to the Root-Locus diagram like below, the approximate control is applied to the inner loop. For the sake of approximation, the point A which is shown in Figure 8 can be chose as an inserted additional zero-branch position for the system.

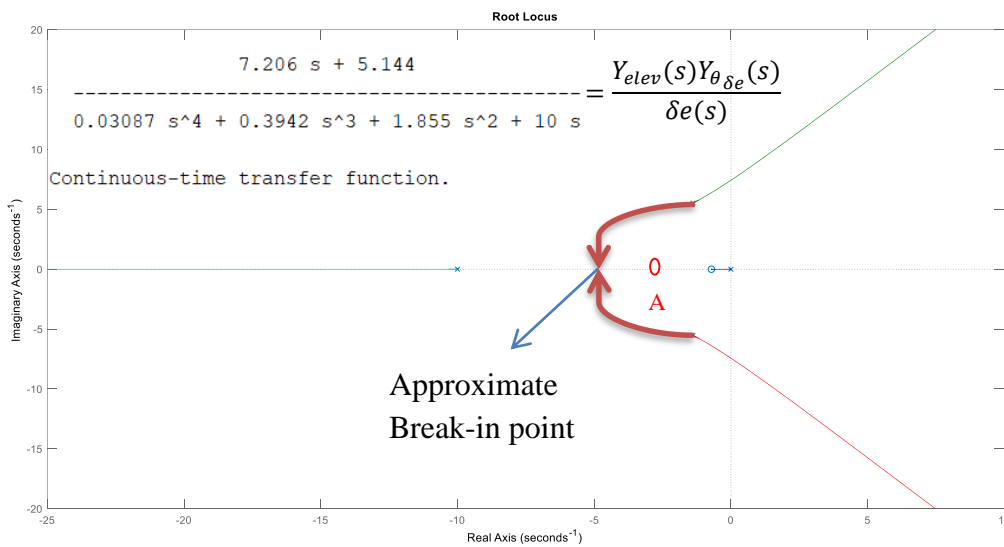


Figure 8: Approximate Zero Branch placement to Root-Locus Diagram

Then, the inserted pole branch is placed a little far away from the pole at negative side, which is shown in Figure 9 with red star. In this case, the integrated pole goes to negative infinity asymptote, and the conjugate pole pair can be forced to diverge from the imaginary axis which is unstable region critical area. So that, two pole branches go to the other asymptotes by staying at the negative side of the Root-Locus diagram. This leads to the system for choosing controller gain without any doubt in terms of stability. The expression of this manipulation is explained graphically below:

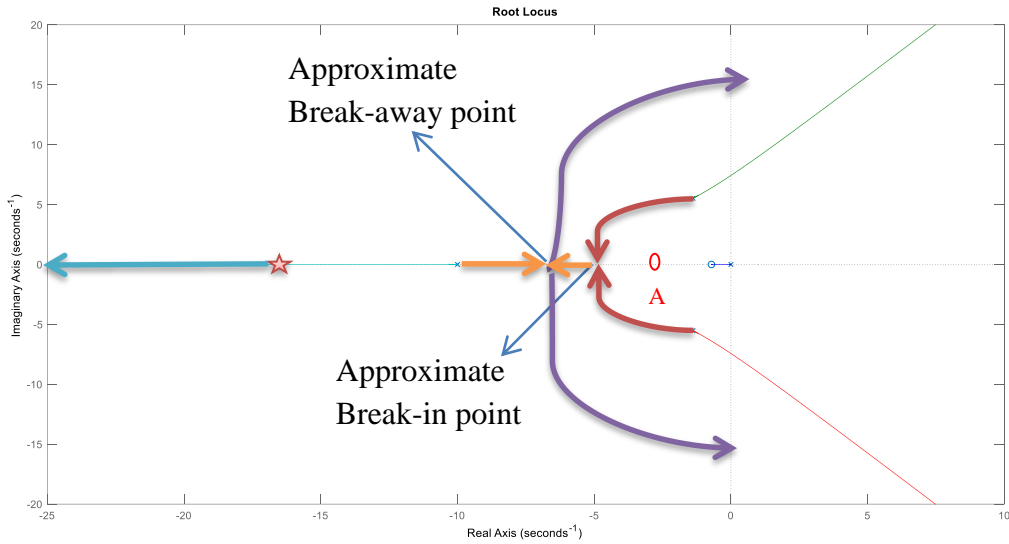


Figure 9: Approximate Pole Branch placement to Root-Locus Diagram

The approximate places of the inserted pole and zero branches are shown at Figure 9. The remain proportional constant can be chose from the lines which are going to the asymptotes, freely in every bound, since the system is stable for each condition of this flight regime. A rough controller design can be analyzed in this way. However, in order to choose a proper and optimum solution for the inner loop. The total closed-loop transfer function is expressed below:

$$G_{inner}(s) = C(s)Y_2(s)Y_{\theta_{\delta e}}(s) = \frac{K(C_d s + 1)(7.206s + 5.144)}{(\tau s + 1)(0.03087s^4 + 0.3942s^3 + 1.855s^2 + 10s)} \tag{24}$$

Implementing the reasonable pole and zero branch positions for the above closed-loop transfer function, $G_{inner}(s)$, the following controller constants can be established:

$$\begin{aligned} \tau &= 0.05 \\ C_d &= 0.2 \end{aligned}$$

Above results for the controller coefficients leads to the total system in Root-Locus diagram like below:

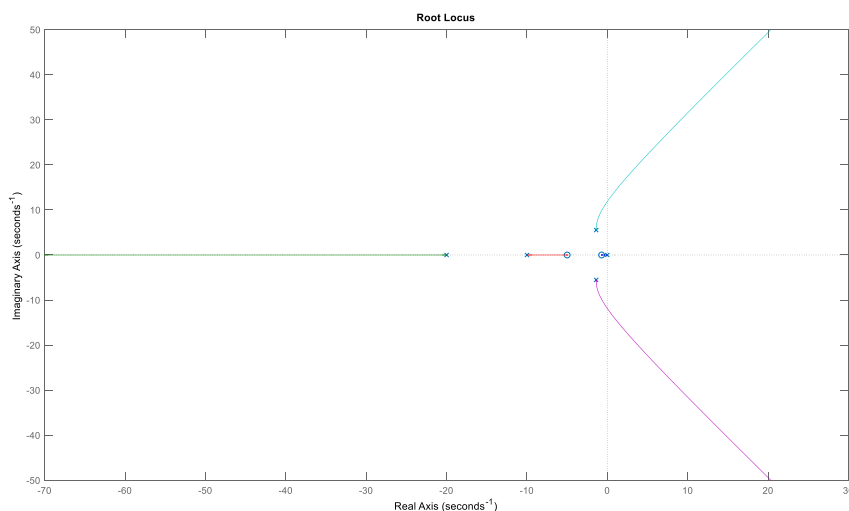


Figure 10: Root-Locus Diagram of Plant with Controller

The Root-Locus diagram in Figure 10, is not comparable with the desired one at Figure 9. This is not a reliable solution for this plant, because the system can behaves unstable motion at some trim and reference conditions. Therefore, the conjugate pole pairs can be forced to the negative right hand side (stable region) by one more inserting same additional pole and zero branches. This leads the systems to an expression like in equation 25:

$$G_{inner}(s) = C(s)Y_2(s)Y_{\theta_{\delta e}}(s) = \frac{K(C_d s + 1)^2(7.206s + 5.144)}{(\tau s + 1)^2(0.03087s^4 + 0.3942s^3 + 1.855s^2 + 10s)} \quad (25)$$

In above equation, the characteristic of the open-loop transfer function is expressed in Figure 11 with Root-Locus diagram:

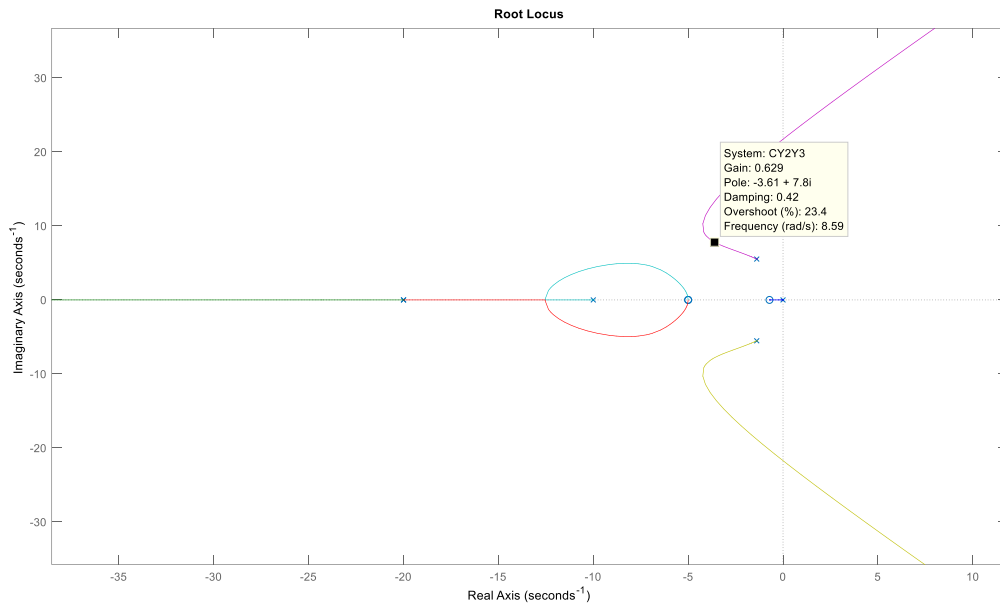


Figure 11: Root-Locus Diagram of Plant with proper Controller

In above diagram, the pole and zero branches behave like the system is in stable for most conditions. The proportional gain of the controller can be chose without any doubt of unstable conditions. It is analyzed and experienced that the K gain satisfy the damping ratio with a reasonable result. In this combination of the “ τ and C_d ”, K (proportional gain) can be chose as 0.629 with respect to 0.42 damping ratio, which is a good approach for a supersonic aircraft.

3.2. Outer Loop Controller Design

Since the inner loop control loop is established in a stable conditions, the outer loop of the altitude hold controller system beyond the longitudinal motion can be studied freely. For the simplicity, the closed-loop transfer function of the inner loop controller can be written as below:

$$G_{inner_{CL}}(s) = \frac{C(s)Y_2(s)Y_{\theta_{\delta e}}(s)}{1 + C(s)Y_2(s)Y_{\theta_{\delta e}}(s)} = \frac{0.1813s^3 + 1.942s^2 + 5.827s + 3.236}{0.0001s^6 + 0.0041s^5 + 0.0749s^4 + 0.786s^3 + 4.798s^2 + 15.83s + 3.236} \quad (26)$$

The outer loop consists of the following equations:

$$\dot{h} = V_p \sin(\theta - \alpha) = V_p \sin \gamma \quad (27)$$

Integrating the equation (27) will lead to get the current altitude value of the system. When taking difference of the current and reference input of the altitude, the error is controlled with a proportional gain and feeding to the reference input of the inner control loop, which is θ_{ref} .

The outer loop controller gain can be found by using the same method of the inner loop control system design. However, the inner loop is stabilizing so fast. Therefore, the outer loop controller gain can be chose as the reducing the rank of the reference altitude input, since it is too big numerically with respect to the other inputs. The controller gain is chose with a constant value of 0.004 for the simplicity.

Hence, the outer loop is designed as tracking the reference altitude input, the characteristic of the controller behaves as holding the altitude at the reference input. The total body diagram of the “Altitude-Hold Control System” is expressed in Figure 12:

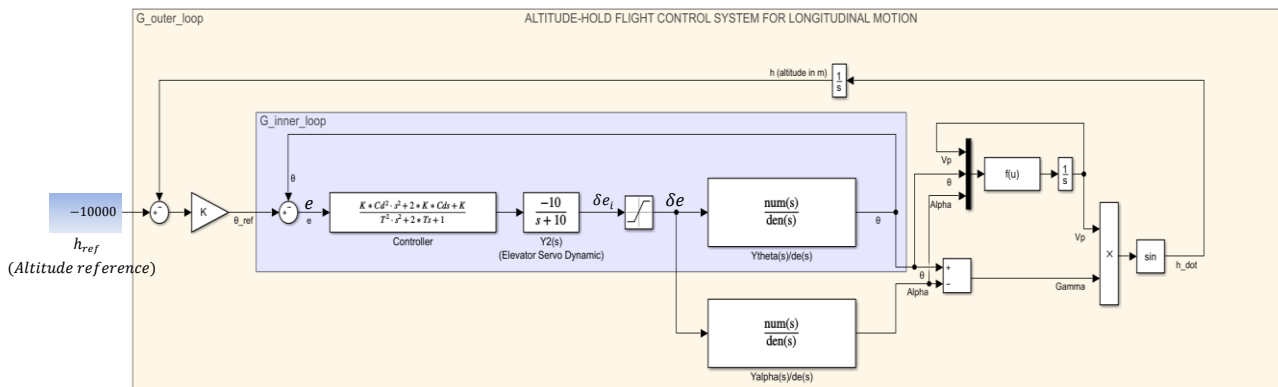


Figure 12: Altitude-Hold Flight Control System Body Diagram

Following example shows that the given reference altitude is stabilized rapidly by analyzing the Figure 13:

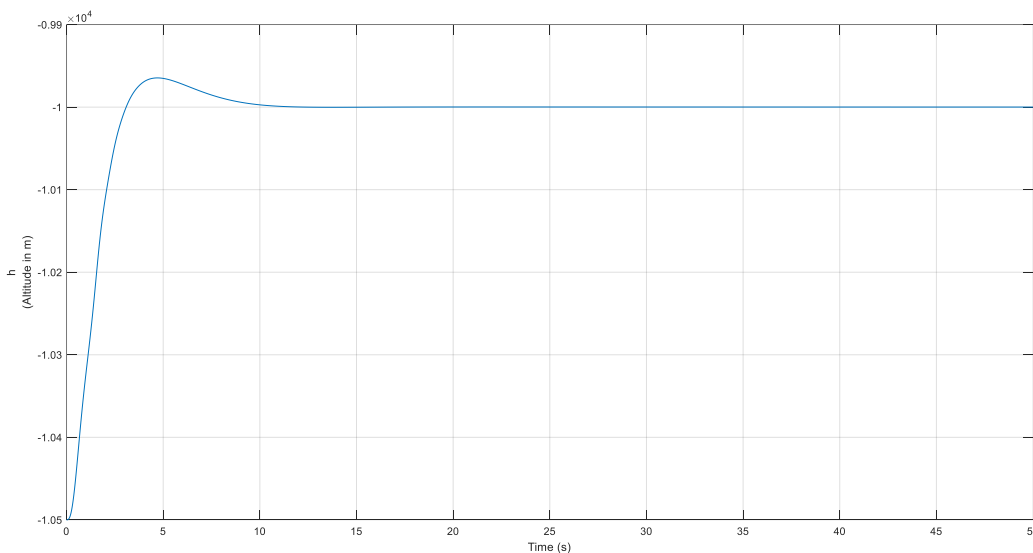


Figure 13:Altitude response of Altitude-Hold Flight Control System

The corresponding pitching motion angles and elevator displacement of the plant can be seen in Figure 14:

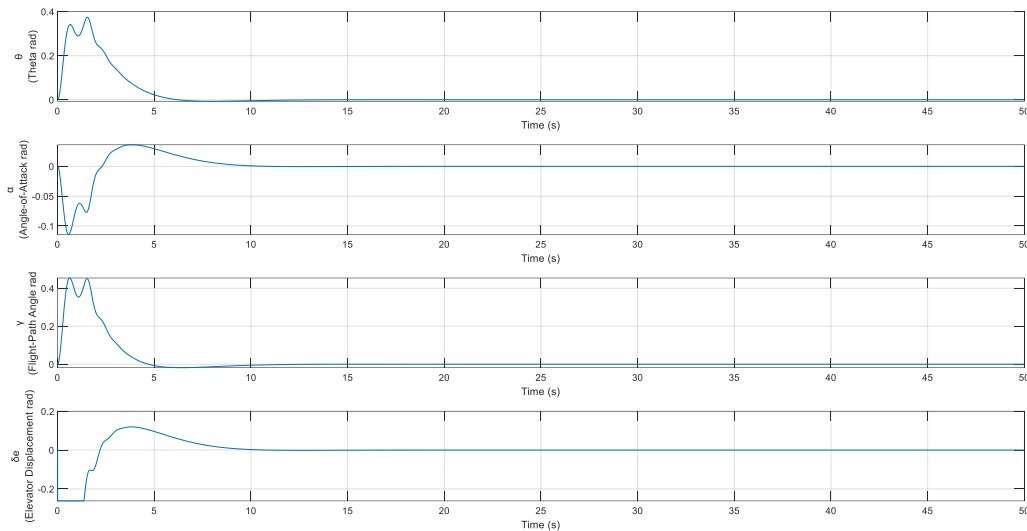


Figure 14: Angles of Pitching Motion and Elev. Displ. responses

4. CONCLUSION

The stabilization of the short-period approximation for supersonic aircraft is completed in this study, at first. Total longitudinal airframe is linearized in order to analyze at steady, equilibrium points and to control with the conventional methods. The design of the controller is based on two stages, which are inner loop and outer loop controllers. The inner loop is dealt with making the longitudinal motion airframe steady at reference pitching motion. The controller design is completed via Root-Locus analysis. At first, a desirable controller is estimated for the current longitudinal motion airframe. Then, the proper controller gains are established by studying several controller designs according the desirable and reliable Root-Locus diagram behaviour. The suitable gains are chose to implement and complete the inner loop controller design.

The outer loop controller design is based on keeping the calculated and measured altitude of the aircraft at the reference altitude input. Therefore, the altitude motion expressions are developed and formed so that the airframe gives the calculated output for feeding back to the reference input section. The evaluating the control variable for the control method is established by choosing the proportional control gain such as the rank of the altitude is acceptable and easy to be calculated by the controller numerically.

In this study, the importance of stabilizing the short-period motion of the aircraft is experienced. The reason of using this motion of study is that it makes the aircraft moves around the critical regions. In terms of Root-Locus diagram, the steady-state response of the aircraft is close to the imaginary axis, which is critical limit of the unstable region. Therefore, the importance of stabilizing this motion leads to guaranteed stable motion of the aircraft at each longitudinal flight regimes. The other reason is that the velocity component of the airframe does not affect to the angle of attack. Hence, the derivation of the velocity does not affect to the longitudinal motion, which means that the analyzing of this motion can be easy to study. It can be worked at every flight velocity regimes.

Authors' Contributions

Contributions of authors to the article are equal.

In this study, Muammer KALYON contributed about idea, critics, analysis, comment and method suggestions. Ahmet Hulusi ÖZ contributed about searching, implementation, simulation, analysis, comment, literature review and writing of the article.

Acknowledgement

Authors thanks to Turkish Aerospace since it provided working environment during the study.

Statement of Interest Conflict

There is no interest confliction between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publishing ethics are taken into account in this study.

REFERENCES

Blakelock, J.H., (1991), *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, A Wiley-Interscience Publication, 669, Canada.

Gleen, B., (1978), *Flight Experience with Altitude Hold and Mach Hold Autopilots on the YF-12 Aircraft at Mach 3*, NASA Flight Research Center Edwards, CA, United States.

Lee, D., (2020), "Angle-of-Attack Command Longitudinal Control for Supersonic Advanced Trainer Aircraft", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 22, 120–128.

McLean, D., (1990), *Automatic Flight Control Systems*, Prentice Hall International, 610, UK.

Steer, A.J., (2001), *Flight Control for Advanced Supersonic Transport Aircraft Handling Quality Design*, Cranfield University, PhD Thesis, UK.

Steer, A.J., (2004), "Supersonic Transport Aircraft Longitudinal Flight Control Law Design", *The Aeronautical Journal*, 108(1084), 319-329.



Research Article / Araştırma Makalesi

ESTIMATING DOMINANT PARAMETERS OF AIRCRAFT LINEAR DYNAMICAL MODEL VIA LEAST SQUARE METHOD

EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ İLE DOĞRUSAL DİNAMİK UÇAK MODELİNİN DOMİNANT PARAMETRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Mehmet ŞAHİN¹

Muammer KALYON²

Corresponding Author / Sorumlu Yazar
mehmet.sahin3@tai.com.tr

Received / Geliş Tarihi
07.05.2021

Accepted / Kabul Tarihi
03.06.2021

Abstract

Parameter estimation methods are used to create mathematical models for systems with input and output. In this article, the least squares method (LS) for aircraft is proposed. This method is used to write a realistic equation of the mathematical relationship between physical quantities that vary depending on each other. The parameters of the transfer functions formed as a result of the aircraft mathematical model were estimated with the LS method. Thus, the algorithm of the LS method was created and the results obtained in the MATLAB/Simulink program were shared. As a result of the estimated transfer functions, some aerodynamic coefficients are estimated. In addition, the Integral Square Error (ISE) table has been extracted to see the approximation of the LS method to the real data. this table is also created for transfer functions and aerodynamic parameters. Thus, the error rate of the method was observed.

Keywords: Aerodynamic parameters, aircraft control surfaces, Least Square (LS) method, parameter estimation, system identification.

Öz

Girişi ve bu girişe göre çıkışı olan sistemlere matematiksel model oluşturmak için parametre tahmin metodları kullanılmaktadır. Bu makalede, hava aracında kullanılmak üzere tahmin metodu olan en küçük kareler metodu (LS) önerilmektedir. Bu yöntem, birbirine bağlı olarak değişen iki fiziksel büyüklük arasındaki matematiksel bağlantıyı, gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılır. LS metodu kullanılarak hava aracı matematiksel modeli neticesinde oluşan transfer fonksiyonlarının parametreleri tahmin edilerek çıkarılmıştır. Böylece LS metodunun algoritması çıkarılmış ve MATLAB/Simulink programında elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca tahmin edilmiş transfer fonksiyonları neticesinde bazı aerodinamik katsayılar tahmin edilmiştir. Son olarak LS metodunun gerçek verilere yaklaşımını görmek için İntegral Kare Hatası (ISE) tablosu çıkarılmıştır. ISE tablosu tahmin edilen transfer fonksiyonları ve aerodinamik katsayılar için oluşturulmuştur. Böylece metodun hata oranı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik parametreler, En Küçük Kareler (LS) Metodu, parametre tahmini, sistem tanımlama, uçak kontrol yüzeyleri.

²This publication was produced from the Master thesis of Mehmet ŞAHİN in the Mechatronics Engineering Program of Istanbul Commerce University, Institute of Science and Technology.

¹Istanbul Commerce University, Institute of Science and Technology, Department of Mechatronics Engineering, Küçükyalı, İstanbul, Turkey. mehmet.sahin3@tai.com.tr, Orcid.org/0000-0001-9399-8559.

²Istanbul Commerce University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Küçükalyalı, İstanbul, Turkey.
mkalyon@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8168-2773.

1. INTRODUCTION

Systems are structures with input and output based on specific measurements and observations. If the defined input and output values exist, the current system definition process continues. System identification is a discipline that provides the most suitable representation for a system and answers to the inverse problem when its behavior is examined as a result of many observations (Jategaonkar, 2006). The inverse problem, namely the system identification, has been a fundamental element of defining any system under consideration and having the knowledge to examine that system. As we have explained the system, is a physical system with inputs and outputs in aircraft. System identification procedures perform the process of estimating the mathematical model of this physical system.

Aviation is one of the areas where system identification is most commonly used. System identification is employed in aerospace, such as flight performance analysis, estimation of aircraft parameters, and air vehicle models/submodels verification. It may be stated that system identification in aerospace intends to investigate the behavior of the aircraft via flight test data.

There is more than one method used in this context. One of them is the least squares method described in this paper. The data gathered by any application in real life is analyzed in a tabular form, and a function that models the collected data is tried to be found. It is often difficult to find a function that fits this data sheet exactly; The function that best fits the data table is tried to be determined. Regression analysis is an analysis method used to measure the relationship between two or more quantitative variables. One of the most used techniques in regression analysis is the least squares method. In this paper, LS methods are explained, and The estimation process of some parameters in transfer functions obtained as a result of the mathematical model of an aircraft is explained. It has been observed to what extent LS methods give results. The original data were compared with the LS method, and graphs were acquired in the time domain for each control surface to measure the accuracy of the results. After the transfer functions were evaluated, the estimation of some aerodynamic coefficients using the LS method's predicted values was also performed by the functions. A table compared with the values taken initially as the basis is specified in this context. An integral Square Error (ISE) table has been prepared to show how accurately it is estimated between this method and the original data.

2. MATHEMATICAL MODEL OF AIRCRAFT

The aircraft system identification is involved with implementing a mathematical expression for aerodynamic forces and moments in terms of relevant, measurable quantities such as control surface deviations, aircraft angular velocities, airspeed, or Mach number. Aerodynamic parameters characterize the interdependence of aerodynamic forces and moments on measurable quantities when the mathematical model is parametric. It is crucial to have a mathematical model of the aircraft to compute the parameters. The mathematical model of the aircraft also covers both equations of motion and equations for aerodynamic forces and moments recognized as aerodynamic equations. The traditional aircraft control and simulation book was used to create a mathematical model of an aircraft (Stevens, Lewis and Johnson, 2016). Again, the system identification book for conventional aircraft was used in mathematical model formation and system identification (Klein and Morielli, 2006). Figure 1 presents the components on the aircraft related to the notation that will be interpreted in this section.

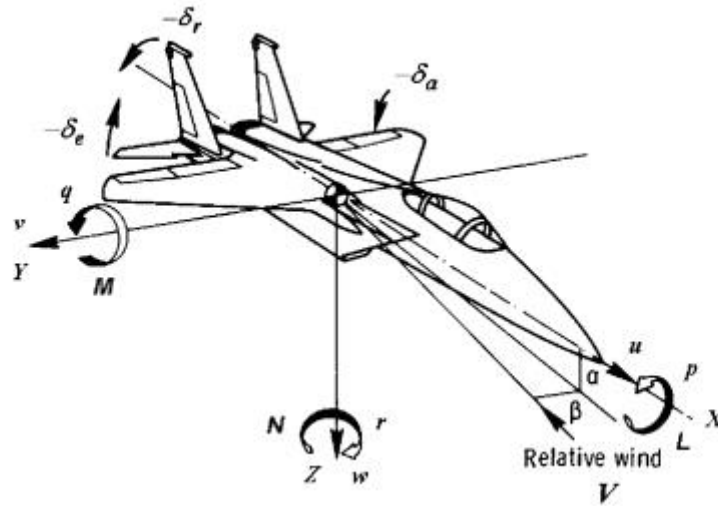


Figure 1. u, v, w = body-axis components of aircraft velocity relative to Earth axes; p, q, r = body-axis components of aircraft angular velocity; X, Y, Z = body-axis components of aerodynamic force acting on the aircraft; and L, M, N = body-axis components of aerodynamic moment acting on the aircraft (Morielli and Klein, 2006)

2.1. Aircraft Equation and Motion

The general motion is revealed as Equations (1) and (2) in the forms of translation and rotation by Newton's second law of motion.

$$F = \frac{d}{dt}(mV) \quad (1)$$

$$M = \frac{d}{dt}(I\omega) \quad (2)$$

where F is the force, mV is the linear momentum, m is the mass, V is the translational velocity, M is the moment, $I\omega$ is the angular momentum, ω is the angular velocity, and I is the inertia matrix. Equations 1 and 2 are vector equations describing translation and rotational motion. Each vector equation expresses three scalar Equations for vector components. Thus, six scalar Equations are formed for six degrees of freedom for aircraft motion. Below, the body axis components of the force, velocity, moment and angular velocity expressions in Equations 1 and 2 are specified in $F = [F_x \ F_y \ F_z]^T$, $V = [u \ v \ w]^T$, $M = [M_x \ M_y \ M_z]^T$, $\omega = [p \ q \ r]^T$.

Thus, the angular momentum expression is specified in Equation (3) to be used to find moment Equations.

$$I\omega = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \rightarrow I\omega = \begin{bmatrix} I_x p - I_{xz} r \\ I_y q \\ -I_{xz} p + I_z r \end{bmatrix} \quad (3)$$

I inertia matrix symmetric matrix, where $I_{xy} = I_{yx} = I_{yz} = I_{zy} = 0$.

Equations (4) and (5) are formed by combining Equations (1) and (2). These equations are vector forms of the equations of motion expressed on the body axis.

$$F = m\dot{V} + \omega \times mV \quad (4)$$

$$M = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \quad (5)$$

In the framework of the expression in Equation (1) and (2), when the components of Equation (3) and body axis are put into Equation (4) and (5), the components of force and moment equations in Equation (6) and (7) are found.

Force Equations:

$$\begin{aligned} F_x &= m(\dot{u} + qw - rv) \\ F_y &= m(\dot{v} + ru - pw) \\ F_z &= m(\dot{w} + pv - qu) \end{aligned} \quad (6)$$

Moment Equations:

$$\begin{aligned} M_x &= \dot{p}I_x - \dot{r}I_{xz} + qr(I_z - I_y) - qpI_{xz} \\ M_y &= \dot{q}I_y + pr(I_x - I_z) + (p^2 - r^2)I_{xz} \\ M_z &= \dot{r}I_z + \dot{p}I_{xz} + pq(I_y - I_x) + qrI_{xz} \end{aligned} \quad (7)$$

For aircraft, the forces and moments of the previous equations consist of aerodynamics, gravity, and thrust. Thus, Equations (4) and (5) are expressed as Equations (8) and (9) as follows.

$$\underbrace{F_A + F_T + F_G}_{\Sigma F} = m\dot{V} + \omega \times mV \quad (8)$$

$$M_A + M_T = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \quad (9)$$

Components of aerodynamic forces and moments affecting the aircraft are shown in Equations (10) and (11).

$$F_A = \bar{q}S \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_A = \bar{q}S \begin{bmatrix} bC_l \\ cC_m \\ bC_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

where $\bar{q} = 0.5\rho V^2$ is the dynamic pressure, V is the airspeed, ρ is the air density, S is the wing area, b is the wing span, and c is the chord length. In Equation (12), (13) and (14) expressed component of gravity, thrust force and thrust moment vector.

$$F_G = \begin{bmatrix} -mg\sin\theta \\ mg\cos\theta\sin\phi \\ mg\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F_T = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Hence, aerodynamic forces and moments are presented in Equations (15) and (16).

Force Equations:

$$\begin{aligned} m\dot{u} &= m(rv - qw) + \bar{q}SC_x - mg\sin\theta + T \\ m\dot{v} &= m(pw - ru) + \bar{q}SC_y + mg\cos\theta\sin\phi \\ m\dot{w} &= m(qu - pv) + \bar{q}SC_z + mg\cos\theta\cos\phi \end{aligned} \quad (15)$$

Moment Equations:

$$\begin{aligned} \dot{p}I_x - \dot{r}I_{xz} &= \bar{q}SbC_l - qr(I_z - I_y) + qpI_{xz} \\ \dot{q}I_y &= \bar{q}ScC_m - pr(I_x - I_z) - (p^2 - r^2)I_{xz} + I_p\Omega_p r \\ \dot{r}I_z - \dot{p}I_{xz} &= \bar{q}SbC_n - pq(I_y - I_x) - qrI_{xz} - I_p\Omega_p q \end{aligned} \quad (16)$$

2.2. Rotational Kinematic Equations

Rotational kinematic equations connect the rate of change of Euler angles to the body axis relation of angular velocity and it is expressed in Equation (17).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.3. The Linearized Equations of Motion

Highly nonlinear Equations are linearized to easily investigate aircraft motions and behaviors (Blakelock, 1991). In this section, the linearization of the plane motion equations for both longitudinal and lateral motion is described to reveal the transfer functions to be analyzed for the system identification process detailed as follows. As a result of linearization, transfer functions will be obtained without any complexity, and system definition will be implemented more efficiently.

2.3.1. The linearized longitudinal equations

States of the longitudinal motions that are aircraft velocity (v_p), angular velocity pitch component (q), pitch angle (θ) and angle of attack (α). Before performing the linearization process, the nonlinear forms of the state are given in Equation (18-20).

$$\dot{v}_p = \frac{-0.5\rho(v_{p_0} + v_p)^2 S C_D}{m} + \left(\frac{P_x}{m} - g\sin\theta\right)\cos\alpha + \left(\frac{P_z}{m} + g\cos\theta\right)\sin\alpha \quad (18)$$

$$\dot{\alpha} = q - \frac{-0.5\rho(v_{p_0} + v_p)S(C_L)}{m} + \frac{g}{v_{p_0} + v_p} - \frac{P_x\alpha}{m(v_{p_0} + v_p)} + \frac{P_z}{m(v_{p_0} + v_p)} \quad (19)$$

$$\dot{q} = \frac{-0.5\rho(V_{p_0}+v_p)^2 Sc(C_{M_0}+C_{M_\alpha}+C_M)}{I_{yy}} + \frac{-0.5\rho(V_{p_0}+v_p)ScC_M}{I_{yy}} \quad (20)$$

For linearization the equilibrium points of states are $v_p = V_{p_0}$, $\alpha = \alpha_0 = 0$, $\theta = \theta_0 = 0$ and $q = 0$. Thus, the linearized longitudinal motion equations for \dot{V}_p , $\dot{\alpha}$, \dot{q} , $\dot{\theta}$ are expressed in Equation (21-24).

$$\dot{V}_p = \frac{-2g(C_{D_0}+C_{D_{CL^2}}C_{L_0}^2)}{V_{p_0}C_L}v_p + g\left(1 - 2C_{D_{CL^2}}\frac{C_{L_0}}{C_L}C_{L_\alpha} + \frac{P_z}{m}\right)\alpha - g\theta \quad (21)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{-g}{V_{p_0}^2}\left(1 + \frac{C_{L_0}}{C_L} + \frac{P_z}{mg}\right)v_p - \left(\frac{g}{V_{p_0}}\frac{C_{L_\alpha}}{C_L} + \frac{P_x}{mV_{p_0}}\right)\alpha - \frac{g}{V_{p_0}}\frac{C_{L\delta_e}}{C_L}\delta_e + q \quad (22)$$

$$\dot{q} = \frac{2mgcC_{M_0}}{I_{yy}V_{p_0}C_L}v_p + \frac{mgcC_{M_\alpha}}{I_{yy}C_L}\alpha + \frac{mgc^2C_{M\dot{\alpha}}}{2I_{yy}V_{p_0}C_L}\dot{\alpha} + \frac{mgc^2C_{Mq}}{2I_{yy}V_{p_0}C_L}q + \frac{mgcC_{M\delta_e}}{I_{yy}C_L}\delta_e \quad (23)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (24)$$

These equations are specified in the form of vector notation in Equation (25) as follows.

$$C\dot{X} = AX + B\delta_e \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_p \\ \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & -g \\ a_{21} & a_{22} & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_e \quad (25)$$

where,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & -g \\ a_{21} & a_{22} & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\hat{A} = C^{-1}A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & -g \\ a_{21} & a_{22} & 1 & 0 \\ \hat{a}_{31} & \hat{a}_{32} & \hat{a}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = C^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26a)$$

C is invertible matrix. Therefore it can be move to do right hand side of the Equation (25). Component of the A and B matrix detailed expressions can be obtained from the coefficient linearized longitudinal motion equations for \dot{v}_p , $\dot{\alpha}$, \dot{q} , $\dot{\theta}$. Equation (26) is given in Equation (27). Some assumptions were made while generating the coefficients in Equation (27) (Howe, 1980). These assumptions are set out below.

- P_z is neglected, the z component of powerplant force
- $C_{L_0} = C_L$
- $C_{M_0} = 0$
- $C_D = C_{D_0} + C_{D_{CL^2}}C_{L_0}$
- $\frac{P_x}{m} = \frac{gC_D}{C_L}$

$$\begin{aligned}
c_{32} &= -\frac{mgc^2C_{M\dot{\alpha}}}{2I_{yy}V_{p_0}C_L} & a_{32} &= \frac{mgcC_{M\alpha}}{I_{yy}C_L} \\
a_{11} &= -\frac{2gC_D}{V_{p_0}C_L} & a_{33} &= \frac{mgc^2C_{MQ}}{2I_{yy}V_{p_0}C_L} \\
a_{12} &= g\left(1 - 2C_{D_{CL^2}}C_{L\alpha}\right) & a_{43} &= 1 \\
a_{14} &= -g & b_2 &= -\frac{g}{V_{p_0}}\frac{C_{L\delta_e}}{C_L} \\
a_{21} &= \frac{-2g}{V_{p_0}^2} & b_3 &= \frac{mgcC_{M\delta_e}}{I_{yy}C_L} \\
a_{22} &= -\frac{g}{V_{p_0}}\left(\frac{C_{L\alpha}}{C_L} + \frac{C_D}{C_L}\right) & \hat{a}_{31} &= -c_{32}a_{21} + a_{31} \\
a_{23} &= 1 & \hat{a}_{32} &= -c_{32}a_{22} + a_{32} \\
a_{31} &= 0 & \hat{a}_{33} &= -c_{32} + a_{33} \\
& & \hat{b}_3 &= -c_{32}b_2 + b_3
\end{aligned} \tag{27}$$

After the coefficients in the matrix are defined, the state variable motion equations can be expressed as in Equation (28-31) as below.

$$\dot{V}_p = a_{11}v_p + a_{12}\alpha + a_{14}\theta \tag{28}$$

$$\dot{\alpha} = a_{21}v_p + a_{22}\alpha + q + b_2\delta_e \tag{29}$$

$$\dot{q} = \hat{a}_{32}\alpha + \hat{a}_{33}q + \hat{b}_3\delta_e + \hat{a}_{31}v_p \tag{30}$$

$$\dot{\theta} = q \tag{31}$$

Letting $\dot{q} = sq = s^2\theta$ and $\dot{\alpha} = s\alpha$. Thus, the pitch transfer function, which is the ratio of the pitch angle to elevator displacement resulting from the longitudinal motion and the behavior of the elevator control surface, appears as in Equation (32) and (33) as below.

$$\frac{\theta}{\delta_e}(s) = \frac{(b_3 - c_{32}b_2)s^2 + [b_2(c_{32}a_{11} + a_{32}) - b_3(a_{11} + a_{22})]s + b_3(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}) - b_2a_{32}a_{11}}{D(s)} \tag{32}$$

where

$$D(s) = s^4 + (c_{32} - a_{11} - a_{22} - a_{33})s^3 + [a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} + a_{33}(a_{11} + a_{22})c_{32}a_{11} - a_{32}]s^2 + [c_{32}a_{21}a_{14} + a_{32}a_{11} - a_{33}(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12})]s + a_{32}a_{21}a_{14} \tag{33}$$

Overall, the transfer function resulting from the longitudinal motion of the aircraft is expressed. Separately, the ratio of the pitch angle to elevator displacement can be introduced in Equations (34) in the following form (Howe, 1980).

$$\frac{\theta}{\delta_e}(s) = K_e \frac{(\tau_s + 1)(\tau_p + 1)}{\left(\frac{1}{W_{ns}^2}s^2 + \frac{2\zeta_s}{W_{np}^2}s + 1\right)\left(\frac{1}{W_{np}^2}s^2 + \frac{2\zeta_p}{W_{np}^2}s + 1\right)} \tag{34}$$

2.3.2. The linearized lateral equations

States of the lateral motions that are side slip angle (β), roll rate (p), yaw rate (r) and bank angle (Φ). Before performing the linearization process, the nonlinear forms of the state are given in Equation (35-37).

$$\dot{\beta} = \frac{F_y}{mV_p} - R \quad (35)$$

$$\dot{p} = \frac{M_x}{I_{xx}} + \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) qr + \frac{I_{xz}}{I_{xx}} (pq + \dot{r}) \quad (36)$$

$$\dot{r} = \frac{M_z}{I_{zz}} + \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) pq + \frac{I_{xz}}{I_{zz}} (\dot{p} - qr) \quad (37)$$

The linearization process is started by determining the equilibrium points over the nonlinear forms. The equilibrium points of states determined in lateral motion are $\beta = 0$, $p = 0$, $r = 0$ and $\Phi = 0$. Thus, the linearized lateral motion Equations for $\dot{\beta}$, \dot{p} , \dot{r} , $\dot{\Phi}$ are expressed in Equation (38-41).

$$\dot{\beta} = \frac{gC_{Y\beta}}{V_{p_0}C_L}\beta - r + \left(\frac{g}{V_{p_0}} \right)\Phi + \left(\frac{gC_{Y\delta_r}}{V_{p_0}C_L} \right)\delta_r \quad (38)$$

$$\dot{p} = \left(\frac{mgbC_{l\beta}}{I_{xx}C_L} \right)\beta + \left(\frac{mgb^2C_{lp}}{2I_{xx}V_{p_0}C_L} \right)p + \left(\frac{mgb^2C_{lr}}{2I_{xx}V_{p_0}C_L} \right)r + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}\dot{r} + \left(\frac{mgbC_{l\delta_a}}{I_{xx}C_L} \right)\delta_a + \left(\frac{mgbC_{l\delta_r}}{I_{xx}C_L} \right)\delta_r \quad (39)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{mgbC_{N\beta}}{I_{zz}C_L} \right)\beta + \left(\frac{mgb^2C_{Np}}{2I_{zz}V_{p_0}C_L} \right)p + \left(\frac{mgb^2C_{Nr}}{2I_{zz}V_{p_0}C_L} \right)r + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}\dot{p} + \left(\frac{mgbC_{N\delta_a}}{I_{zz}C_L} \right)\delta_a + \left(\frac{mgbC_{N\delta_r}}{I_{zz}C_L} \right)\delta_r \quad (40)$$

$$\dot{\Phi} = p \quad (41)$$

These Equations are specified in the form of vector notation in Equation (42) as follows.

$$C\dot{X} = AX + B\delta \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c_{23} & 0 \\ 0 & c_{32} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & -1 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ p \\ r \\ \Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (42)$$

where,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c_{23} & 0 \\ 0 & c_{32} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & -1 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\hat{A} = C^{-1}A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & -1 & a_{14} \\ \hat{a}_{21} & \hat{a}_{22} & \hat{a}_{23} & 0 \\ \hat{a}_{31} & \hat{a}_{32} & \hat{a}_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = C^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ \hat{b}_{21} & \hat{b}_{22} \\ \hat{b}_{31} & \hat{b}_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43a)$$

C is invertible matrix. Therefore it can be move to do right hand side of the Equation (42).Component of the A and B matrix detailed expressions can be obtained from the coefficient linearized longitudinal motion Equations for $\dot{\beta}$, \dot{p} , \dot{r} , $\dot{\Phi}$. Equation (43) is given in Equation (44)

$$\begin{aligned}
c_{23} &= -\frac{I_{xz}}{I_{xx}} & b_{12} &= \left(\frac{gC_Y\delta_r}{V_{p0}C_L}\right) \\
c_{32} &= -\frac{I_{xz}}{I_{zz}} & b_{21} &= \left(\frac{mgbC_{l\delta_a}}{I_{xx}C_L}\right) \\
a_{11} &= \frac{gC_{Y\beta}}{V_{p0}C_L} & b_{22} &= \left(\frac{mgbC_{l\delta_r}}{I_{xx}C_L}\right) \\
a_{14} &= \left(\frac{g}{V_{p0}}\right) & b_{31} &= \left(\frac{mgbC_{N\delta_a}}{I_{zz}C_L}\right) \\
a_{21} &= \left(\frac{mgbC_{l\beta}}{I_{xx}C_L}\right) & b_{32} &= \left(\frac{mgbC_{N\delta_r}}{I_{zz}C_L}\right) \\
a_{22} &= \left(\frac{mgb^2C_{lp}}{2I_{xx}V_{p0}C_L}\right) & \hat{a}_{21} &= -\frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{21} + \frac{c_{23}}{c_{23}c_{32}-1}a_{31} \\
a_{23} &= \left(\frac{mgb^2C_{lr}}{2I_{xx}V_{p0}C_L}\right) & \hat{a}_{22} &= -\frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{22} + \frac{c_{23}}{c_{23}c_{32}-1}a_{32} \\
a_{31} &= \left(\frac{mgbC_{N\beta}}{I_{zz}C_L}\right) & \hat{a}_{23} &= -\frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{23} + \frac{c_{23}}{c_{23}c_{32}-1}a_{33} \\
a_{32} &= \left(\frac{mgb^2C_{Np}}{2I_{zz}V_{p0}C_L}\right) & \hat{a}_{32} &= \frac{c_{32}}{c_{23}c_{32}-1}a_{22} - \frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{32} \\
a_{33} &= \left(\frac{mgb^2C_{Nr}}{2I_{zz}V_{p0}C_L}\right) & \hat{b}_{21} &= -\frac{1}{c_{23}c_{32}-1}b_{21} + \frac{c_{23}}{c_{23}c_{32}-1}b_{31} \\
\hat{a}_{31} &= \frac{c_{32}}{c_{23}c_{32}-1}a_{21} - \frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{31} & \hat{b}_{31} &= \frac{c_{32}}{c_{23}c_{32}-1}b_{21} - \frac{1}{c_{23}c_{32}-1}b_{31} \\
\hat{a}_{33} &= \frac{c_{32}}{c_{23}c_{32}-1}a_{23} - \frac{1}{c_{23}c_{32}-1}a_{33} & \hat{b}_{32} &= \frac{c_{32}}{c_{23}c_{32}-1}b_{22} - \frac{1}{c_{23}c_{32}-1}b_{32} \\
\hat{b}_{22} &= -\frac{1}{c_{23}c_{32}-1}b_{22} + \frac{c_{23}}{c_{23}c_{32}-1}b_{32}
\end{aligned} \tag{44}$$

After the coefficients in the matrix are defined, the state variable motion Equations can be expressed as in Equation 45-48 as below.

$$\dot{\beta} = a_{11}\beta - r + a_{14}\Phi + b_{12}\delta_r \tag{45}$$

$$\dot{p} = \hat{a}_{21}\beta + \hat{a}_{22}p + \hat{a}_{23}r + \hat{b}_{21}\delta_a + \hat{b}_{22}\delta_r \tag{46}$$

$$\dot{r} = \hat{a}_{31}\beta + \hat{a}_{32}p + \hat{a}_{33}r + \hat{b}_{31}\delta_a + \hat{b}_{32}\delta_r \tag{47}$$

$$\dot{\Phi} = p \tag{48}$$

When simplifying the algebra, the new parameters specified in Equation (45) are defined as the coefficients in Equations (49) and (50).

$$\begin{aligned}
&[s^2 - (a_{11} + a_{33})s + (a_{31} + a_{33}a_{11})]r \\
&= [-c_{32}s^3 + (a_{32} + c_{32}a_{11})s^2 - a_{32}a_{11}s + a_{31}a_{14}]\Phi + (b_{31}s - b_{31}a_{11})\delta_a \\
&+ (b_{32}s + a_{31}b_{12} - b_{32}a_{11})\delta_r
\end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
&[(a_{31} - a_{21}c_{32})s^2 + (a_{21}a_{32} - a_{31}a_{32})s]\Phi \\
&= [(a_{21} - a_{31}c_{23})s + a_{31}a_{23} - a_{21}a_{33}]r + (a_{31}b_{21} - a_{21}b_{31})\delta_a + (a_{31}b_{22} \\
&- a_{21}b_{32})\delta_r
\end{aligned} \tag{50}$$

As we simplify the algebra, we define the new parameters specified in Equation (51) as coefficients in Equations (49) and (50).

$$\begin{aligned}
a_1 &= -(a_{11} + a_{33}) & b_3 &= b_{32} \\
a_0 &= a_{31} + a_{33}a_{11} & b_2 &= a_{31}b_{12} - b_{32}a_{11} \\
c_3 &= -c_{32} & d_2 &= a_{31} - a_{21}c_{32} \\
c_2 &= a_{32} + c_{32}a_{11} & d_1 &= a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22} \\
c_1 &= -a_{32}a_{11} & k_1 &= a_{21} - a_{31}c_{23} \\
c_0 &= a_{31}a_{14} & k_0 &= a_{31}a_{23} - a_{21}a_{33} \\
b_1 &= b_{31} & b_4 &= a_{31}b_{21} - a_{21}b_{31} \\
b_0 &= -b_{31}a_{11} & b_4 &= a_{31}b_{21} - a_{21}b_{31}
\end{aligned} \tag{51}$$

Thus, when the lateral motion Equations are examined, the transfer function expressing the ratio of the bank angle according to both aileron and rudder displacement emerges in Equation (52) and (53) as follows.

$$\Phi(s) = \frac{(b_4 + b_1k_1)s^2 + [b_4a_1 + b_0k_1]s + (b_4a_0 + b_0k_0)}{D_1(s)} \delta_a + \frac{(b_5 + b_3k_1)s^2 + [b_5a_1 + b_2k_1 + b_3k_0]s + (b_5a_0 + b_2k_0)}{D_1(s)} \delta_r \tag{52}$$

where

$$\begin{aligned}
D_1(s) &= (d_2 - c_3k_1)s^4 + (d_2a_1 + d_1 - c_2k_1 - c_3k_0)s^3 + [a_0d_2 + a_1d_1 - c_1k_1 - c_2k_0]s^2 \\
&\quad + [a_0d_1 - c_1k_0 - c_0k_1]s + c_0k_0
\end{aligned} \tag{53}$$

In general, the transfer function resulting from the lateral motion of the aircraft is expressed. Separately, the ratio of the bank angle to aileron displacement and rudder displacement can be expressed in Equations (54) and (55) in the following form (Howe, 1980).

$$\frac{\Phi}{\delta_a}(s) = -K_a \frac{\frac{s^2}{w_{n\phi}^2} + \frac{2\zeta_\phi s}{w_{n\phi}} + 1}{(T_{\phi 1}s + 1)(T_{\phi 2}s + 1)\left(\frac{s^2}{w_{nr}^2} + \frac{2\zeta_r s}{w_{nr}} + 1\right)} \tag{54}$$

$$\frac{\Phi}{\delta_r}(s) = K_r \frac{(T_{\phi r_1}s + 1)(-T_{\phi r_2}s + 1)}{(T_{\phi 1}s + 1)(T_{\phi 2}s + 1)\left(\frac{s^2}{w_{nr}^2} + \frac{2\zeta_r s}{w_{nr}} + 1\right)} \tag{55}$$

3. ESTIMATION ALGORITHM

Several parameter estimation methods are employed online and offline to eliminate the uncertainties in many systems. Some of them are the maximum likelihood method, least square method (LSM), recursive least square method (RLSM), and time-varying parameters methods (Klein and Morelli, 2006). Since it is a dynamic system in the aviation field and the parameters are updated instantaneously, parameter estimation methods are required in this area. In this paper, the LS method is practiced and demonstrated.

3.1. Least Square Method

The least square is a parameter estimation method that attempts to obtain the approximate solution for a specified function via minimizing the sum of the squares of the residuals computed in every iteration. The least square method considers that the best-fitting curve of a given type is the curve with a minimum deviation sum (Molugaram and Rao, 2017). Assume that the data

points are $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ where x is the independent variable, y is the dependent variable and n is the number of data points. The fitting curve $f(x)$ deviation (error) e_i from each data point, as in Equation (56):

$$\begin{aligned} e_1 &= y_1 - f(x_1), \\ e_2 &= y_2 - f(x_2), \\ &\vdots \\ e_n &= y_n - f(x_n) \end{aligned} \quad (56)$$

The sum of the squares of the errors must be minimum in order to define the most suitable curve according to the LS method. The purpose of this method is to solve the systems of Equations (57).

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (57)$$

The general definition of the least squares method is depicted above. Now, it has been attempted to express parametrically in detail. In this paper, the transfer functions are analyzed to find unknown parameters, which is the purpose of the least squares method.

The transfer function, which denotes the input-output relationship, is exhibited in Figure 2 below (Chen and Tomizuka, 2014).

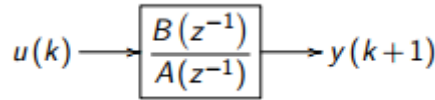


Figure 2. Input-Output Relationship of a Plant (Chen and Tomizuka, 2014)

The numerator and denominator parts of the plant, that is the transfer function, given in Figure 2 are given in Equation (58).

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}; \quad A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (58)$$

$y(k+1)$ is a linear combination of $y(k), \dots, y(k+1-n)$ and $u(k), \dots, u(k-m)$ and is expressed in Equation (59).

$$y(k+1) = - \sum_{i=1}^n a_i y(k+1-i) + \sum_{i=0}^m b_i u(k-i) \quad (59)$$

The transfer function was expressed above. where the $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$ and the regressor vector $\phi(k) = [-y(k), \dots, -y(k+1-n), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m)]^T$ are the parameter vector that must be defined in the transfer function. The relationship between them as general system modeling is expressed in Equation (60) below.

$$y(k+1) = \theta^T \phi(k) \quad (60)$$

The goal is to estimate unknown parameters θ . The parameter vector to be estimated is

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m]^T.$$

At time k , unknown parameters in the system can be estimated. The expression in Equation (61) below refers to the system to be estimated.

$$\hat{y}(k+1) = \hat{\theta}^T \phi(k) \quad (61)$$

where

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \dots, \hat{a}_n(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k), \dots, \hat{b}_m(k)]^T$$

As stated at the beginning of the subject, the error function J_k defined in Equation (62) must be minimum in order to minimize the error.

$$J_k = \sum_{i=1}^k [y(i) - \hat{\theta}^T(k) \phi(i-1)]^2 \quad (62)$$

The result of this expression is given in Equation (63).

$$J_k = \sum_{i=1}^k [y(i)^2 + \hat{\theta}^T(k) \phi(i-1) \phi^T(i-1) \hat{\theta}(k) - 2y(i) \phi^T(i-1) \hat{\theta}(k)]^2 \quad (63)$$

The partial derivative must be 0 for the function J_k to be minimum ($\partial J_k / \partial \theta(k) = 0$). As a result of this process, $\hat{\theta}(k)$ parameter vector, which is our aim, is found as in Equation (64) by the least squares method.

While θ is found here, the matrix inversion method has been applied. This matrix inversion method can be applied only when the coefficient matrix is a square matrix and non-singular. Thus, ϕ is square and non-singular matrix. If matrix determinant is equal non-zero, this matrix is non-singular. Since ϕ is non-singular, ϕ^{-1} exists and $\phi^{-1} \phi = \phi \phi^{-1} = I$. Where I is identity matrix ($\phi \theta = y \rightarrow \phi^{-1}(\phi \theta) = \phi^{-1} y \rightarrow \theta = \phi^{-1} y$).

$$\hat{\theta}(k) = F(k) \sum_{i=1}^k \phi(i-1) y(i) \quad (64)$$

where

$$F(k) = \left[\sum_{i=1}^k \phi(i-1) \phi^T(i-1) \right]^{-1}$$

As a result, using Equation (64), all parameters are obtained. Thus, derivatives are not taken for each parameter individually. With this expression, each parameter is solved.

4. ESTIMATION OF TRANSFER FUNCTIONS RESULTING FROM THE BEHAVIOR OF AIRCRAFT CONTROL SURFACES WITH LS METHOD

LS methods estimate transfer functions resulting from the behavior of the aircraft control surfaces such as the elevator, aileron, and rudder related to the longitudinal and lateral motion of the aircraft. The resulting transfer functions are examined in the time domain and with their original and predicted form. Graphs are included to comprehend the approach of LS methods with actual data. MATLAB / Simulink program was utilized to establish the algorithm and in the modeling phase of the system. Models are composed for each elevator, aileron, and rudder control surface. In the model created in the MATLAB / Simulink program, a doublet input to the elevator displacement, aileron displacement, and rudder displacement, which is the input of the system, is defined. Doublet inputs are applied to indicate side pulses (Klein and Morelli, 2006). The graph in Figure 3 below can be illustrated as an example of doublet input.

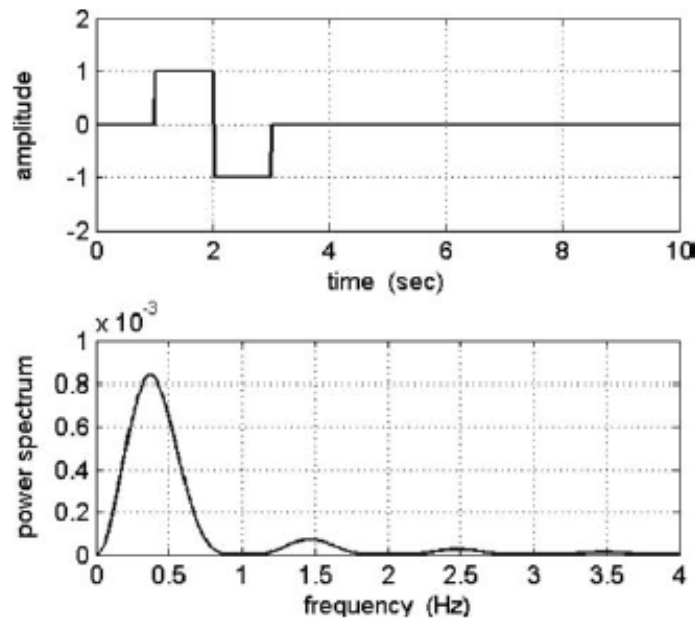


Figure 3. Doublet Input (Klein and Morelli, 2006)

4.1. Elavator Control Surface

This section outlines the estimation of the transfer function associated with the longitudinal motion and the behavior of the elevator control surface. First, the transfer function between the elevator pitch angle and elevator displacement is calculated from the original data. The transfer function is predicted similarly to its original form applying the LS method algorithm and model in Figure 4 formulated in MATLAB / Simulink.

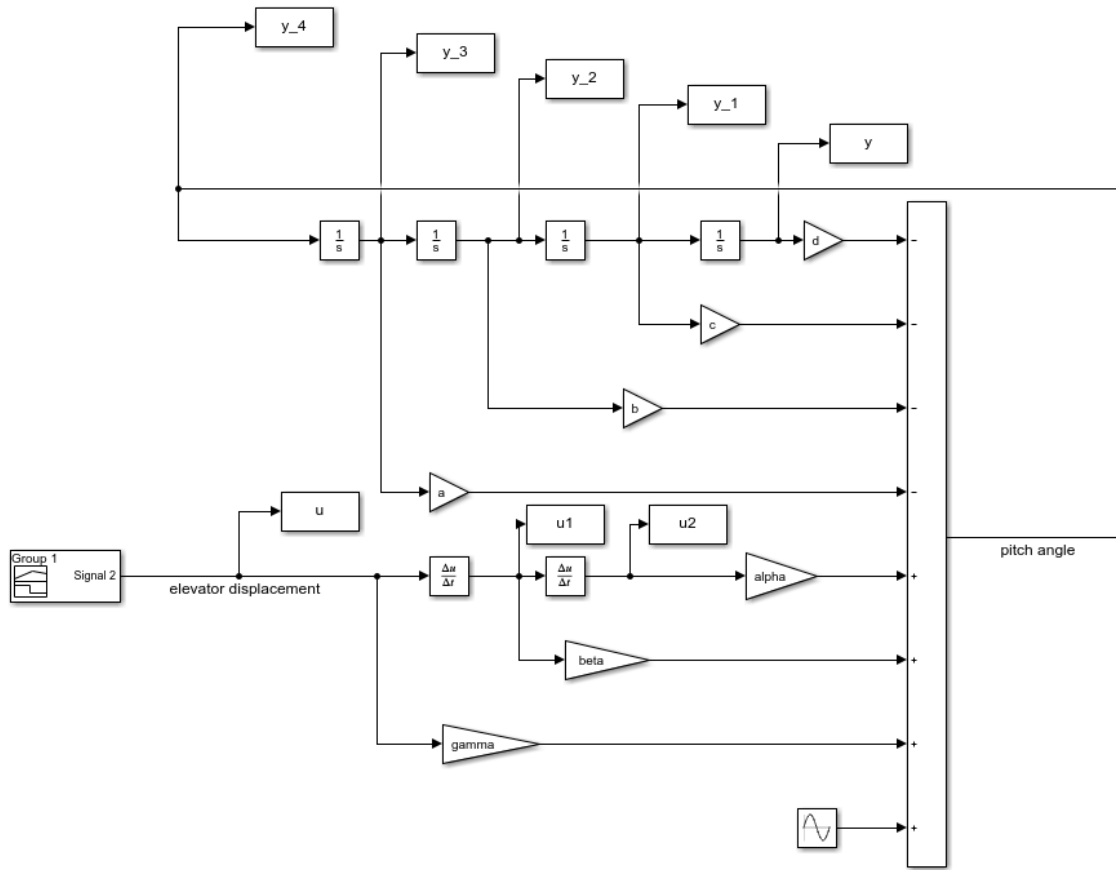


Figure 4. MATLAB/Simulink Model for Elevator Control Surface

Below is the pitch transfer function determined by the original data in Equation (65).

$$\left(\frac{\theta}{\delta_e}\right)_{ORJ} = \frac{-24.7885s^2 - 18.2186s - 0.4659}{s^4 + 2.0072s^3 + 32.5269s^2 + 0.8638s + 0.0179} \tag{65}$$

The algorithm of the least squares method in the MATLAB program and the model in Figure 4 set up in the MATLAB / Simulink program is run. The result is presented in Equation (66).

$$\left(\frac{\theta}{\delta_e}\right)_{LSM} = \frac{-24.7885s^2 - 18.2191s - 0.4447}{s^4 + 2.0072s^3 + 32.5269s^2 + 0.8641s + 0.0176} \tag{66}$$

The transfer function resulting from the behavior of the elevator control surface is estimated with the LS method. The time-domain responses of the estimated and original transfer function are depicted Figure 5 for comparison.

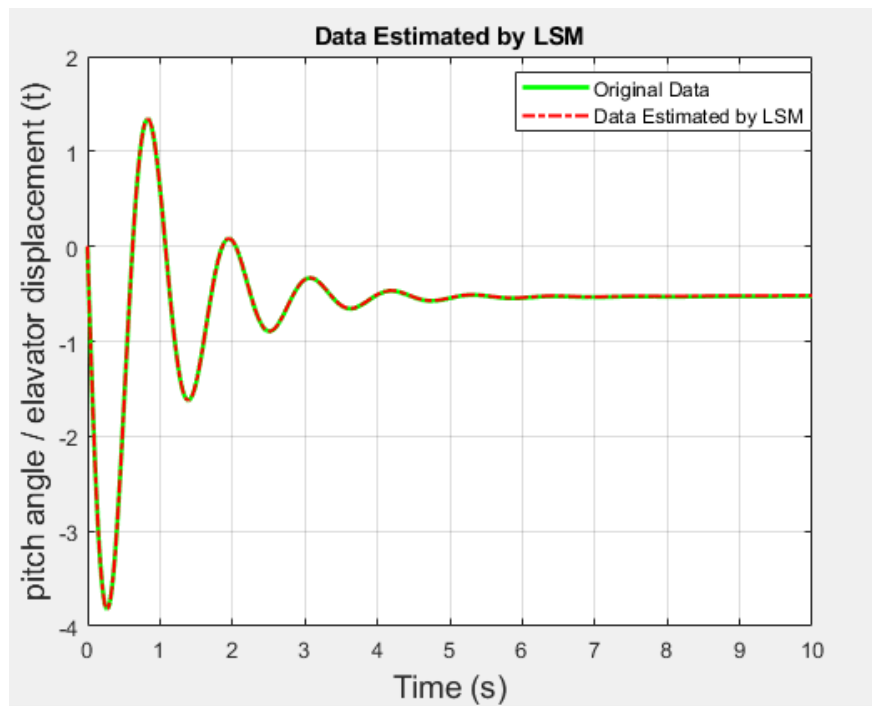


Figure 5. Time Response of Elevator Control Surface Behavior Estimated via LSM

4.2. Aileron Control Surface

This section outlines the estimation of the transfer function associated with the lateral motion and the behavior of the aileron control surface. First, the transfer function between the bank angle and aileron displacement is calculated from the original data. The transfer function is predicted similarly to its original form applying the LS method algorithm and model in Figure 6 formulated in MATLAB / Simulink.

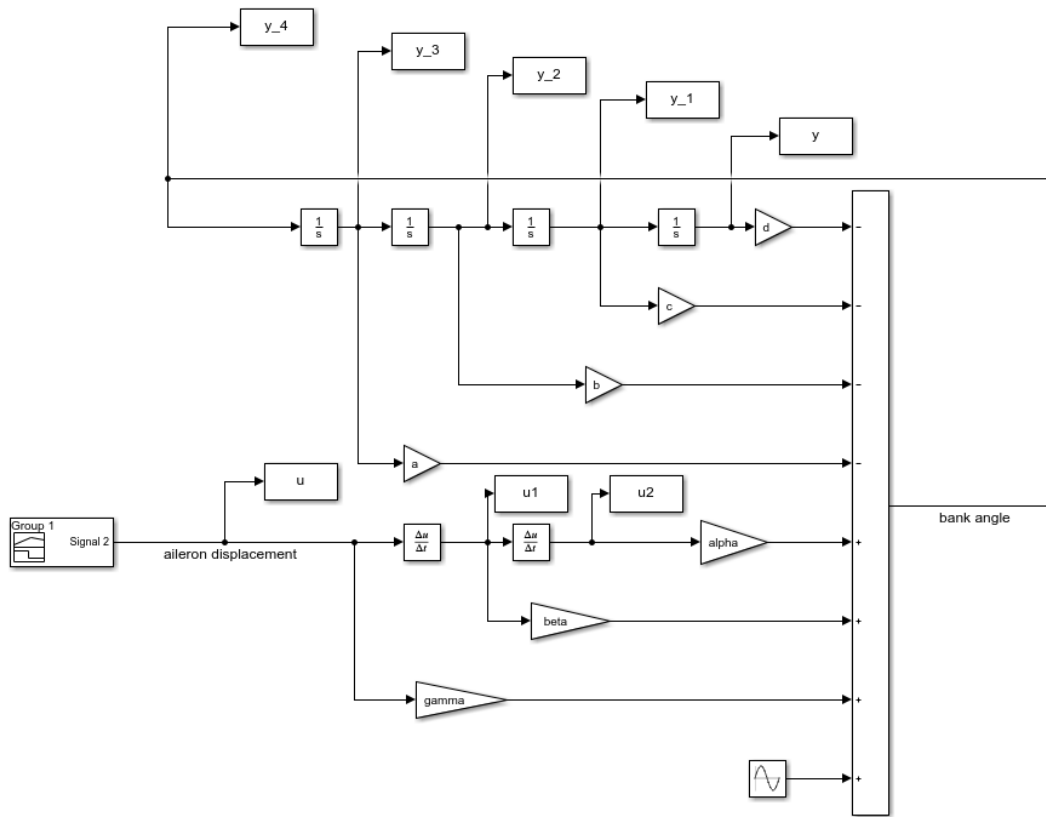


Figure 6. MATLAB/Simulink Model for Aileron Control Surface

Below is the transfer function, which is the ratio of the bank angle to the aileron displacement determined by the original data in Equation (67).

$$\left(\frac{\Phi}{\delta_a}\right)_{ORJ} = \frac{26.8666s^2 + 0.4725s + 94.0527}{s^4 + 1.8683s^3 + 3.6856s^2 + 6.2648s - 0.0085} \tag{67}$$

The algorithm of the least squares method in the MATLAB program and the model in Figure 6 set up in the MATLAB / Simulink program is run. The result is presented in Equation (68).

$$\left(\frac{\Phi}{\delta_a}\right)_{LSM} = \frac{26.8666s^2 + 0.4721s + 94.0737}{s^4 + 1.8683s^3 + 3.6856s^2 + 6.2649s - 0.0087} \tag{68}$$

The transfer function resulting from the behavior of the aileron control surface is estimated with the LS method. The time-domain responses of the estimated and original transfer function are depicted Figure 7 for comparison.

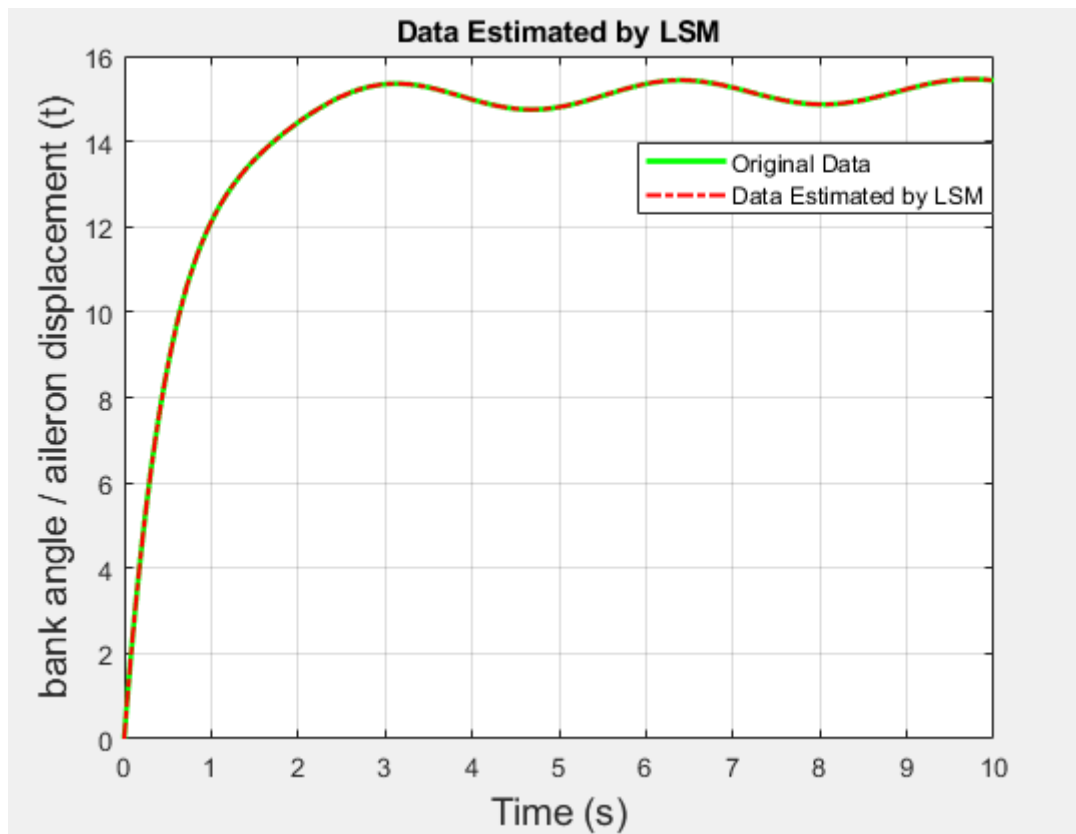


Figure 7. Time Response of Aileron Control Surface Behavior Estimated via LSM

4.3. Rudder Control Surface

This section outlines the estimation of the transfer function associated with the lateral motion and the behavior of the aileron control surface. First, the transfer function between the bank angle and rudder displacement is calculated from the original data. The transfer function is predicted similarly to its original form applying the LS method algorithm and model in Figure 8 formulated in MATLAB / Simulink.

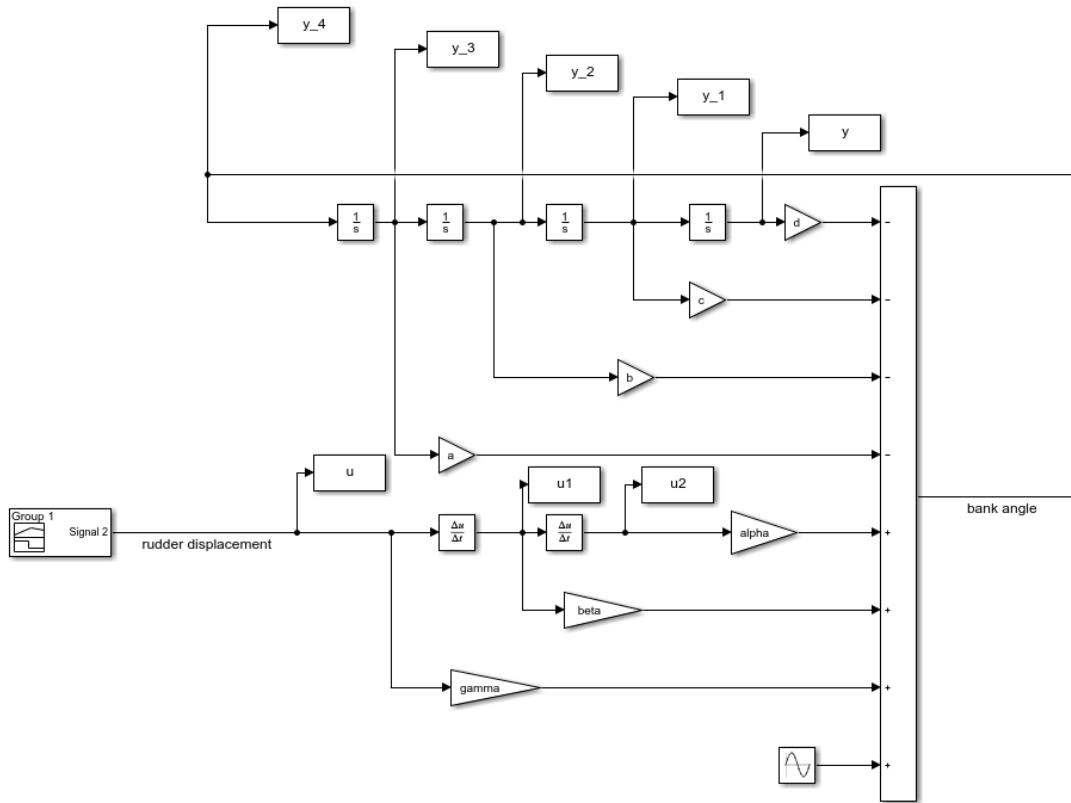


Figure 8. MATLAB/Simulink Model for Rudder Control Surface

Below is the transfer function, which is the ratio of the bank angle to the rudder displacement determined by the original data in Equation (69).

$$\left(\frac{\Phi}{\delta_r}\right)_{ORJ} = \frac{0.5749s^2 - 0.2124s - 4.2481}{s^4 + 1.8683s^3 + 3.6856s^2 + 6.2648s - 0.0085} \tag{69}$$

The algorithm of the least squares method in the MATLAB program and the model in Figure 8 set up in the MATLAB / Simulink program is run. The result is presented in Equation (70).

$$\left(\frac{\Phi}{\delta_r}\right)_{LSM} = \frac{0.5749s^2 - 0.2128s - 4.2263}{s^4 + 1.8678s^3 + 3.6850s^2 + 6.2636s - 0.0031} \tag{70}$$

The transfer function resulting from the behavior of the rudder control surface is estimated with the LS method. The time-domain responses of the estimated and original transfer function are depicted Figure 9 for comparison.

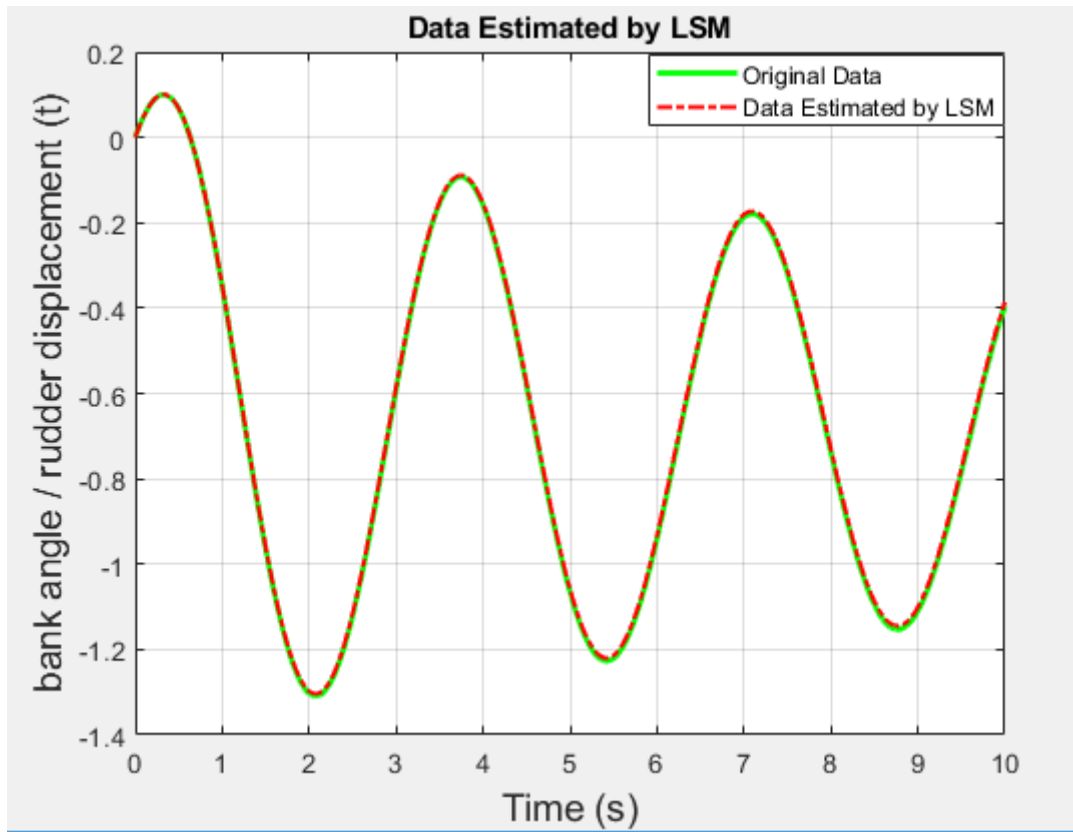


Figure 9. Time Response of Aileron Control Surface Behavior Estimated via LSM

5. ESTIMATION OF AERODYNAMIC PARAMETERS

In section 4, the estimation of transfer functions resulting from the behavior of aircraft control surfaces with the LS method has been explained. In this section, some aerodynamic parameters are obtained using the values of the estimated transfer functions. These estimated aerodynamic parameters are also among the parameters used to derive the original state of the estimated transfer functions. The coefficients of the parametric transfer function found in Equations (32) and (33) were estimated. Consequently, the aerodynamic parameters acquired from the estimation and their original values are presented in Table 1.

Table 1. Estimated of Aerodynamic Parameters

<i>Aerodynamic Paramters</i>	<i>Original Values</i>	<i>Estimated of Least Square</i>
C_L	0.0642	0.0644
C_D	0.0514	0.0486
$C_{M\alpha}$	-0.4	-0.4144
$C_{M\dot{\alpha}}$	-2	-1.9218
$C_{L\alpha}$	3	2.974
$C_{D_{CL^2}}$	0.05	0.11
$C_{M\delta_e}$	-0.3	-0.3195
$C_{L\delta_e}$	0.2	0.2006
C_{MQ}	-8	-4.273

6. CONCLUSION

In this article, the parameter approach, a system definition method, is considered. Accordingly, it was stated that there are many parameter approximation methods online and offline, and the LS method was explained. First of all, mathematical equations of an airplane should be derived to implement a prediction method. In this context, both longitudinal and lateral motion equations are derived in a linearized manner. As a result of the equations achieved, the behavior of airplane control surfaces is analyzed, and transfer functions of their behavior are obtained. These transfer functions formulated with their original values are estimated by the LS method. Graphical outputs were obtained between the original data and the predicted data in the time domain with the models and algorithms applied in the MATLAB / Simulink program.

The time-domain response of the original and estimated transfer functions for all three control surfaces are compared. It is observed that the transfer function predicted by the LS method used presented similar behavior with original data. The input signal for the estimation process is manipulated until the prediction is completed successfully, and the results did not intersect the parameter estimation exactly like the graphs above. In this process, firstly, a single sine sign is applied to the input values, namely elevator, aileron, rudder displacements. This sine value has been applied by implementing various amplitude and frequency values. As a result, estimation performance is not sufficient with this input value. Then again, the application was made to assign the amplitude and frequency of each to the input value as the sum of five sine values by assigning values in different combinations. Again, the prediction is not satisfactory. When the evaluation was made by giving doublet input as the last experiment, the above results were acquired. The estimate process was performed with the LS method with minimum error. In addition, after subtracting the estimated transfer functions, some aerodynamic parameters are extracted and compared with their actual values. An integral Square Error (ISE) table was created to see the error rates of the estimated transfer functions. This ISE table is specified in Table 2. In addition, the error table prepared for the estimated aerodynamic parameters is given in Table 3. It is seen that the algorithm applied using the LS method is close to the actual data. The aerodynamic parameters adopted in these longitudinal motions are addressed in their original form and their estimation state due to the LS method, as shown in Table 1. Consequently, the estimation method is failed to predict the value of C_{M_Q} and $C_{D_{CL^2}}$. Therefore, the prediction process is repeated with the estimated values of C_{M_Q} and C_{M_α} to analyze how the initial value of these parameters result affects the system. While the initial value of C_{M_Q} does not affect the final estimation result, C_{M_α} is influential on the prediction.

In conclusion, it is presented that the LS method may be a sufficient alternative to estimate the aircraft control surface behaviors and aerodynamic parameter estimation.

Table 2. Errors Table for LSM

<i>Parameter Estimation Methods</i>	<i>Elevator Control Surface (ISE)</i>	<i>Aileron Control Surface (ISE)</i>	<i>Rudder Control Surface (ISE)</i>
LSM	0.0001	0.00009	0.000399

Table 3. Error Table for Aerodynamic Parameters

<i>Aerodynamic Paramters</i>	<i>Error Rates</i>
C_L	0.00311
C_D	0.0545
$C_{M\alpha}$	0.0360
$C_{M\dot{\alpha}}$	0.0391
$C_{L\alpha}$	0.0087
$C_{D_{CL^2}}$	1.2
$C_{M\delta_e}$	0.0650
$C_{L\delta_e}$	0.0030
C_{MQ}	0.4659

Authors' Contribution

The contributions of the authors to the article are equal.

Muammer KALYON contributed to this study in line with his ideas, criticism and method suggestions. Mehmet ŞAHİN contributed to research, application, simulation, analysis, interpretation, literature review and writing of the article.

Acknowledgement

The authors would like to thank Turkish Aerospace Industries Inc. for the working environment provided during the study.

Statement of Interest Conflict

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were complied with in the study.

REFERENCES

- Blakelock, J.H.**, (1991), Automatic Control of Aircraft and Missiles, Wiley, 672, New Jersey.
- Chen, X., Tomizuka, M.**, (2014). Advanced Control Systems II (Lecture Notes for ME233). University of California, Department of Mechanical Engineering, California.
- Gupta, A.**, (2015), Modeling and Control of an Aircraft System, National Institute of Technology Rourkela, M.Sc. Thesis, 66, Odisha.
- Howe, R.M.**, (1980), Control of Aircraft Missiles and Space Vehicles (Lecture Notes for Aero 574). University of Michigan, Department of Aerospace Engineering, Michigan.
- Jategaonkar, R.V.**, (2006), Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology, AIAA (American Institute of Aeronautics & Astronautics), 629, Reston, Virginia.

Klein, V., Morelli, E.A., (2006), Aircraft System Identification: Theory and Practise, AIAA (American Institute of Aeronautics & Astronautics), 484, Reston, Virginia.

Molugaram, K., Rao, G.S., (2017), Statistical Techniques for Transportation Engineering, Elsevier, 554, Amsterdam, Netherlands.

Stevens, B.L., Lewis, F.L., Johnson, E.N., (2016), Aircraft Control and Simulations, Wiley, 749, New Jersey.



Araştırma Makalesi / Research Article

**TRAMVAY SİSTEMLERİNDE KATENERSİZ ÇÖZÜMLERİN
İNCELENMESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE KATENERLİ SİSTEMLER
İLE KIYASLANMASI**

**EXAMINATION OF CATENARY-FREE SOLUTIONS IN TRAM SYSTEMS AND
COMPARISON WITH CATENARY SYSTEMS SPECIFIC TO İSTANBUL**

Alper Yavuz BAHADIROĞLU¹ Yalçın EYİĞÜN²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
alper.bahadiroglu@metro.istanbul

Geliş Tarihi / Received
31.12.2020

Kabul Tarihi / Accepted
02.06.2021

Öz

Dünya genelinde uygulanmakta olan birçok tramvay sistemi vardır. Bu sistemler; geçtikleri güzergâhtaki tarihi önemi, yerleşim yerlerine yakınlığı, halk için oluşturduğu riskler, turistik önemi ve taşıdığı yolcu sayısı gibi birçok sebepten dolayı kullanım avantajları ve dezavantajları kıyaslanarak yalnız birini veya aynı tramvay hattında birkaçının birlikte kullanıldığı entegre sistemler olarak seçilmektedir. Bu çalışmada; dünya genelinde tramvay sistemlerinde kullanılan katenerli ve katenersiz cer gücü iletim sistemlerinin ayrıntılı incelemesi yapılarak kullanım için tercih edilebilecek sisteme karar verilmesinde kolaylık sağlanması amaçlanmıştır. Bu makale, dünya çapında kullanılan veya kullanılması için geliştirilen tramvay sistemlerini ve bunları üreten firmaları kapsamaktadır. Her iki tramvay sisteminin dünyada ve İstanbul'da yapılan örneklerinin anlatılarak kıyaslanması sonrasında avantajları ve dezavantajlarının irdelenmesi bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolamalı sistemler, katenerli sistemler, katenersiz sistemler, süper kapasitör, tramvay.

Abstract

There are many tram systems in use around the world. These systems are seen only one or few of them are used on the same tram line in terms of many characteristics on the route they pass as historical importance, proximity to settlements, risks for the public, touristic importance, number of passengers etc. by comparing the usage advantages and disadvantages for many reasons. In this research, it is aimed to provide convenience of making the decision of the system that can be preferred for use by making a detailed examination of the catenary or catenary-free traction power transmission systems used in tram systems around the world. It includes the tram systems which are used or developed for use worldwide and the companies that produce them. It is the examination of the advantages and disadvantages of both tram systems after comparing the examples performed in the world and Istanbul.

Keywords: Catenary free systems, catenary systems, energy storage systems, supercapacitor, tram.

¹Bu yayın Alper Yavuz BAHADIROĞLU isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. alper.bahadiroglu@metro.istanbul, [Orcid.org/0000-0002-8518-1810](https://orcid.org/0000-0002-8518-1810).

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. y.eyigun@ticaret.edu.tr, [Orcid.org/0000-0001-9931-8294](https://orcid.org/0000-0001-9931-8294).

1. GİRİŞ

Demiryolunun gelişimi, endüstri devriminden ve buharın kullanılmasından sonra başlamıştır. İlk demiryolu hatları 1830'lu yıllarda birçok Avrupa kentinde işlemeye başlamıştır ve birçok demiryolu kurulumu 20. yüzyılın başında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Demiryollarının bu kadar gelişmesindeki en önemli unsur yüksek hız imkânı ile hızlı ve güvenli ulaşımdır.

Zamanla diğer ulaşım sistemlerinin de gelişmesi ve daha fazla konfor sunması sebebiyle demiryollarında modernizasyon zorunlu hâle gelmiştir. Bu sebeple, demiryollarında özellikle hızın artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve hizmet iyileştirmeleri yapılmıştır ve günümüzde 250-300 km/sa hızla giden yüksek hızlı trenler kullanılmaya başlamıştır.

Günümüzde gelişen demiryolu taşımacılığı iki ana başlık altında toplanmıştır.

1. Şehirler Arası Demiryolları
 - a) Yolcu Taşımacılığı
 - Konvansiyonel Trenler
 - Yüksek Hızlı Trenler
 - b) Yük Taşımacılığı
2. Kent İçi Raylı Sistemler
 - a) Tramvaylar
 - b) Hafif Raylı Sistemler (LRT)
 - c) Metro
 - d) Lineer Metro
 - e) Manyetik Levitasyonlu Trenler (Maglev)
 - f) Banliyö Hatları
 - g) Havaray
 - h) Füniküler

Ülkemizde şehirlerarası ve şehir içi raylı sistem taşımacılığına özellikle son yıllarda yatırımlar yapılmış ve aynı zamanda eski hatlara modernizasyon veya yenileme çalışması yapılmıştır. Artan şehir içi trafik yoğunluğu, hava kirliliği ve maliyet uygunluğu metropol şehirlerde raylı sistemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Şehir merkezlerinde en çok kullanılan raylı sistemlerden bir tanesi de tramvay sistemleridir. Tramvay sistemlerinde enerji beslemesi olarak en yaygın ve en ekonomik olan sistemler katener sistemlerdir. Fakat, şehir merkezlerinde katener hattının çeşitli sebeplerle kopması, katener direklerine özel araçlar ile çarpmalar kalabalık caddelerde tehlike oluşturabilmektedir. Aynı zamanda birçok katener direği ve katener teli tarihi bölgelerde tarihi dokunun korunmasında negatif bir etki yapmaktadır. Raylı sistem sektöründe faaliyet gösteren firmalar bu olumsuz durumları ortadan kaldırmak için 2000'li yıllarda katenersiz cer gücü iletim sistemi üretmek için çalışmalara başlamıştır.

1.1. Katenersiz Tramvaylar

Katenerli tramvaylar kent içi toplu taşıma sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Fakat zamanla katener direklerine karayolu taşıtlarının çarpması sonucunda direklerin devrilerek yayalar ve taşıtlar için tehlikeli durum oluşturması, direklerin hat gabarisini arttırarak caddelerde oluşturduğu sıkışıklık, zamanla çevredeki ağaçların katener telleri için oluşturduğu riskler, katener telinin çevresel etkilerden dolayı kopması sonucunda işletme kayıpları ve çevresel oluşturduğu tehlikeler, havai hatların tarihi bölgelerde oluşturduğu kötü görüntü gibi olumsuzlukları ortadan kaldırmak için başta gelen tramvay üretici firmaları, 1990'larda katenersiz tramvay üretmek için çalışmalara

başlamıştır. Bu sistemlere olan ihtiyaçların artması ve teknolojinin gelişmesi ile beraber bu sistemler geliştirilmeye devam etmektedir.

Günümüzde gelinen teknolojik gelişmeler sonucu katenersiz tramvay üretiminde geliştirilen sistemler;

1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler
2. Enerji depolamalı sistemlerdir.

1.1.1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler

Bu sistemler, araç için gerekli olan cer gücünün iki ray arasında kalan gömülü bir üçüncü enerji besleme rayından sağlandığı sistemlerdir. Bu sistemi ilk olarak Alstom firması geliştirmiştir. Dünyada işletme altında olan birçok hat bulunmaktadır. Bu sistemi geliştiren diğer iki firma sırasıyla AnsaldoSTS ve Bombardier firmalarıdır. AnsaldoSTS firması tramvay sistemini Çinli CRRC firması ile ortak geliştirerek Çin'in Zhuhai kentinde işletmeye almıştır. Bombardier firmasının geliştirdiği Primove sistemi ise daha test aşamasındadır.

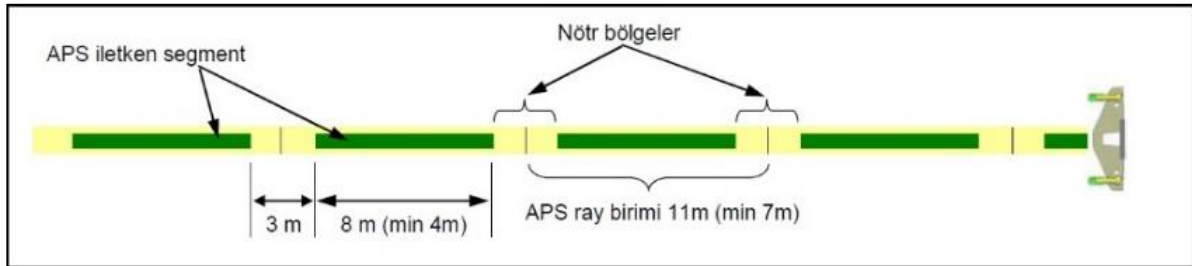
1.1.1.1. Alstom APS sistemi

Bu sistemde iki ray arasına gömülü bir üçüncü enerji rayı (ETR) ile sistemin cer gücü sağlanır. Gömülü segmentler 3 m yalıtkan ve 8 m iletken olacak şekilde montajı yapılır. Bu parçalar 22 m'de bir gömülü kutular yardımıyla araç ilerledikçe enerjilendirilir. Sistem cer gücü besleme gerilimi seviyesi 750 V DC'dir.

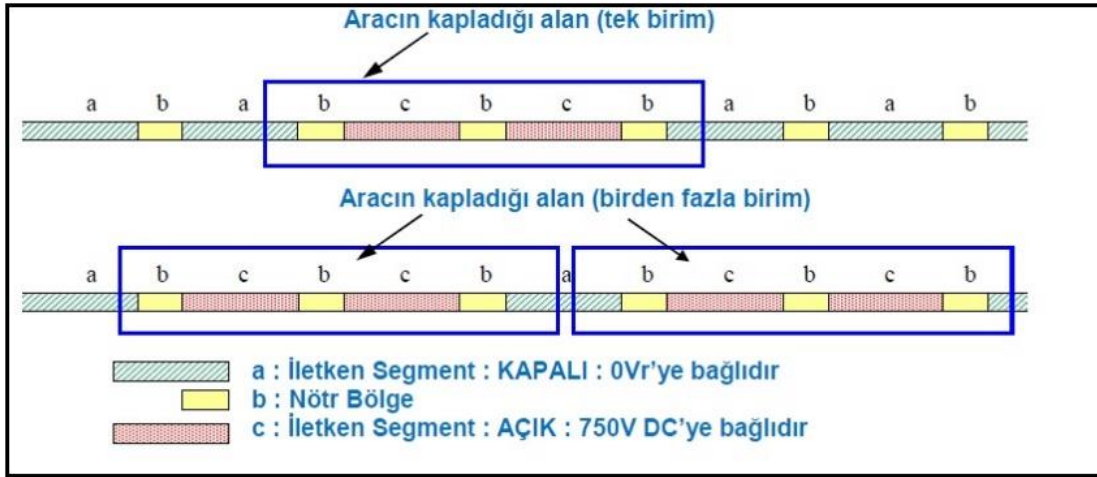
Söz konusu sistem kent içi raylı sistem taşımacılığında Havai Temas Sistemi (OCS) yerine bölümlere ayrılmış APS raylarının kullanılmasını amaçlar. APS rayları, hat platformu içine iki ray arasında kalacak şekilde tamamen gömülü üçüncü bir enerji rayı (ETR) teknolojisi şeklinde tasarlanmış sistemleridir.

APS sistemi, sadece ilgili APS rayına gerilim beslemesini içerir. Erişilebilir APS raylarında hiçbir zaman enerji olmaz, bundan dolayı insanlara veya başka teçhizatlar zarar gelmez. Enerjili kısım araç altında kalan bölgededir.

APS rayı, Şekil 1'de görüldüğü gibi genellikle 8 m iletken ve 3 m nötr segment bölgelerinden oluşur (Şekil 1, Şekil 2).



Şekil 1. APS Ray Yerleşimi (Alstom, 2020)



Şekil 2. APS Ray Segmentleri Gösterimi (Alstom, 2020)

Düz bir hat düzeninde APS rayı, iki çalışan ray arasında hattın ortasında yer alır. Kurp bölgelerinde ise APS rayı yana doğru kayıktır ve konumu, araç altında yer alan APS kolektör pabucunun yoluyla belirlenir.

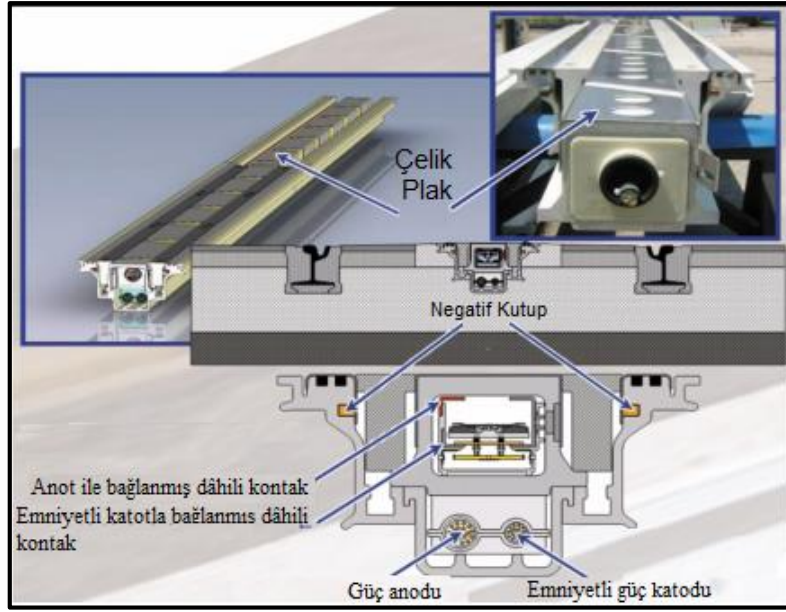
Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü elektronik cihazı tarafından üretilerek kolektör pabucuna entegre bir anten ile iletilir. Bu kodlanmış sinyal, bir segment üzerinde sürekli ve güvenli bir şekilde algılanır ve böylece bu segmente enerji beslemesi için izin alınır ve enerji beslemesi devam ettirilir.

Tüm APS altyapısı betona gömülü durumdadır. Hem zemin geçişlerde görünen veya yola engel olan bir yapı oluşturmaz. Kamuya açık alanlarda yerdeki hatta enerji olmadığından havai besleme sisteminin oluşturduğu risk bu sistemde yoktur. Dolayısıyla, bu sistem kamuya açık alanlarda daha avantajlıdır.

1.1.1.2. Ansaldo tramwave sistemi

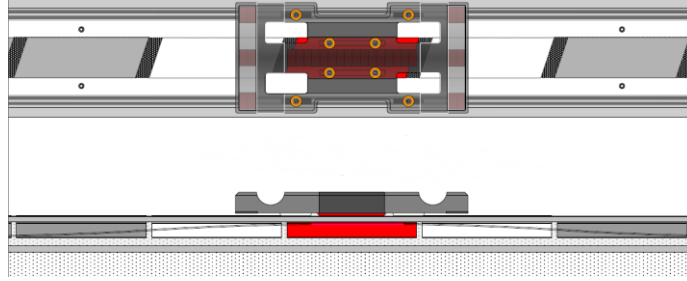
Tramwave sistemi ilk olarak İtalyan Ansaldo firması tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sistem Alstom APS sistemine oldukça benzemektedir. Bu sistemde cer enerjisi; iki seyir rayı arasında gömülü bir üçüncü enerji rayından (ETR) karşılanır.

Besleme sistemi, yer üstü ve yer altı olmak üzere ikiye ayrılır. Tramwave sisteminin yer altı bileşenlerini segmentler oluşturur. Bu segmentler, yol kurp yarıçaplarına göre 2 m, 3 m ve 5 m uzunluklarında olabilirler. Hat eğrilik yarıçapı ≥ 156 m ise 5 m'lik segmentler, 56 – 156 m ise 3 m'lik segmentler ve 25 – 56 m ise 2 m'lik segmentler kullanılır. Besleme segmentleri 50 cm'lik çelik plakalar halinde düzenlenmiştir (Şekil 3). Çelik levhanın kalınlığı 2 mm olup materyali paslanmaz çelik SUS304'tür.

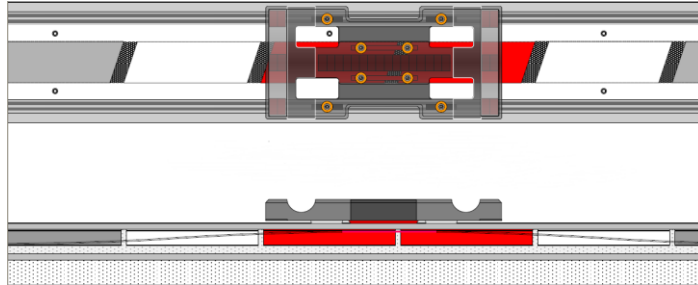


Şekil 3. Besleme Segmenti ve Besleme Kablosu Görünümü (Ansaldo, 2020)

Besleme kabloları bu segmentlerin altında olup, yer üstü tramvayın besleme kısmı ile temasını gerçekleştirecek şekilde rayın orta yeri üzerinde doğrudan açıktadır. Yer üstü bölümü, tramvay bojisinin altında kuruludur. Tramvay çalışmadığında, araç üstü kollektör geri çekilir; tramvay çalıştığında, tramvay için kesintisiz ve dengeli elektrik enerjisi sağlayacak şekilde kollektör pabucunun altındaki kapak levhasını açar, kollektör pabucunu aşağı indirir, besleme segmenti ile temas eder ve yer altı bölümü ile yer üstü bölümünün beraber çalışmasını sağlar (Şekil 4).



Şekil 4. Cer Gücü Aktif Tek Kısım (50 cm) (Ansaldo, 2020)



Şekil 5. Cer Gücü Aktif Çift Kısım (100 cm) (Ansaldo, 2020)

Araç, besleme modülünün üzerinde seyir halinde iken besleme pabucu araç sistemi manyetik kuvvet yoluyla besleme modülündeki esnek kontak şeridini çeker. Esnek kontak şeridi, kontak şeridi köprüsünün üzerindeki çalışma pozisyonuna çekildiğinde, kontak ile temas halindedir ve

devre bağlıdır. Besleme modülünün yüzeyindeki paslanmaz çelik anot kontak levhası elektrikli ve araca besleme sağlar (Şekil 5).

Tren besleme modülünden ayrıldığında ve sonraki besleme modülüne gittiğinde, modül otomatik olarak manyetik kuvvetin etkisi olmadan yer çekimi altında resetlenir ve esnek kontak şeridi emniyetli katot kablosu ile bağlantı durumuna geri döner. Bu durumda cer gücü yoktur.

Modül yüzeyine herhangi bir su birikimi durumunda, katot direnci küçüktür. Ancak, insan bedeninin direnç değeri büyüktür ve insan bedeninden akan akım düşüktür. Bu nedenle, besleme bölümünün yakınında hiçbir elektrik çarpması kazası olmamaktadır ve sistem halen normal işleimde olabilmektedir. Kaplama üzerindeki su birikimi 10 cm'den daha büyük olmadığında araç sürekli olarak güç besleyebilir. Modül üzerindeki biriken suyun yüksekliği 10 cm'yi aştığında, sistem su birikme süresi 2 saati aştıktan sonra DC 750V güç beslemesini durdurmaktadır.

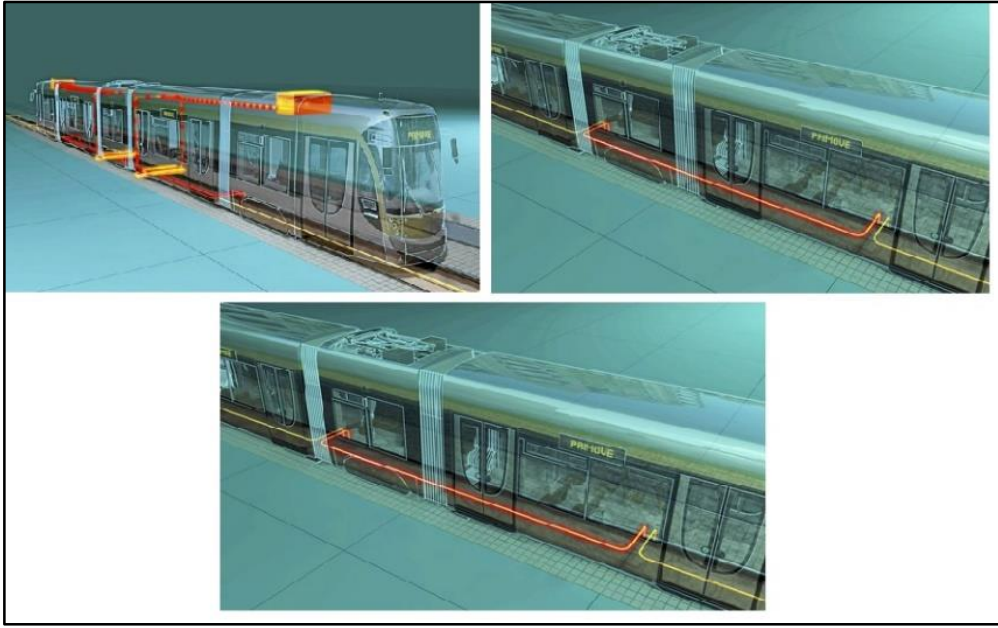
Besleme segmentlerinde oluşabilecek arızalar komple tanılama ve algılama sistemi seti ile tespit edilir. Bu arızalar kontrol merkezine iletilir. Kontrol merkezi arızaları sisteme yükler. Segmentlerin bakımı ve motajı hızlı ve kolaydır. Yarım saat içinde besleme modülü yenisi ile değiştirilebilir.

Tramwave sisteminde, rejeneratif fren yoluyla belirli bir elektrik enerjisi geri kazanabilir ve kullanıcı açısından işletim giderinden tasarrufta bulunacak şekilde elektrik enerjisini doğrudan enerji şebekesine aktarır.

1.1.1.3. Bombardier Primove sistemi

Bu sistemde gömülü bir üçüncü ray yoktur ve araçta enerjyi üçüncü raydan alacak bir enerji papucu bulunmamaktadır. Bu yüzden üçüncü ray teknolojisinden ayrılır. Sistem, herhangi bir kontak bulunmadan bir transformatörün endüktif güç transferine dayalıdır. Araç algılama ve segment kontrol anteni tarafından araç algılandığında segmente enerji verilir. Araç hareketi boyunca bir zemin seviyesi segmentine enerji verildiğinde, üç fazlı bir manyetik alan oluşturulur. Elektrik üretiminde primer devre iki ray arasında kalan manyetik kısımda depolanır ve araç altında bulunan sekonder devre bu enerji alanını tramvay hareketi için elektrik enerjisine çevirir. Aracın altındaki bir toplama bobini, kabloların oluşturduğu manyetik alanı çekiş sistemini besleyen bir elektrik akımına dönüştürür (Şekil 6).

Primove güç segmentleri raylara paralel olarak monte edilir, ancak temassız endüktif güç aktarımını kullanır. Bu sistemde raylar arasına yerleştirilmiş 9,0 m uzunluğunda primer sarmal kablo segmentleri mevcuttur. Sistem cer gücü 750 VDC'dir. Zemin seviyesi segmentleri geçiş yolunun % 10 – 25'i boyunca kurulur ve sadece tren yukarıdayken antenler tarafından aracın altında kalan segmentlere enerji verilir ve bu enerji yayalar ve diğer araçlar için güvenli hale gelir. Bir zemin seviyesi segmentine enerji verildiğinde, 20 kHz, üç fazlı bir manyetik alan oluşturulur. Oluşan bu manyetik alanın kalp pili, cep telefonları ve diğer elektronik eşyalara hiçbir etkisinin olmadığı Bombardier tarafından bildirilmiştir. Bu sistemde enerji kaybı % 1 – 5 olduğu üretici firma tarafından bildirilmiştir.



Şekil 6. Bombardier Primove Sistem Gösterimi (Bombardier, 2020)

Araç, işletme sırasında fazla olan enerjiyi ve frenleme esnasında açığa çıkan rejeneratif enerjiyi gerektiğinde kullanmak için araç üstü onboard elemanları olan süper kapasitörler ile donatılmıştır. Soğuk havalarda (buz ve kar) ve yoğun yağış altında enerjiyi toplayan bir enerji papucu bulunmadığından sistemin çalışmasında herhangi bir sorun yaşanmaz. Primove sistemde güç kaynağının yeraltına gömülmesi, araçlar ve yayalar için daha yüksek bir güvenilirlik sunar ve gelecekteki bakım maliyetlerini minimum şekilde olmasını sağlar.

1.1.2. Enerji depolama şeklinde çalışan sistemler

Bu sistemler, araç için gerekli olan cer gücünün enerji depolama sistemlerinden sağlandığı sistemlerdir. Dünya genelinde kullanılmakta olan tramvay sistemleri incelendiğinde sektörün öncü firmaları olarak adlandırılabilir CAF, Siemens ve Bombardier gibi üreticilerin birçok farklı çözüm ortaya koyduğu görülmektedir.

1.1.2.1. Caf süperkapasitör ve batarya sistemi

Firma, dahili araç üstü enerji depolama sistemleri (yakıt hücreleri/pilleri, volanlar, bataryalar ve süperkapasitörler) hakkında 7 yıldan fazla araştırma – geliştirme (analiz etme, inceleme ve araca entegre ve test etme) çalışmaları yapmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Dahili Enerji Depolama Sistemleri (CAF, 2020)

Bu çalışmalarda en faydalı çözümler araştırılarak günümüz şartlarında optimum çözüm seçilmektedir. Günümüz şartlarında firma tarafından belirtilen en optimum çözüm ise süper kapasitör ve bataryalara dayalı hibrit çözümlerdir.

Süper kapasitörler, ultra hızlı şarj olabilme kabiliyetleri ile istasyonlarda araçlardan yolcu indirdiği süresi sırasında şarj edilmesi planlanmaktadır. Süper kapasitörler, yüksek akımlarda 20 saniye gibi kısa sürelerde kendilerini şarj edebilmektedir. Aynı zamanda, aracın frenleme enerjisinin (rejeneratif enerji) büyük bir bölümü süper kapasitörler sayesinde tekrar şarj edilebilir. Bu sistemin, araçta oluşturduğu ağırlık yüzünden oluşan ek elektrik sarfiyatı düşüldüğünde % 21 - 29 arası enerji tasarrufu sağladığı öngörülmektedir (Şekil 8).

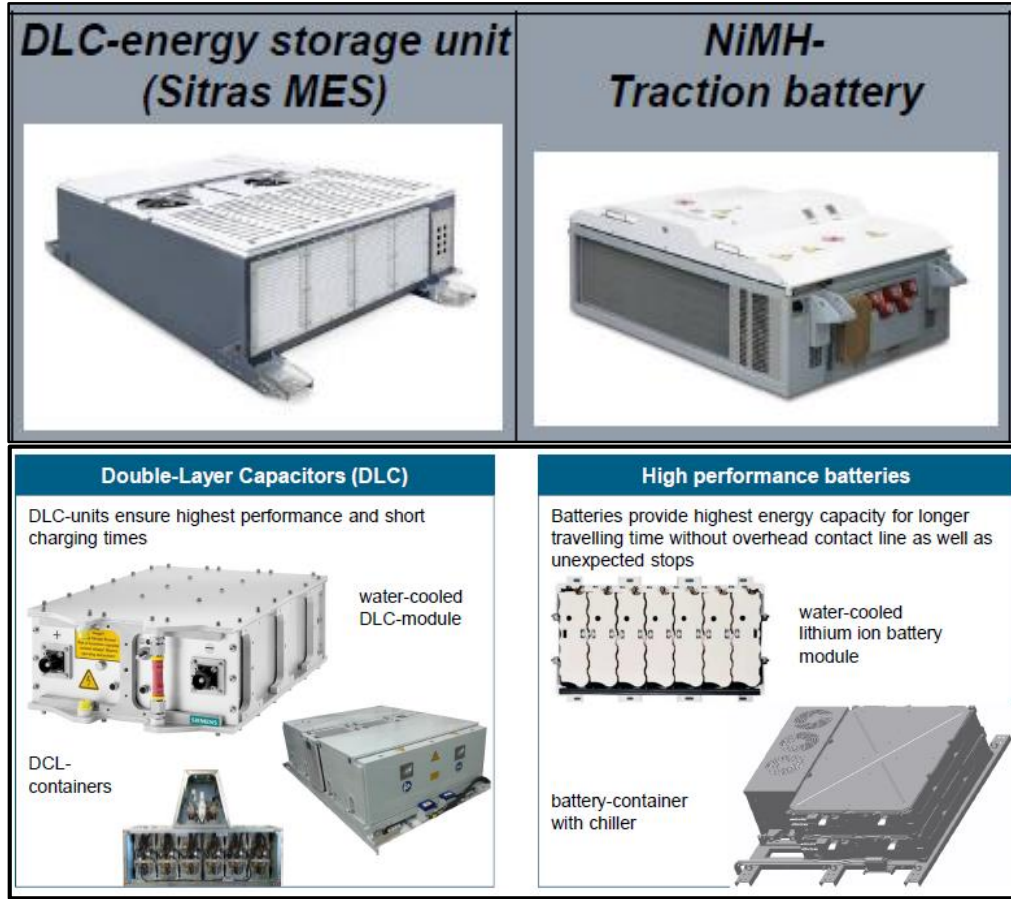
Araç ilk hareket enerjisini süper kapasitörden alır. Süper kapasitörde bulunan enerjinin boşalması durumunda araç enerjisini Li-ion veya NiMH bataryalardan alır. İsteğe göre batarya tipi seçilebilir. CAF firması tarafından geliştirilen hızlı şarj akümülatörleri (ACR) sistemi, durak bölgelerinde veya gerekli görülmesi durumunda ilave şarj bölgelerinde şarj edilmektedir. Bunlar şekil 8’de görüldüğü gibi enerji durak bölgelerinde katener sistem vasıtasıyla ya da işverenin istediği doğrultusunda gömülü bir üçüncü ray sistemi sayesinde şarj edilebilir. İki durak arası mesafe güzergâh koşullarına ve duraklar arasındaki performansa (trafiğe ve yayaya bağlı) ve hattaki olaylara bağlı olarak maksimum 1.400 metreye kadar çıkartılabilir.



Şekil 8. Katenerli ve CAF Katenersiz Aracının Çalışma Gösterimi (CAF, 2020)

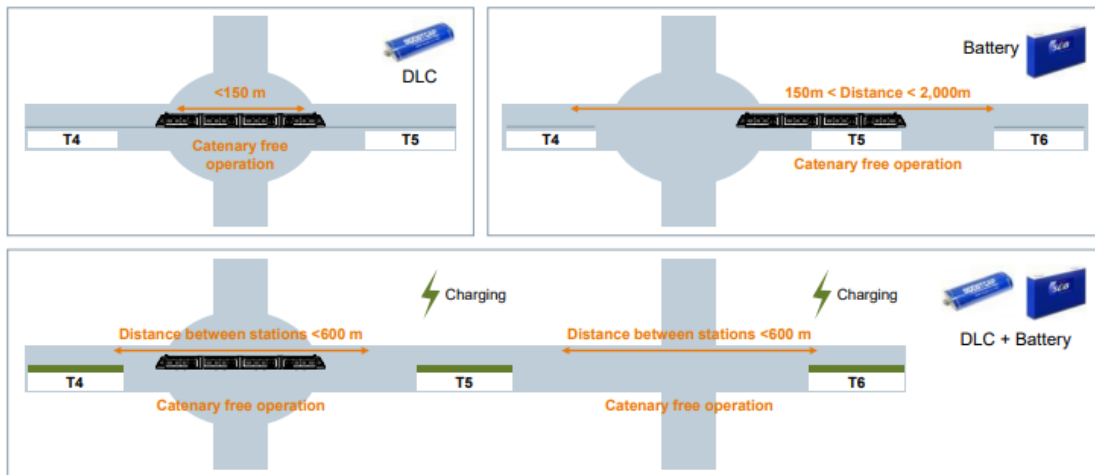
1.1.2.2. Siemens Sitrans HES&MES sistemi

Siemens firması on sekiz yılı aşkın süredir araç üstü enerji depolama sistemi (OSS) olan Sitrans MES ve Sitrans HES sistemleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu sayede, minimize altyapı çalışması yaparak az maliyetli ve yüksek tasarruflu Siemens Sitrans MES & HES sistemleri geliştirilmiştir. Siemens Sitrans MES sistemi araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) oluşmaktadır (Şekil 9). Araç ilk hareket enerjisini duraklarda bulunan rijit katenerden alır. İki durak arası katenersiz bölgede hareket için çift katmanlı kapasitördeki enerji kullanılır. Bu kapasitörleri şarj etmek için bir sonraki durakta bulunan rijit katener telleri kullanılır. Çift katmanlı kapasitörler yalnızca 20 saniye gibi kısa sürede şarj olmaktadır. Aynı zamanda frenleme sırasında oluşan rejeneratif enerji bu kapasitörlerde şarj edilir. Bu sayede % 20'ye yakın enerji tasarrufu yapıldığı bilinmektedir.



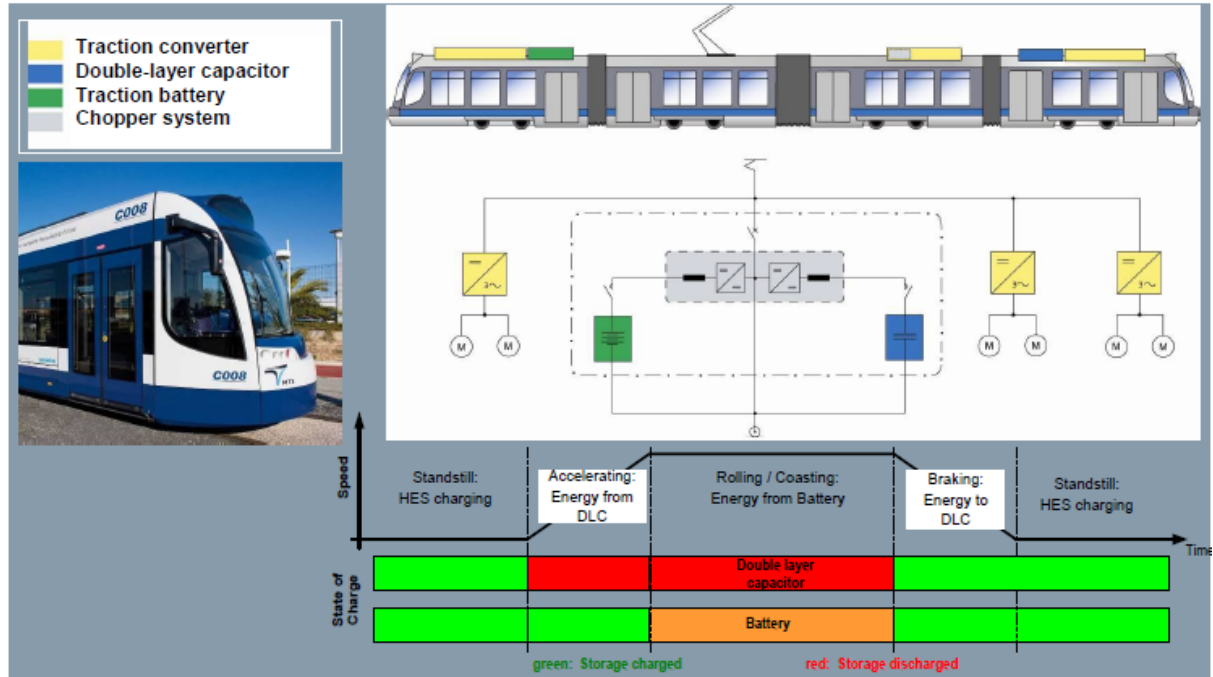
Şekil 9. Siments Sitras MES&HES DCL, NiMH ve Li-ion Batarya Gösterimi (Siments, 2020)

Siemens Sitras HES sistemi yine araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitöre ek olarak isteğ bağlı olarak NiMH batarya veya Li-ion batarya kullanılır. Araç bu sistemde ilk hareket enerjisini çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) alır. Sonrasında gerekli durumlarda batarya devreye girer. Duraklar arası mesafe 600 metrenin altında projelendirilmelidir. Şekilde gösterildiğ gibi sadece çift katmanlı kapasitörler ile 150 metrenin altında katenersiz araç hareketi mümkündür. DLC-batarya sistemlerinde ise duraklar arası mesafe 600 metreye çıkmaktadır (Şekil 10). Fakat, acil durumlarda tramvayların optimum şartlarda yaklaşık 2.500 metre katener olmadan hareket edebileceğini üretici firma tarafından garanti edilmektedir.



Şekil 10. Sitras MES&HES Durak Arası Olması Gereken Mesafe

Araç frenleme yaptığında rejeneratif enerji çift katmanlı kapasitörlerde depolanır. Sistemin şarj süresi 20 saniyedir. Bu sistemlerde araç durağa girerken enerjiyi rijit katenerden almaya başlar, istasyonda şarj işlemine devam eder ve ilk hareketinden istasyonu terk edene kadar enerji teminini rijit katenerden sağlar. Bu sayede, araç ilk hareketi için gerekli olan yüksek enerjiyi rijit katenerden alır. Çift katmanlı kapasitörlerdeki enerjinin büyük kısmı aracın normal hareketi esnasında kullanılır. Bu sayede hem bataryanın ömrü uzatılır hem de olumsuz ve acil durumlarda kullanılmak üzere gerekli enerji bataryada saklanır (Şekil 11). Siments Sitras HES sistemi sayesinde %25'e yakın enerji tasarrufu edilebilmektedir. Sistemde çift katmanlı kapasitörlerin ve bataryaların ısınmaması ve soğutulması için su ve hava kullanılmaktadır. 50 C° ye kadar sistemin çalışmasında problem yaşanmadığı bilinmektedir.



Şekil 11. Siments Sitras HES (Hibrit Enerji Dopolama) Sistemi Çalışma Gösterimi (Siments, 2020)

Bu sistemlerde aracın trafikli alanlarda dur – kalk yapma durumları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.

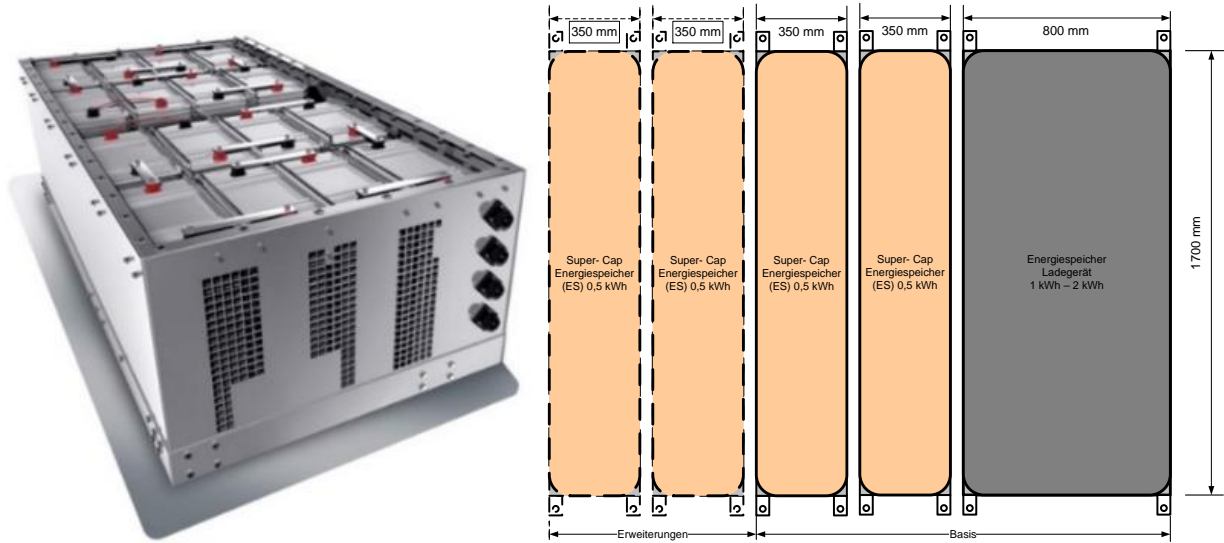
1.1.2.3. Bombardier Primove hibrit sistem

Bombardier firmasının geliştirdiği Primove hibrit sistemi lityum iyon piller ve çift katmanlı süper kapasitörlerden oluşmaktadır (Şekil 12). Gereksinime göre yalnız lityum iyon pil ya da yalnız çift katmanlı süper kapasitörler kullanılabilir (Şekil 13). Katenersiz zamanlarda, lityum iyon pillerin yüksek güç çıkışı ve yüksek enerji yoğunluğu; araç çekiş gücü, havalandırma (HVAC), aydınlatma, kapılar vb. için güç sağlar. Bu bataryaların sistemleri 2x24,5 kWh batarya ve termal havalandırma ünitesinden oluşmaktadır. Termal klima üniteleri sıcak günlerde su soğutma, soğuk günlerde ısıtma sağlamaktadır. Bataryaların tam güçte ve optimum sıcaklıkta batarya ömürleri firma verilerine göre yaklaşık 9 yıldır. Bu sistemlerde katenerden sağlanan güçle kıyaslandığında performans farkı yoktur. İhtiyaç durumunda batarya sayısı ve termal havalandırma ünitesi iki katına çıkartılabilir. (4x24,5 batarya ve 2 adet termal havalandırma ünitesi) Bu sistemi oluşturan batarya ünitelerinin bir tanesinin ağırlığı 667 kg iken termal havalandırma ünitesinin birim ağırlığı ise 170kg'dır. Frenlemeden dolayı oluşan rejeneratif enerjinin %8-10'u bataryalarda depolanabilmektedir.



Şekil 12. PRIMOVE 50: 2 x 24.5kWh Batarya (sağ) ile Termal havalandırma Ünitesi (sol) (Bombardier, 2020)

Firmanın geliştirdiği çift katmalı süper kapasitörlerde ise yüksek güç çıkışı vardır fakat enerji yoğunlukları sınırlı olduğundan bu kapasitörler kısa süreli enerji depolaması yaparlar. Firma verilerine göre optimum şartlarda yaklaşık ömürleri 15 yıldır. Sık şarj deşarj döngüleri için tasarlanmışlardır. Katenersiz olarak yaklaşık 400 metre gidebileceği firma tarafından öngörülmektedir. Rejeneratif frenleme enerjisinden % 30 civarında enerji tasarrufu beklenmektedir. Enerji beslemesinin zayıf olduğu alanlarda hem katenerden hem de süper kapasitörlerden gelen enerji ile tam hızlanma sağlanmaktadır.



Şekil 13. MITRAC ES 500 (1 kWh) Boyutlarına göre yerleşimi (0,5 / 1 / 1,5 / 2 kWh) (Bombardier, 2020)

1.1.3. Bataryalar

Bataryalar elektrik enerjisini gerektiğinde depolanabilen ve kullanılabilen kimyasal enerjiye dönüştürürler. Bu enerjiler gerekli devreler bağlanarak tekrar elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Kullanılacak uygulama için birçok çeşit enerji depolama sistemi mevcuttur. Bir enerji depolama sisteminin seçimi için bu sistemin gücüne, enerji oranına, ağırlığına, hacmine ve çalışma ortam sıcaklığına dikkat edilmelidir. Tablo 1'de farklı enerji depolama sistemleri tipleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Enerji Depolama Sistemleri (Hemmati, Saboori, 2016.)

Sistem	Nominal		Yoğunluk		Yaşam Süresi		Verim (%)	Günlük Kendi Kendine Deşarj (%)
	Güç (MW)	Tipik deşarj zamanı	Güç Yoğunluğu (W/l)	Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	Yıl	Devir		
Pompalı hidro	100-5000	1-24h	0.1-0.2	0.2-2	>50	>15000	70-80	Çok küçük
Sıkıştırılmış hava	5-300	1-24h	0.2-0.6	2-6	>25	>10000	41-75	Küçük
Volan	0-0.25	sn-h	5000	20-80	15-20	104-107	80-90	100
Yakıt Pili	0-50	sn-24h	0.2-20	600	10-30	103-104	34-44	0
Süper Kapasitör	0-0.3	msn-1h	(4-12)*10 ⁴	10-20	4-12	>5*10 ⁵	85-98	20-40
SMES	0.1-10	msn-8sn	2600	6	-	-	75-80	10-15
Bataryalar Kurşun-asit	0-20	sn-h	90-700	3-15	3-15	250-1500	75-90	0.1-0.3
Nicd	0-40	sn-h	75-700	5-20	5-20	1500-3000	60-80	0.2-0.6
Li-iyon	0-0.1	dk-h	1300-10000	5-100	5-100	600-1200	65-75	0.1-0.3
NaS	0.05-8	sn-h	120-160	10-15	10-15	2500-4500	70-85	10-20
VRB	0.03-3	sn-10h	0.5-2	5-20	5-20	>10000	60-75	Küçük
ZnBr	0.05-2	sn-10h	1-25	5-10	5-10	1000-3650	65-75	Küçük

Burada bataryaların enerji verimliliği, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, hayat döngüsü, şarj hızları ve maliyet parametrelerine göre enerji depolama sistemlerinin seçimi yapılmaktadır.

1.1.3.1. Kurşun – asit bataryalar

Kurşun asit (PbA) bataryalar 1850 - 60'lı yıllarda Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından bulunan en eski ve olgun batarya sistemidir. Dünyada en çok kullanılan batarya çeşididir. Starter aküler en çok tercih edilen akü tipidir. Araçların ilk başlama, ateşleme, aydınlatma ve bazı araçlarda hareket fonksiyonlarını yerine getirir (Şekil 14).



Şekil 14. Kurşun-Asit Batarya Gösterimi (Enersys, 2020)

İnce plakalı tipleri, yüksek başlangıç akımı gerektiren yerlerde ince plakaların daha fazla yüzey alanı oluşturmasından dolayı kalın plakalardan daha fazla tercih edilir. Bu tip yüksek demeraj akımı içeren derin döngülü traksiyoner aküler ise forklift, vinç gibi hareketli araçlarda kullanılır.

Güç kesilmesinin istenmediği yerlerde ise kalın plakalı sabit bataryalar kullanılır. Kendini kanıtlamış bu eski sistem yedekleme gücünün gerektiği yerlerde (veri merkezleri gibi) kullanılır. “Sektöründeki en büyük başarılarından biri Pb-asit bataryaların %98 oranında geri dönüşümünün sağlanmış olmasıdır” (Can Güven ve Gedik, 2019).

1.1.3.2. Nikel – kadmiyum bataryalar

Nikel – kadmiyum (NiCd) bataryalar şarj edilebilir bataryalardır. Elektrot kısmı nikel, metal kısmı kadmiyum ve sulu elektrolit potasyum hidroksit kullanılarak yapılmıştır. Düşük sıcaklıkta yüksek performans verir ve tatminkâr bir döngü özelliği vardır. Kendi kendine deşarj özellikleri yüksektir. Fakat kadmiyum zehirli ve ağır bir metaldir. Avrupa komisyonu bu pillerin %75 oranında geri kazanımını amaçlamıştır fakat yasaklayamamıştır. Günümüzde hala kullanılmaya devam etmektedir. Bu piller devamlı olarak tam deşarj ve sonrasında şarj edilmiyorsa belirli aralıklarla tam olarak deşarj şarj döngüsü yapılmalıdır. 1900’lerden sonra medikal ekipmanlarda kullanımı yasaklanmıştır fakat günümüzde hala geniş kullanım alanına sahiptir. Güneş enerjili istasyonlar, uzay araçları, telekominikasyon sistemleri bunlardan birkaçıdır.

NiCd bataryalar yapılarında barındırdıkları zararlı toksik maddeler nedeniyle gerek insan sağlığına gerekse çevreye yüksek derecede tehlike arz etmekte, geri dönüşümü doğru yapılmadığı takdirde ise çevreye ciddi zararlar verme riski taşımaktadır. Bu sebepten dolayı NiCd bataryaların üretim tesislerinde maliyeti arttıran su ve hava arıtma sistemi kullanılması zorunlu hale getirilmiştir (Cura, 2015). Çevreye verdiği zararlardan dolayı tramvay araçlarında kullanılmamaktadır.

1.1.3.3. Nikel metal hibrit bataryalar

Nikel metal hibrit (NiMH) şarj edilebilir bataryalardır. Yüksek enerji yoğunluklarının yanı sıra çevreye zarar vermemesi en büyük özelliklerindedir. Bu bataryalar hızlı şarj olabilmektedir fakat tam şarj olması ve tam deşarj olması yaşam döngülerini arttırmaktadır.

Nair ve Garimella(2010) nikel metal hibrit bataryalarla ilgili:

“Nikel metal hibrit bataryalar, nikel – kadmiyum bataryalara kıyasla %25 – 30 daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadırlar. Ancak, lityum – iyon bataryalara kıyasla bu konuda dezavantajlıdırlar. Ayrıca, self - deşarj konusundaki problemleri, nikel metal hibrit bataryalarını uzun zamanlı enerji depolaması açısından oldukça dezavantajlı konuma getirmektedir. Ancak maliyet açısından lityum – iyon bataryalardan daha avantajlı konumdadırlar” (s. 42).

NiMH bataryalar %100 geri dönüştürülmektedir. Eritme işleminden önce bu bataryalardan plastik ve metal parçalar ayrılmaktadır. Metaller "yüksek sıcaklık metal geri kazanım prosesi" ile geri dönüşüme kazandırılmaktadır (Can Güven ve Gedik, 2019).



Şekil 15 Alstom Citadis Tramvayında NiMH Batarya Ünitesi (USTG, 2013)

Gelişmiş performansı, çevre dostu olması ve maliyet bakımından da avantajları göz önüne alındığında yenilenebilir enerji alanında kullanılması öngörülmektedir. İhtiyaca ve projelendirilmesine bağlı olarak tramvay araçlarında kullanılması uygundur (Şekil 15). Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur.

1.1.3.4. Lityum – iyon bataryalar

Lityum iyon bataryalar ticari olarak 1990'lı yılların başında Sony tarafından kullanılması ile yaygınlaşmıştır. Taşınabilir elektronik cihazlar olan cep telefonu, Bluetooth kulaklık, dizüstü bilgisayar vb. cihazlarda lityum – iyon bataryalar dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lityum – iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna, güç yoğunluğuna ve yüksek çevrim döngüsüne sahiptirler. Dolayısı ile yüksek kullanım ömrüne sahiptirler. Bakım gerektirmezler, boyutları küçüktür ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. En önemli dezavantajı ise yüksek kurulum maliyetleri ve kapasite dışı fazla şarj olma riskidir.

“Li-ion bataryanın üretimi esnasında kullanılan enerji 25-30 kWh kg-1 iken geri dönüşümü için tüketilen enerji 47 kWh kg-1'dir Ancak, neredeyse %99 oranında geri dönüşüm olanağı bulunan Li-ion bataryaların yaklaşık olarak %95'inin düzenli depolama sahalarına gönderildiği belirtilmektedir” (Can Güven ve Gedik, 2019). Yüksek kullanım ömrü, bakım maliyetleri, geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi özelliklerinden dolayı tramvay araçlarında kullanılması uygundur. Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur.

1.1.4. Süper kapasitörler

Elektrik enerjisini karbon elektrot ve sıvı elektrolit arasına stoklayan elektrostatik cihazlardır. Burada karbon elektrotlar yüksek yüzey alanına sahiptir. Süper kapasitörler, bataryalarla kıyaslandığında yüksek güç yoğunluğu ve yüksek enerji verimine (>%85) sahiptirler. Bundan dolayı, 20 - 25 saniye gibi kısa sürede şarj olabilmektedirler. Uzun çevrim sayısından dolayı uzun ömürlüdürler. Fakat enerji yoğunlukları bataryalara oranla düşüktür. Bundan dolayı depolanan enerjiyi kısa zamanda kullanmaz ise çok çabuk deşarj olabilmektedir. Süper kapasitörler geleneksel kapasitörlerin zaman içerisinde daha geliştirilmesi ile üretilmiştir. Bu yüzden güç ve enerji yoğunlukları geleneksel kapasitörlerden daha iyidir. Süperkapasitörler çok düşük sıcaklıklarda ve çok yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmektedir. Bu özelliği ile bataryalardan belirgin bir şekilde ayrılmaktadır.

Cura(2015) süperkapasitör teknolojisi ile ilgili olarak:

“Gerek yapılarında toksik malzeme barındırmamaları (geri dönüşümlerinin tehlike arz etmemesi ve çevre dostu olması), gerek milyon çevrim gibi oldukça uzun ömürlerinin bulunması, yapısal iç dirençlerinin bataryalara göre oldukça düşük olması nedeniyle şarj/enerji kayıplarının çok düşük olması ve bataryalarda görülen hafıza etkisi gibi kapasite kaybı göstermemeleri nedenleriyle süperkapasitör teknolojisinin gelecek vaad ettiği söylenebilir” demektedir.

Süper kapasitörlerin kullanılması ile beraber yeni yeni tecrübe edinilmesi, bataryalara göre ağır olması ve yüksek ilk yatırım maliyetlerinin yanı sıra, çevre dostu bir teknoloji olması, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, bakım masraflarının ve bekleme kayıplarının azlığı ile beraber otomotiv, demiryolu, rüzgâr enerji vb. sistemlerde hızla kullanılmaya başlanmıştır. Tek başına kısa mesafelerde uygulanabilir olmasına rağmen, uzun mesafelerde enerji yoğunluğu yüksek olan bataryalar ile birlikte kullanılabilirler.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında, İstanbul’da ve dünya genelinde yer alan tramvay işletmelerinde kullanılmakta olan enerjilendirme sistemlerinin özelliklerinin yer aldığı ürün katalogları, konu ile ilgili literatür taramalarında geçen değerlendirmeler ve işletme tecrübelerinden faydalanılmıştır.

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında İstanbul’da ve dünya çapında kullanılan veya kullanılması için geliştirilen katanerli ve katenersiz tramvay enerjilendirme sistemleri ele alınmıştır. Her iki tür sistemde de farklı üreticilerin sunduğu çözümler, estetik, enerji verimliliği, çevresel geri dönüşüm, çevre koşullarından etkilenme, yerlilik oranı, ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti gibi hususlardaki avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bütün bu değerlendirmeler neticesinde, belirtilen kriterler açısından tramvay sisteminin enerjilendirilmesi için optimum sistem tespit edilmiştir.

3. UYGULAMA

3.1. İstanbul'da Katenerli ve Katenersiz Tramvay Sistemleri

İstanbul'da aktif olarak işletilmekte olan beş adet tramvay hattı vardır. Bunlardan dördü katenerli olarak işletilirken bir tanesi katenersiz olarak işletilmektedir.

3.1.1. İstanbul'da katenerli tramvay sistemleri

İstanbul'da toplamda dört adet tramvay hattı hizmet vermektedir. Bunlar (T1) Bağcılar – Kabataş tramvay hattı, Taksim – Tünel tramvay hattı, (T3) Kadıköy – Moda tramvay hattı ve (T4) Topkapı – Mescid-i Selam tramvay hattıdır. Taksim – Tünel ve Kadıköy – Moda tramvay hatları nostaljik tramvay olarak, turistik ağırlıklı ve kısıtlı kapasite ile hizmet vermektedir. Bu sebeple nostaljik tramvay hatları bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.

3.1.1.1. Bağcılar – Kabataş tramvay hattı (T1)

T1 hattı modern olarak İstanbul'da hizmete giren ilk tramvay hattıdır. Hattın ilk etabı olan Aksaray – Beyazıt – Kapalıçarşı hattı Haziran 1992 yılında inşaatı tamamlanıp kullanıma açılmıştır. Sonrasında sırasıyla Temmuz 1992'de Beyazıt – Kapalıçarşı – Sirkeci, Aralık 1992'de Aksaray – Topkapı, Mart 1994'te Topkapı – Zeytinburnu, Nisan 1996'da Sirkeci – Eminönü, Ocak 2005'de Eminönü – Fındıklı – Mimar Sinan Üniversitesi, Haziran 2006'da Fındıklı – Mimar Sinan Üniversitesi – Kabataş uzatmaları yapılmıştır. Eylül 2006'da Zeytinburnu – Kabataş Tramvay Hattı hizmete girmiştir.



Şekil 16. T1 Tramvay hattı güzergâhı (Metro İstanbul, 2021)

Hattın Bağcılar – Zeytinburnu kısmı ise T2 hattı olarak Eylül 2006'da hizmete açılmıştır. Ocak 2011'de Alstom Citadis İstanbul markalı alçak taban araçların İstanbul'a getirilmesi ile Şubat 2011'de T1 ve T2 hatları birleştirilerek T1 (Bağcılar – Kabataş) Tramvay hattına dönüştürülmüştür.

Hattın tamamındaki istasyonlar, hem Alstom Citadis İstanbul araçlarına uyumlu hem de alçak tabanlı araçlara uygun olarak inşa edilmiş olup bu hatlarda engelli erişimi için uygun teknik

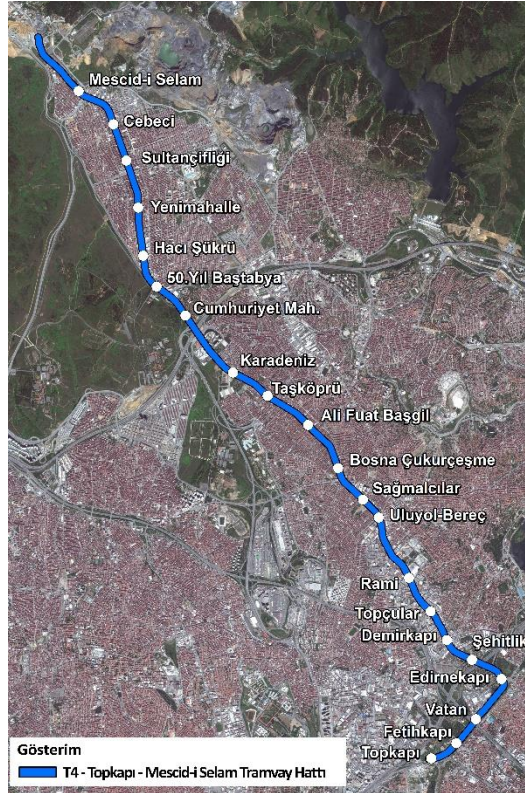
rampalar mevcuttur. Hattın toplam uzunluğu 19,3 km olup hattaki toplam istasyon sayısı 31'dir. Hattın işletme bilgileri aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 2. T1 İşletme Verileri

Hat Uzunluğu	19,3 Km
İstasyon Sayısı	31
Araç Sayısı	92
Sefer Süresi	65 Dk. tek yönde
İşletme Saatleri	06.00 - 00.00
Günlük Yolcu Sayısı	320.000 Yolcu
Günlük Sefer Sayısı	295 Sefer / Tek Yön
Sefer Sıklığı	2 Dk. (Pik Saatte)

3.1.1.2. Topkapı – Mescid-i Selam tramvay hattı (T4)

T4 hattının toplam hat uzunluğu 15,3 km'dir. Sultançiftliği ve Gaziosmanpaşa bölgesinin yolcu trafiğini taşımak için 7'si yerin altında olmak üzere toplam 22 istasyona sahiptir. Günlük ortalama 190.000 yolcu ile İstanbul raylı sistem ulaşımında en çok kullanılan dördüncü hattır. Hattın 1. etabı Mescid-i Selam – Şehitlik istasyonları arası Eylül 2007 de açılırken 2. etabı olan Topkapı – Şehitlik arası Mart 2009'da açılarak iki hat birleştirilip Topkapı – Mescid-i Selam arasında seferler başlamıştır.



Şekil 17. T4 Tramvay hattı güzergâhı (Metro İstanbul, 2021)

Yüksek tabanlı tramvay araçlarının kullanıldığı bu hatta 3 farklı araç seti kullanılmaktadır. Bunlar Düwag B100, Hyundai Rotem LRV34, yerli tramvay "İstanbul" dur. Cumhuriyet istasyonu haricindeki tüm istasyonlarda engelli ve yaşlı yolcuların erişimi için rampalar ile yer altı istasyonlarında asansör ve yürüyen merdivenler bulunmaktadır.

Tablo 3. T4 İşletme Verileri (Metro İstanbul, 2020)

Hat Uzunluğu	15,3 Km
İstasyon Sayısı	22
Araç Sayısı	83
Araç Seti	3
Sefer Süresi	45 Dk. tek yönde
İşletme Saatleri	06.00 - 00.00
Günlük Yolcu Sayısı	190.000 Yolcu
Günlük Sefer Sayısı	446 Sefer / Çift Yön
Sefer Sıklığı	3 Dk. (Pik Saatte)

3.1.2. İstanbul'da katenersiz tramvay sistemleri

Türkiye'nin ikinci katenersiz tramvay sistemi İstanbul'da yer almaktadır. Alibeyköy'den başlayarak, Haliç kıyısı boyunca devam eden, İstanbul'un tarihi ve turistik bölgelerinden Eyüpsultan ve Eminönü kesimlerinde hizmet veren Eminönü-Alibeyköy tramvay hattı, gelişen teknolojiye ayak uydurmak ve estetik bir raylı sistem hattı oluşturmak üzere katenersiz olarak projelendirilmiş ve inşa edilmiştir.

3.1.2.1. Eminönü – Alibeyköy tramvayı (T5)

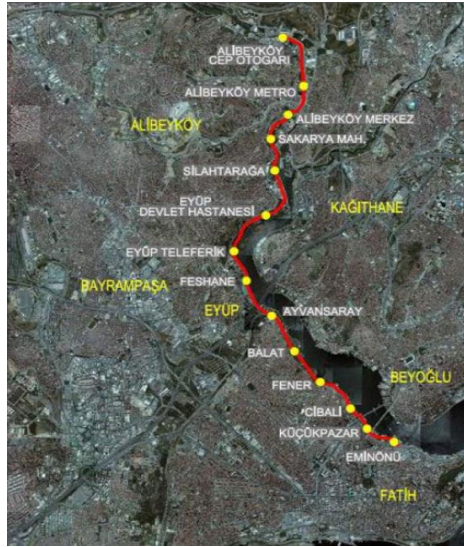
T5 tramvay hattının toplam uzunluğu 10.1 km'dir. Alibeyköy Cep Otogarı durağından başlar, Haliç kıyısında hareket ederek Eminönü'ne kadar devam eder. Toplam 14 istasyondan oluşmaktadır. Minimum yatay karp yarıçapı 50 metre, duraklarda bekleme 20 saniye, boyuna eğim max. %6.5, hattın tasarım hızı korumalı kesimlerde max. 50 km/saat, ortalama işletme hızı 17 km/saat olarak planlanmıştır.

Eminönü – Alibeyköy tramvay hattı (T5) hattı; Bağcılar – Kabataş tramvay hattı (T1) ve şehir hatları (feribot) ile Eminönü istasyonunda, Fener ve Feshane istasyonlarında Şehir hatları ile, Hacı Osman – Yenikapı metro hattı (M2) ile Küçükpazar İstasyonu'nda, Eyüp - Piyer Loti teleferik hattı (TF2) ile Eyüp Teleferik İstasyonu'nda, Mecidiyeköy - Mahmutbey Metro Hattı (M7) ile Alibeyköy Merkez İstasyonu'nda entegre olup raylı sistemler hatları için oldukça önemli bir geçiş noktası olacaktır.

Tablo 4. Eminönü-Alibeyköy Tramvayı İstasyon İsimleri ve Kilometre Bilgileri
(Bahadıroğlu, 2020)

İstasyon	Km	Ara Mesafe(m)
Eminönü	0+074	0
Küçükpazar	0+734	660
Cibali	1+186	452
Fener	1+935	749
Balat	2+765	830
Ayvansaray	3+476	711
Feshane	4+342	866
Eyüp Teleferik	4+972	630
Eyüp Devlet Hastanesi	5+899	927
Silahtarğa	7+070	1171
Sakarya Mahallesi	7+668	598
Alibeyköy Merkez	8+232	564
Alibeyköy Metro	8+910	678
Alibeyköy Cep Otogarı	10+138	1228
Hat Sonu	10+148	10

Hattın ilk bölümü olan Alibeyköy Cep otogarı – Cibali arası 2021 yılı içerisinde işletmeye açılacak olup kalan kısım olan Cibali – Eminönü arası Unkapanı köprüsü altından yaklaşık 300 m alt geçit açıldıktan sonra Eminönü tarafı inşaatı devam edilecektir. Hat genel olarak rekreasyon alanı içerisinde geçmektedir. Hemzemin olarak geçen karayolu kesişim bölgeleri ve yaya erişim yolları sinyalizasyon sistemleri ile geçilmiştir.



Şekil 18. Eminönü-Alibeyköy Proje Güzergâhı (Metro İstanbul, 2020)

Eminönü – Alibeyköy hattı Türkiye'nin ilk katenersiz sistemi olan Alstom APS sistemi ile inşa edilmiştir. Hattın iki yönlü olarak 20.2 kilometresi katenersiz cer gücü olan yerden besleme sistemi ile yapılmıştır. APS sisteminde Cer enerjisini enerji pabucu sayesinde gömülü olan üçüncü bir raydan alır. Enerji rayları alt temel olan betona tespitli olarak yapılmaktadır.

Tramvay araçlarında iki adet fırça bulunur ve biri tramvay aracının bir ucunda diğeri ise diğeri ucunda yer alır. Fırçalar, APS rayı üzerindeki pislikleri ve engelleri temizler, kolektör pabuçlarıyla

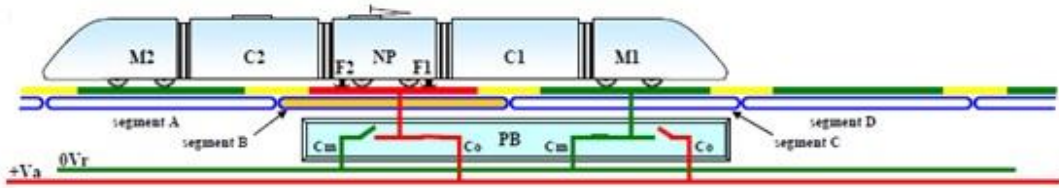
herhangi bir darbe gelmesini engeller. Bu fırçalar, tramvay APS modunda iken aktive olur, yani fırçaların konumu kolektör pabuçlarının konumuna karşılık gelir.



Şekil 19. APS Rayı Temizleme Fırçası (Metro İstanbul, 2020)

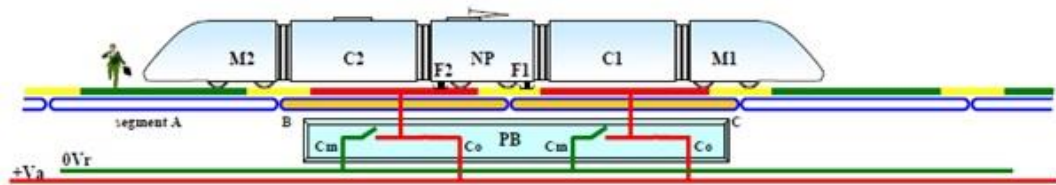
Düz bir hat düzeninde APS rayı, iki çalışan ray arasında hattın ortasında yer alır. Kurp bölgelerinde ise APS rayı yana doğru kayıktır ve konumu, araç altında yer alan APS kolektör pabucunun yoluyla belirlenir. Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü elektronik cihazı tarafından üretilerek, kolektör pabucuna entegre bir anten ile iletilir. Bu kodlanmış sinyal, bir segment üzerinde sürekli ve güvenli bir şekilde algılanır ve böylece bu segmente enerji beslemesi için izin alınır ve enerji beslemesi devam ettirilir. Bu prensibe dayanarak, sadece tamamıyla aracın kapsadığı alan içinde yer alan segmentler enerji ile beslenir.

APS Sistemini detaylı inceleyecek olursak;



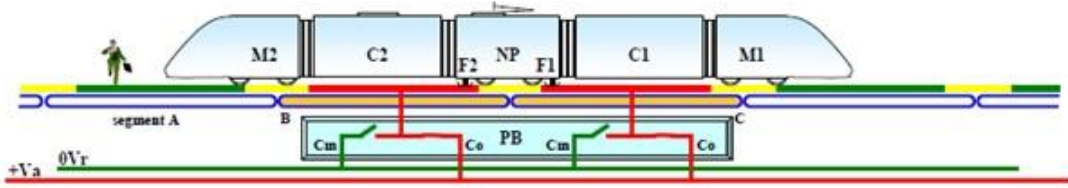
Şekil 20. F1 ve F2 B Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araç cer enerjisini elektrikli B segmentinden alır. Ön kolektör pabuçları (F1) ve arka (F2) enerjilenir. B segmenti aracın altında ulaşılabilir değildir. A, C ve D segmentleri 0Vr'ye bağlanır (Şekil 20).



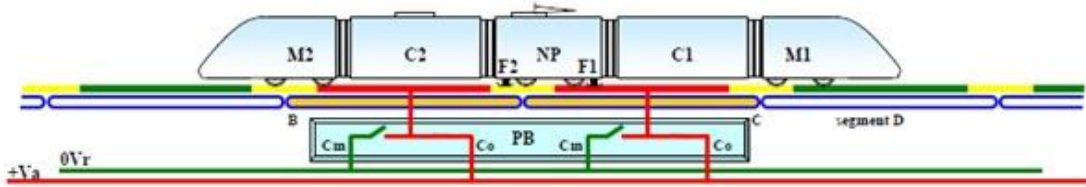
Şekil 21. F2 ve F1 B Segmentinde, F2 Enerjili (Alstom, 2020)

Araç, F2 ve B ile enerjilenir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmenti üzerinde alış döngüsünü yayınlar. C segmenti enerjilidir ancak kolektör pabucu F1 henüz bu segment üzerinde kaymıyordur. C üzerinden herhangi bir enerji verilmiyorken Co ve Cm anahtarları. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 21).



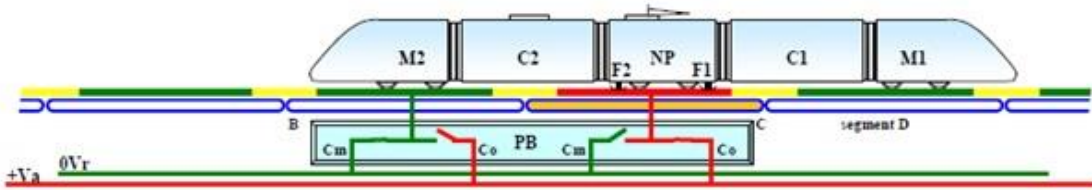
Şekil 22. F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca B ve C segmentlerinden iki adet kolektör pabucu ile enerji verilir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmentinde alış döngüsünü yayınlar. Kolektör pabucu anteni F2, B döngüsüne yayın yapar. A ve D, 0Vr'ye bağlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 22).



Şekil 23. F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F1 Enerjili (Alstom, 2020)

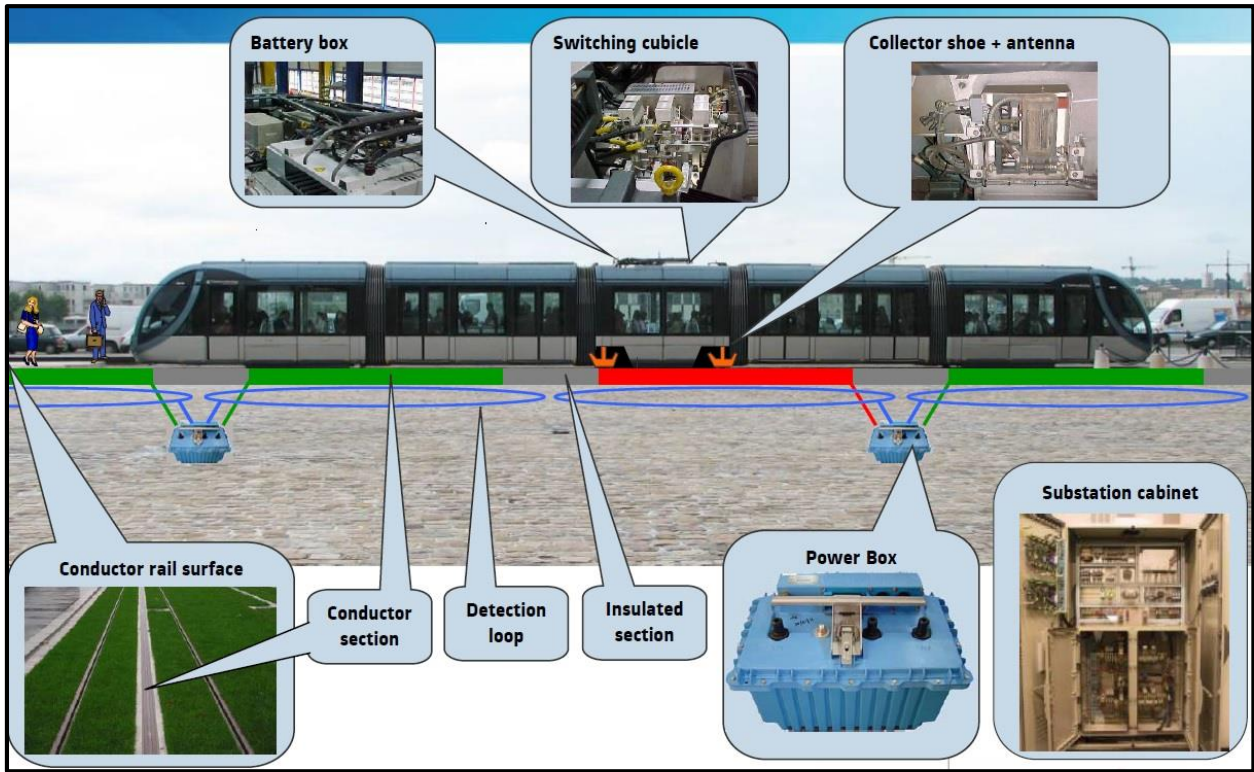
F2, B segmentinin iletken kesiminden ayrılmıştır. Araca F1 kolektör pabucuyla enerji verilir. F2 ile bağlantılı olan anten, enerjili olmaya devam eden alış döngüsü B'ye yayın yapmayı sürdürür. A ve D, 0 Vr'ye bağlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil23).



Şekil 24. F2 ve F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca C segmentinden alış gerilimi ile enerji verilir. Ön (F1) ve arka (F2) kolektör pabuçları enerjilidir. Enerjili C segmenti aracın altında ulaşılabilir değildir. A, B ve D segmentleri 0 Vr'ye bağlanır (Şekil 24).

Sadece APS devresi emniyetli bir durumda olduğunda sistem arızalı enerji kutusunun (PB) izole edilmesine izin verir. Arızalı PB izole edildikten sonra arızalı enerji kutusunun (PB'nin) değiştirilmesini beklemeye gerek olmadan APS sistemi kaldığı yerden çalışmaya devam edebilir. Eğer enerjisiz kalan bölge kısa ise (örneğin 22 m), araç kendi hızıyla bu kesimi geçer. Araç enerji temininin geri geldiğini algılayamaz, cer gücü tekrar kazanılır ve tren "normal" moda geri döner.



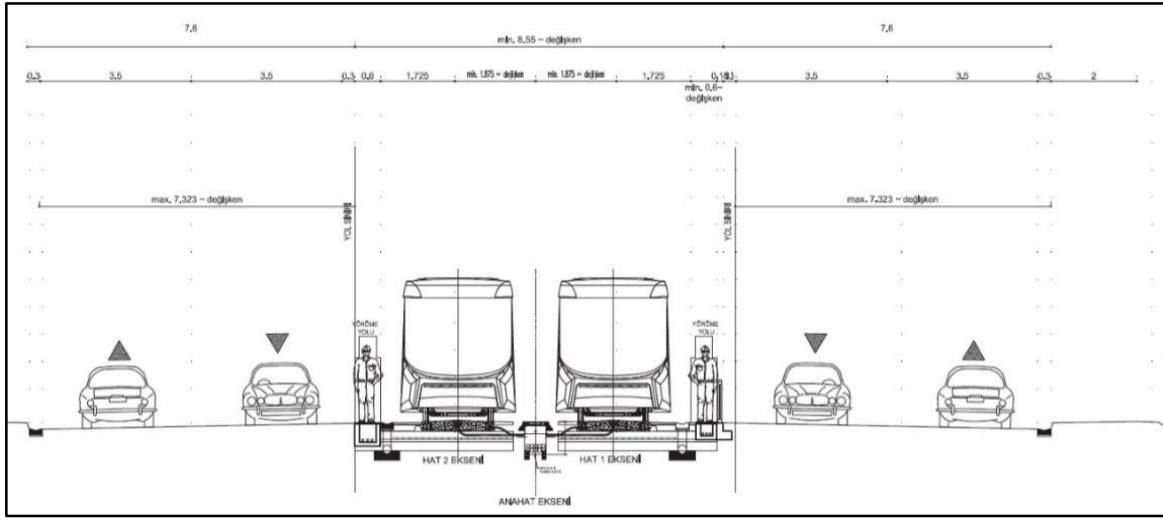
Şekil 25. APS Araç Üstü Ekipman ve Sistem Kesiti (Alstom, 2020)

Enerjisiz kalan bölge aracın kendi hızıyla geçilemiyorsa (örneğin enerjisiz bölgenin çok uzun olması, tren düşük hızdayken bir rampa üzerinde olması, istasyonda bulunması gibi), bu durumda tren durur ve makinist, sadece sınırlı bir süreliğine cer modunu APS araç üstü bataryaya manuel olarak geçirir. APS raylarından gelen cer enerjisi, APS enerjili bölgesi tekrar algılanır algılanmaz hemen geri kazanılır.



Şekil 26. Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hat Kesiti (Metro İstanbul, 2020)

Tüm APS altyapısı yere gömülü durumdadır, dolayısıyla bu altyapı dışardaki yol yüzeyi için görünen yapı sunmaz ve tren besleme sisteminin kamuya açık alan üzerindeki etkisini azaltır, tüm tramvay hattı boyunca tüm havai engelleri de ortadan kaldırır. Bunun yanı sıra APS sistemi, kamuya açık alanlarda elektrikli iletken bölümleri sakladığı için daha avantajlıdır (Şekil 26).



Şekil 27. Eminönü-Alibeyköy Tramvayı Proje Kesiti (Bahadıroğlu, 2020)

Enerji raylarının hata payları 2 mm'dir. Haliç bölgesinin zemin yapısı deniz dolgusu şeklinde killi bir yapıdadır. Haliç gibi bu tarz kötü zeminlerde hat üst yapısında oluşabilecek oturmaların önüne geçmek için zemine kazık çakılmış ve hat üst yapıları bu kazıkların üzerine oturturulmuştur. Zeminin daha mukavim olduğu yerlerde zemin iyileştirme kapsamında kaya dolguları yapılmış ve üzerine hat üst yapılar yapılmıştır. Hatta 4 adet köprü, 6 adet trafo merkezi, toplamda 34 adet sinyalize kavşak ve yaya geçidi bulunmaktadır. Sinyalize olmayan 27 adet yaya geçidi bulunmaktadır.

Depo sahasında ve araç bakım yollarında araçlar enerjiyi genel olarak konvansiyonel katenerden sağlayacaktır. Araçların üst kısmında enerjiyi katenerden alabilmesi için pantograf bulunacaktır. Bu araçlar aynı zamanda diğer tramvay hatlarında da çalışabilecektir. Araçlar yerli firma olan Durmazlar tarafından yapılmaktadır.

Bu projede, Alstom firması dünyada ilk defa Alstom APS sistemini kendi araçları dışında başka firmanın araçlarına, kendi sistem ekipmanlarının monte edilerek kullanılmasına izin vermiştir. Hazırlanan araçlar Eylül 2020'de hatta getirilmeye başlanmıştır. Hattın ilk kısmı olan Alibeyköy Cep Otogarı – Cibali arasının Ocak 2021 de bitirilmesi planlanmaktadır. Kalan kısmının (Eminönü – Cibali) ise 2021 yılı içerisinde açılması planlanmaktadır (Şekil 28).



Şekil 28. Eminönü-Alibeyköy Tramvay Aracı (Bahadroğlu, 2020)

3.2. Katenerli ve Katenersiz Tramvay Hatlarının İncelenmesi

Tramvay; karayolu ulaşım araçları ile aynı yolu kullanan, güzergâhı üzerinde bulunan raylar üzerinde hareket eden bir makinist tarafından kumanda edilen elektrik enerjisini katener telinden, üçüncü bir enerji rayından veya araç üstü enerji depolama sistemlerinden (ESS) alan, zemine yakın, düşük kapasiteli kentsel raylı toplu taşıma araçlarıdır.

Hemzemin geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtları ile aynı yolu kullanma zorunluğu olduğundan mevcut karayolu trafik düzenine uymak zorunda olup geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtlarına geçiş üstünlüğü vardır.

Tablo 5. Ulaşım Sistemlerinden Fiziksel Özellikler ve Trafik Esnekliği (Baştürk, 2014)

Ulaşım Türü	Fiziksel Özerklik	Esneklik
Otomobil	Yok	Tam
Dolmuş	Yok	Yarım
Minibüs	Yok	Yarım
Otobüs	Yok	Yarım
Metrobüs	Yarım	Yarım
Tramvay	Yarım	Yok
Metro	Tam	Yok
Tren	Tam	Yok
Vapur	Tam	Yarım

Tramvay sistemleri nüfusu fazla olmayan yerleşim birimlerinde ana ulaşım sistemi olabilir fakat nüfusu fazla olan yerleşim birimlerinde ana ulaşım sistemlerine entegre olarak kullanılan hatlardır.

Dünyanın birçok kentinde ana çekirdek ulaşım sistemleri tramvaylar ile sağlanmaktadır. Tramvaylar şehir içi ulaşımı sağlamakla birlikte ana toplu taşıma hatlarına entegre olarak yolcularını bu sistemlere aktarırlar.

Tramvay inşaatları güzergâh özellikleri de göz önüne alınarak diğer sistemlere oranla daha az inşaat maliyetleri getirmektedir. Bu yüzden dünyanın pek çok şehrinde kullanılmaktadır. Genel olarak bir tramvay aracı; 4 – 6 akslı, 14 – 21 m boyunda 100 – 180 yolcu kapasiteli ve kapasitenin %20 – 40'ı oturan yolculu araçlardır. Fakat Avrupa'nın birçok kentinde 35 – 53 metre boyunda 5 – 7 akslı aracın köruklerle bağlanması ile 350 kişi kapasiteli tramvay araçları da kullanılmaktadır. Tramvay, hatları hemzemin yollardaki trafiğin içine girdiğinden dolayı işletme hızları genellikle 25 – 35km/saat ve maksimum işletme hızı 50 – 60 km'de tramvay ve hattın özelliklerine göre değişmektedir.

Tramvay araçlarında enerji temini, katener diye bilinen havai besleme hatları, yerden üçüncü bir enerji rayı ile besleme yapan hatlar ve araç üstü enerji depolama sistemleri (ESS) tarafından sağlanmaktadır. Yaygın olarak 750 V DC kullanılır ve ray açıklığı 1435 mm'dir.

Türkiye'nin dokuz şehrinde katenerli tramvay hatları hizmet vermektedir. Bunlar Antalya T1, T2 tramvay hatları, Bursa T1, T2, T3 tramvay hatları, Eskişehir hafif raylı sistem işletmesi, Gaziantep T1, T2, T3 tramvay hatları, İzmir T1, T2 tramvay hatları, Kocaeli Akçay tramvay hattı, Konya T1, T2 tramvay hatları, Samsun tramvay hattı ve İstanbul T1, T2, T3, T4 tramvay hatlarıdır. İstanbul'da ve Türkiye'de ilk yerden CER gücü beslemeli katenersiz tramvay hattı olan T5'in ise Ocak 2021'de birinci kısmı kullanıma açılacaktır.

3.2.1. Katenerli hatların özellikleri

Katener sistemi orta gerilim enerjisinin yerel elektrik dağıtıcı firmalardan temin edilerek trafo merkezlerinde uygun elektriksel ekipmanlar vasıtasıyla 750 V DC besleme gerilimine dönüştürüldükten sonra raylı sistem hatları boyunca taşınarak araçlara ulaştırıldığı havai hat sistemidir. Araç işletme sırasında katener sisteminden gerekli enerjiyi üstünde bulunan pantograf yardımı ile alır.

Katener sistemleri konvansiyonel katener sistemi ve rijit katener sistemi olarak iki ana kısma ayrılır. Konvansiyonel katener sistemleri de kendi içinde ikiye ayrılır. Bunlar otomatik gergili katener sistemi (ATCS) ve sabit gergili katener sistemidir (FTTW). Otomatik gergili katener sistemi ana hat güzergâhında maksimum hız olan saatte 100 km'ye kadar kullanılır. Sabit gergili katener sisteminde, işletme hızı maksimum hızı saatte 40 km olan nostaljik tramvaylarda, depo ve garaj sahalarında kullanılır.

Rijit katener sistemi, Al kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden oluşmaktadır. Tünelde üçüncü raya alternatif olsun diye üretilmiştir. Bakımı daha kolay ve üçüncü raya göre daha esnektir. 250 km/saat hıza kadar kullanılabilir. Rijit katener sistemi araç bakım yollarında gergili katener yerine kullanılabilir.

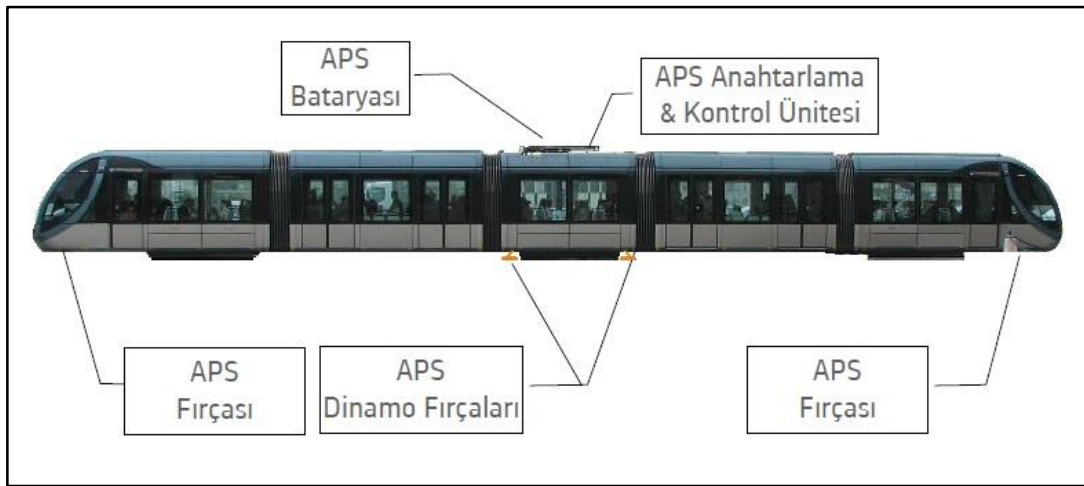
3.2.2. Katenersiz hatların özellikleri

Dünyada raylı sistemlerde elektrifikasyon teknolojilerinin gelişmesi ile beraber katenerli sistemlere alternatif olarak, çoğunlukla yoğun şehir merkezlerinde ve tarihi kentsel alanlarda kullanılmakta olan katenersiz sistemler de geliştirilmiştir. Bu sistemlerin özellikleri, üretici firmalara ve uygulanan yöntemlere göre kendi içerisinde farklılık göstermektedir.

3.2.2.1. Alstom APS sistemi

Enerji rayları kavşaklarda ve hemzemin yol geçişlerinde kara yolu araçlarının yüklerine maruz kalmaktadır. Firma sistemin karayolu araçlarının oluşturduğu yüklerden hasar görememesi için segmentlerin dayanımını 13,5 ton/aks olarak ayarlamıştır.

Araç üstü enerji depolama sistemlerinde süper kapasitörlerin enerji yoğunlukları düşük olduğu için durak arası mesafe planlamalarında kısa durak planlaması gerekmektedir. Bu yüzden enerji yoğunluklarını yükseltmek ve duraklar arası mesafeyi açmak için araçlara batarya eklenmelidir. Bu da, aracın daha da ağırlaşmasına ve fazla güç harcamasına sebep olacaktır. Bu sistemlerin kullanılması planlanan projelerde durak mesafeleri araç üstü enerji depolama sistemlerinin performansına göre yapılmaktadır. Alstom APS sisteminde araçlar yerden sürekli cer gücü ile beslenmektedir. Bu yüzden Hat ve güzergâh planlamalarında durakların yoğunluk ihtiyacına göre planlamasının önünü açmaktadır. Bu da, ilk yatırım inşaat maliyetlerini düşürmektedir.



Şekil 29 Alstom APS Sistem Elemanları (Alstom, 2020)

Tramvay araçları ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadır. Araç üstü enerji depolama sistemlerinde çalışan araçlarda dur kalk yapılması, sıkışık trafik ve beklemler havalandırma sistemlerinde ve aydınlatma sistemlerinde enerji düşüşüne sebebiyet verebilirken, katenerli sistemler gibi araç sürekli cer beslemesinde olduğundan sorun oluşturmamaktadır. Bu beklemler sadece işletme süre kaybına neden olmaktadır. Bu yüzden sürekli yerden beslemeli veya katener sistem beslemeli araçlar araç üstü enerji depolama sistemleri ile çalışan araçlara göre daha avantajlıdır.

Kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumunda kollektör papucu ve iletken segment arasında temas kesildiğinden araç, enerji alamadığı için çalışamayacaktır. Bordeaux hattında bu sebeplerden dolayı işletmede aksamlar meydana gelmiştir. Kar, buzlanma ve aşırı yağmur durumlarında işletme performanslarını güvence altına almak amacıyla enerji kesintileri durumunda tramvayın çalışması için yedek batarya ünitesi araçta bulundurulabilir. Mevsim şartlarının sert geçtiği bölgelerde bu konuya dikkat edilmelidir.

Aşırı yağış sel gibi durumlarda güç kutuları (Power box) Bordeaux tramvayında devre dışı kalmıştır. Fakat, firma sonradan güç kutularını ve kollektörleri su geçirmez kılıf ile kaplamıştır. EN 60529 standardına uygun şekilde 15 gün 1 metre derinliğe kadar suya dayanıklılığını garanti etmektedir.

Alstom APS sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı yoktur. Ancak ilave bir süper kapasitör ve/veya batarya ile mümkün olmaktadır. İlave araç üstü süper kapasitör ile %25 – 30 arası enerji tasarrufu yapılabilirken, yalnızca batarya ile bu oran %10 seviyelerinde kalmaktadır.

Alstom APS sisteminde araç üzerinde enerji rayını aktif eden anten, enerji kollektörü ve APS kabinleri araç dışında power box ekipmanları, APS segmentleri vb. gerekli ilave ekipmanlar bulunmaktadır. Katenerli sistemlerde kullanılan altyapı ve ekipmanlar ile APS sisteminde kullanılan alt yapı ve ekipmanların toplam fiyatları kıyaslandığında maliyette 7 – 8 kat bir maliyet artışı olmaktadır.

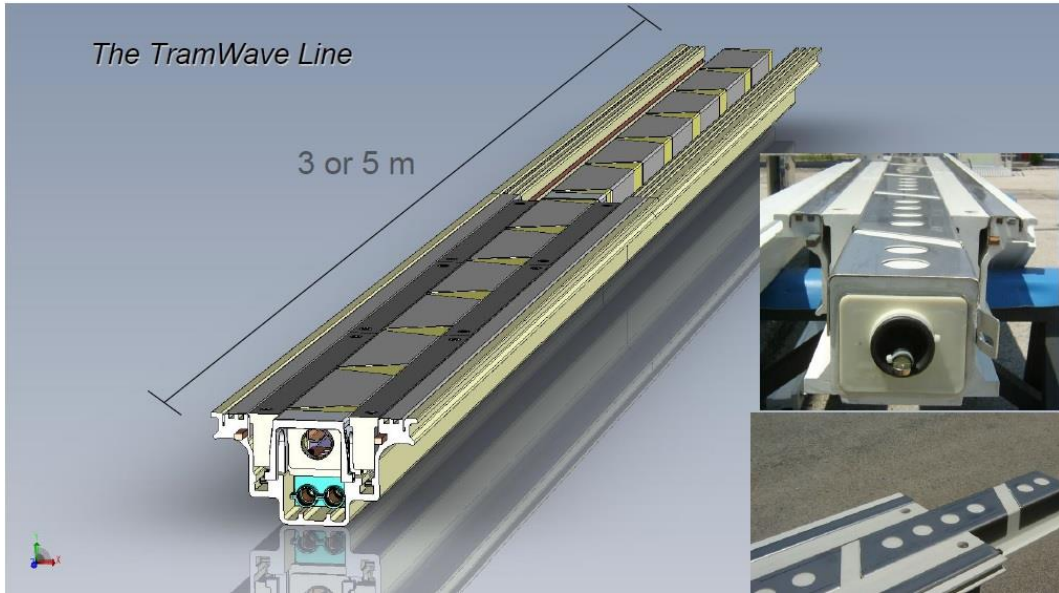
Alstom APS sisteminin parça maliyetleri yüksek olduğu için bakım maliyeti katenerli sistemlere oranla fazladır.

3.2.2.2. Ansaldo Tramwave sistemi

Araçlar ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadırlar. Sıkışık trafik ve kavşak beklemelelerinde katenerli sistemler gibi araç sürekli cer beslemesinde olduğundan dur kalk yapması, sıkışık trafik ve beklemeleler araç için sorun oluşturmamaktadır.

Enerji kablosu segment içinde olduğundan dolayı bu sistemde su izolasyonu ve drenaj problemi APS sistemine göre daha iyi durumdadır. Kaplama üzerindeki su birikimi 10 cm'den daha büyük olmadığında araç sürekli olarak güç besleyebilir. Modül üzerindeki biriken suyun yüksekliği 10cm'yi aştığında, sistem su birikme süresi 2 saati aştıktan sonra DC 750V güç beslemesi durmaktadır.

Besleme segmentlerinde oluşabilecek arızalar komple tanılama ve algılama sistemi seti ile tespit edilir. Bu arızalar kontrol merkezine iletilir. Kontrol merkezi arızaları sisteme yükler. Segmentlerin bakımı ve motajı hızlı ve kolaydır. Yarım saat içinde besleme modülü yenisi ile değiştirilebilir.



Şekil 30 Ansaldo Tramwave Hat Kesiti (Ansaldo, 2020)

Tramwave sisteminde, rejeneratif fren yoluyla belirli bir elektrik enerjisi geri kazanabilir ve kullanıcı açısından işletim giderinden tasarrufta bulunacak şekilde elektrik enerjisini doğrudan enerji şebekesine aktarır. Bu da sistem için bir artıdır.

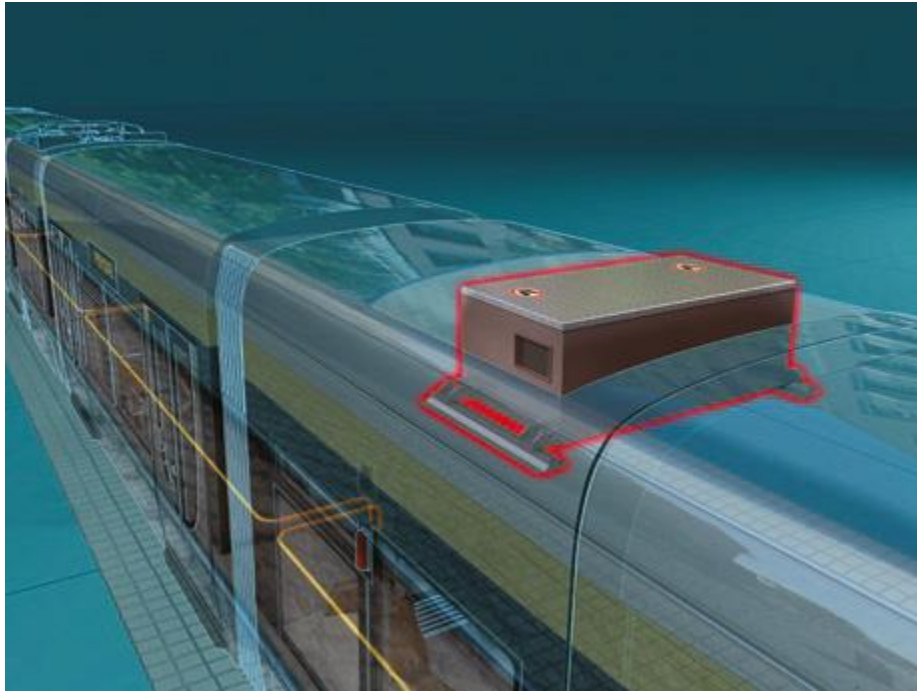
Kollektör papucu karlanma ve buzlanma durumunda segmente yeteri kadar temas edemeyeceğinden dolayı cer gücü yeterince araca iletmez ve işletme kayıpları oluşabilir. Aktif olarak sistem 2014 yılının sonlarına doğru Çin'in Zhuhai kentinde teknoloji paylaşımı olarak uygulamaya başlanmıştır. Maliyet olarak katenerli sistem ve APS arasında kalmaktadır. Fakat, sistemin yurt dışı lisans hakları Ansaldo firmasına aittir. Mevcut sistemi deneyen ve ticari olarak ilk kullanan CRRC firmasının yurt dışı lisans hakkı yoktur. Çin içerisinde geçerli lisans hakkına sahiptir. Bu yüzden, firmanın Çin dışında kullanılması AnsaldoSTS – CRRC firmalarının anlaşmasından sonra mümkün olacaktır.

3.2.2.3. Bombardier Primove sistemi

Araçlar ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadırlar. Sıkışık trafik ve kavşak beklemelerinde endüktif güç transferi sayesinde sürekli cer beslemesinde olduğundan dur kalk yapması, sıkışık trafik ve beklemeler araç için sorun oluşturmamaktadır.

Sistem, gömülü olmasından dolayı karayolu trafiğinde herhangi bir zarar görmemektedir. Sistem Almanya'da hibrit otobüslerde denenmiş ve başarılı olmuştur.

Cer gücü enerjisini, endüktif güç transferi şeklinde aldığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.



Şekil 31 Primove Sistem Mitrac Bataryası (Bombardier, 2020)

Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı yoktur. Ancak, araç üstü enerji depolama sistemleri sayesinde bu enerji kullanılabilir.

Oluşan 20 kHz üç fazlı manyetik alandan dolayı kalp pili, cep telefonları ve diğer elektronik eşyalara hiçbir etkisinin olmadığı Bombardier tarafından bildirilmiştir.

Cer gücü enerjisini endüktif güç transferi şeklinde aldığından aşırı yağış, sel gibi durumlardan etkilenmez.

Enerji rayı olmamasından dolayı aşınma ve yenileme maliyetleri olmaz.

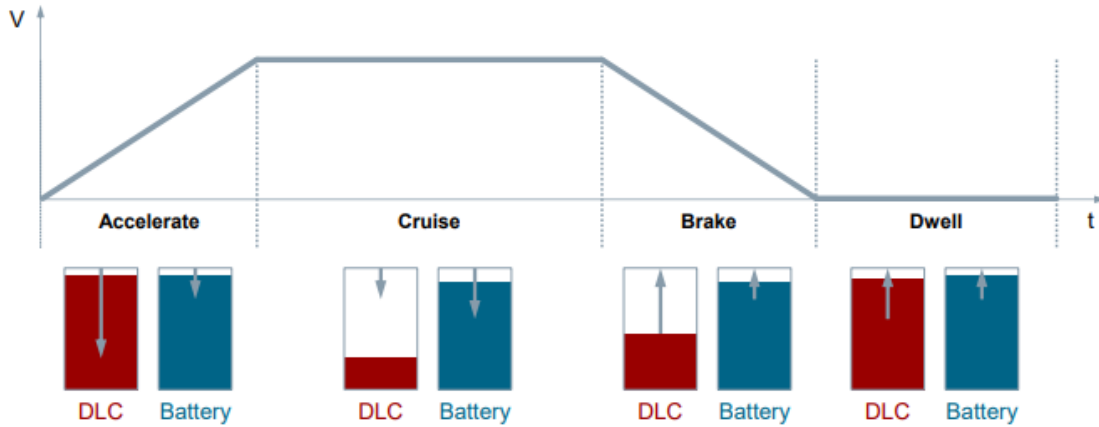
Bombardier Primove sisteminin tramvay araçları üzerinde herhangi bir ticari işletmesi bulunmamaktadır. Bu yüzden yatırım maliyetleri ile bilgi mevcut değildir fakat bu sistem için maliyet; endüktif sistem, batarya sistemi ve süper kapasitör sisteminin kombine maliyeti denilebilir.

3.2.2.4 Siemens Sitra HES & MES sistemi

Araç frenleme yaptığında rejeneratif enerji çift katmanlı kapasitörlere ve bataryaya şarj edilir. Bu sayede % 20 – 30 arası enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu sistemlerde araç durağa girerken enerjiyi rijit katenerden almaya başlar, istasyonda şarj işlemine devam eder ve ilk hareketinden istasyonu terk edene kadar enerji teminini rijit katenerden sağlar. Sistemin durakta şarj süresi 20 saniyedir.

Çift katmanlı kapasitörlerdeki enerjinin büyük kısmı normal hareket esnasında harcanır. Bu sayede bataryanın ömrü uzatılır.



Şekil 32 Siments Sitra HES&MES İşletme Sırasında Araç Şarj Prensibi (Siments, 2020)

Cer gücü enerjisini süper kapasitör ve batarya şeklinde sağladığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.

Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250.000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600.000 £ kadardır. Servis ömürleri 10 yıl gösterilmesine karşın kullanım sıklığı nedeniyle daha az kullanılması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri olmaktadır.

Bu sistemlerde aracın trafikli alanlarda dur – kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.

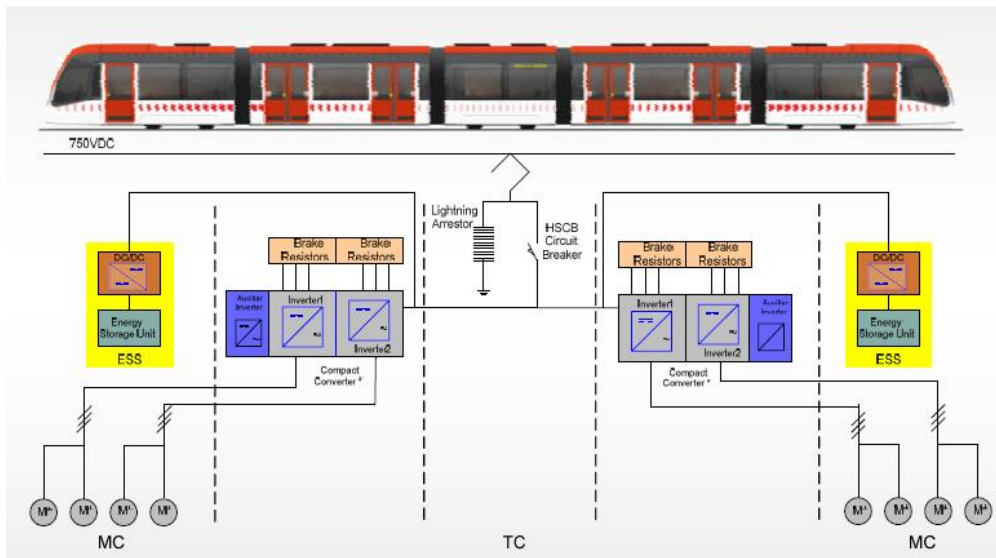
3.2.2.5. CAF süper kapasitör ve batarya sistemi

Sıkışık trafik ve kavşak beklemelelerinde, dur – kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi enerji harcamalarını süper kapasitör ve bataryadan yapacağı için enerji harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.

Duraklar arası mesafe enerji yönetim hesabına göre yapılmalıdır. Bu sistemde araç ilk hareket enerjisini süper kapasitörden almaktadır. Bu da, duraklar arası mesafenin daha da kısalmasına sebebiyet verebilir. Duraklar arası şarj istasyonları kurmak kaydı ile duraklar arası mesafe uzatılabilir.

Rejeneratif frenleme enerjisinin büyük bir bölümü bu sistemlerde geri elektrik enerjisine çevrilip süper kapasitör ve batarya tarafından depolanır. Bu sayede sistem %21 - 29 arası enerji tasarrufu sağladığı öngörülmektedir.

Cer gücü enerjisini süper kapasitör ve batarya şeklinde sağladığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.



Şekil 33 Caf Enerji Depolama Sistem Görünüşü (CAF, 2020)

Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600000 £ kadardır. Servis ömürleri 10 yıl gösterilmesine karşın kullanım sıklığı nedeniyle servis ömürlerinin azalması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri getirmektedir.

3.2.2.6. Bombardier Primove hibrit sistemi ve diğer bataryalı çözümler

Bombardier firmasının geliştirdiği Primove hibrit sistemi lityum iyon piller ve çift katmanlı süper kapasitörlerden oluşmaktadır. Firmanın tedarikçisi yalnız kendisi olup telifli üründür. Sistem olarak Siments Sitras HES & MES ve CAF süper kapasitör batarya sistemine benzemektedir ve aynı özelliklere sahiptir.

Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600000 £ kadardır. Servis ömürleri 8 – 10 yıl gösterilmesine karşın kullanım

sıklığı nedeniyle servis ömürlerinin azalması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri getirmektedir. Aynı zamanda araçlara ekstra yük getirdiğinden araç ağırlığı ve kullandığı enerji de %5 seviyelerinde artmaktadır. Bu sistemlerin tercihinde göz önüne alınması gereken özellikler; ilk yatırım maliyetleri olduğu kadar enerji hesabına göre yapılan inşaat maliyetleri (ek istasyonlar veya şarj istasyonları) ve yüksek bakım maliyetleridir.

3.3. Katenerli ve Katenersiz Hatların Birlikte Kullanılması

Katenerli sistemler katenersiz sistemlere göre daha uygun maliyetli sistemlerdir. Bu sebepten dolayı, dünya genelinde katenerli sistemler katenersiz sistemlere göre daha yaygındır. Fakat, şehir merkezlerindeki katener tellerinden dolayı oluşan kötü görüntüler, elektrik çarpma riskleri, yangın, katener direklerinin kapladıkları alan ve karayolu araçlarının bu direklere çarpması sonucu oluşan risklerin önüne geçmek amacı ile tramvay hattının şehrin çekirdek merkez içinde kalan kısmını katenersiz sistemle, kalan kısımlarını ise maliyet göz önüne alınarak katenerli sistem olarak yapılmıştır. Yani karma sistem uygulanmıştır. Karma sistemlerde Cer gücü, hem katener telinden, üçüncü bir enerji rayı ile yerden besleme sistemlerinden ve/veya araç üstü enerji depolama sistemlerinden (ESS'den) sağlanır.

Karma sistemlerde Sidney tramvayı buna bir örnek olarak gösterilebilir. Sidney tramvayında cer gücü enerjisi hem katenerden hem de yerden besleme sisteminden sağlanır. Toplam hat uzunluğu 12 km'dir.

Bu hattın şehir içinde kalan 2 kilometrelik kısmı Alstom tarafından APS olarak yapılmıştır.



Şekil 34. Sidney Tramvayı Katenersiz(APS) Kısım (Alstom, 2020)

Hattın kalan 10 kilometrelik kısmı ise yine Alstom tarafından konvansiyonel katenerli hat olarak yapılmıştır.



Şekil 35. Sidney Tramvayı Katenerli Sistem (Alstom, 2020)

Karma sistemlere katener sistem ile birlikte onboard araç üstü enerji depolama sistemleri kullanımı da örnek olarak verilebilir. Ülkemizde yapılmış olan Konya tramvayı mevcut 23 km'lik Alaaddin – Selçuk Üniversitesi hattına ek olarak yapılan 5,5 km'lik Alaaddin – Adliye hattının şehir merkezinden geçen 2 km'lik kısmı ilk yatırım maliyetleri ve mevsim özelliklerinden dolayı katenersiz onboard araç üstü depolama sistemleri ile geçilmiştir.

Konya şehrinin tarihi kısmından ve şehir merkezinden geçen kısmı olan Alaaddin – Adliye Hattı araç üstü enerji depolama sistemleri (ESS) ile geçilmiştir.



Şekil 36. Konya Tramvayı Katenersiz Sistem (Rayhaber, 2020)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünyada ve ülkemizde bulunan tramvay sistemleri incelendiğinde en yaygın olarak katener sistemler kullanılmıştır. Fakat teknolojinin gelişmesi ile ihtiyaçlar doğrultusunda katenersiz ve karma sistemler de dünyada ve ülkemizde kullanılmaya başlanmıştır. Konuyla ilgili sistemler;

1. Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemler
2. Katenersiz Cer Gücü ile Beslemeli Sistemler
 - 2.1. Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemler
 - 2.2. Enerji Depolamaya Dayalı Sistemler

olarak iki sisteme ayrılmıştır. Bu sistemlerin kullanımında avantajları ve dezavantajları değerlendirildiğinde;

Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemlerin Avantajları

- Dünya genelinde çok yaygın kullanılmaktadır. Kendini kanıtlamış bir sistemdir.
- Dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde üretilebilmesinden dolayı kolay tedarik edilebilen sistemlerdir.
- İlk yatırım maliyetleri uygundur. Kolay rekabet ortamı sağlanabilir.
- Yerli olarak üretilebilir, yerli üretimi ve istihdamı teşvik eder.
- Araç katener üzerinden sürekli CER gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yerlerde oluşan plansız bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma durumu olmaz.
- Araç üzeri enerji depolama sistemleri ile çalışan araçlar gibi duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlamaz.
- Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanım ve kullanım yöntemi ile ilgili bir kısıtlama yoktur.
- Kış aylarında tuzlama ve buzlanmadan etkilenmez.
- Aşırı yağmur veya sel durumlarında enerji kesintisi olmadan araç güvenli bölgeye kadar hareket ettirilebilir.
- Araç üstü enerji depolama sistemi ağırlığı olmayacağından araç daha hafif olacaktır. Bu şekilde az enerji kullanımı olacaktır.
- Bakım maliyetleri uygundur.
- Araçlar, diğer katenerli hatlarda da kullanılabilir.
- Enerji temini direk Havai hattan almasından dolayı taş, kaya, çöp vb. temizlik kaygısı yoktur.
- Kavşaklarda ve hemzemin geçit bölgelerinde oluşan trafik sıkışıklığından ve dur/kalklardan enerji temini açısından etkilenmez.
- İstasyonlar arası mesafe sınırı yoktur.
- Bakım yapılarak değiştirilen kontak telinin geri dönüşü vardır.

Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemlerin Dezavantajları

- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet verir.
- Katener direklerinin iki hat ortasına konumlanması hat kesitinde büyümelere sebebiyet verir. Bundan dolayı tramvay hattının oluşturduğu izole bölgelerin büyümesi ve karayolu taşıtların mevcut ulaşım yollarında 30 – 40 cm arası daha fazla daralma gerçekleşir.

- Enerji depolama sistemi olmayan araçlarda işletme zaman çizelgesine bağlı olarak (enerjinin hatta tekrar basılması sonrası) rejeneratif frenleme enerjisinin tamamından faydalanılamaması.
- İzole olamayan hat bölgelerinde katener telinin dışarıdan kamyon kasası vb. araç çarpması dolayısı ile kopması sonrasında işletmenin durmasına ve çevredeki insanlara elektrik çarpması ve yangın riskini doğurmaktadır.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde bulunan katener direklerine, karayolu araçları tarafından yapılan kazalar sonucu oluşan elektrik çarpma tehlikesi ve oluşan yangın tehlikesi durumları oluşmaktadır.

Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemlerin Avantajları

- Bu sistemler dünya genelinde spesifik projelerde kullanılmaktadır. Kendini kanıtlamış bir sistemdir.
- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet vermez.
- Tramvay araçları zeminden sürekli cer gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yollarda, sıkışık trafikte bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma veya enerji yoğunluğu düşme durumu olmaz.
- Yerden beslemeli sistemler duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlayamaz.
- Ansaldo Tramwave sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı vardır.
- Hatta katener direği olmamasından dolayı hat gabarilerinde 90 santime varan küçülmeler olmaktadır. İlk yatırım inşaat maliyetlerinde azalmalara, hattın izole bölgesindeki küçülme ve karayolunda genişlemelere sebebiyet verir.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde cer enerjisi yerden sağlanacağı için karayolu araçları tarafından katener direklerine yapılan kazalar yaşanmaz.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde katener telinin oluşturduğu güvenlik risklerinden muaftır.
- Elektrik kesintisinde araç üstü enerji depolama sistemi barındıran araçlar güvenle duraklara varabilir.
- Araçlara pantograf eklenmesi durumunda katenerli hatlarda da kullanılabilir.

Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemlerin Dezavantajları

- Alstom APS sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazımı yoktur. Bu da, yaklaşık % 20 – 30 enerji kaybı yaratmaktadır.
- Altom APS ve Ansaldo Tramwave sistemleri kış aylarında tuzlama ve buzlanmadan belli bir miktarda etkilenir.
- Tedarikçileri üretici firmalarıdır ve telifli sistemlerdir. Tedarik sıkıntısı yaşanma ihtimalleri olabilir.
- Yerden beslemeli sistemlerde Ansaldo'nun Tramwave sistemini geliştiren CRRC şirketinin telif hakkı nedeniyle yurtdışı satış hakkı olmaması Alstom APS sistemini tek ve rakipsiz olarak bırakmaktadır. Rekabet yapılamamaktadır.
- Enerji teminini enerji pabucu ile yapan sistemlerde enerji pabucunun zarar görememesi için hattın izole olmayan bölgelerindeki taş, kaya, çöp vb. sürekli temizlenmelidir.
- Yerli üretimleri yoktur. Tamamen ithal malzemelerdir.
- İlk yatırım ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir.
- Bu sistemlerde tramvay araçları ve sistemler olarak paket olarak verildiğinden maliyetler büyük ölçüde artmaktadır.

- Bakım parçaları sistemlerin kendine özgü olması sebebiyle tedarik yalnızca üretici firma tarafından sağlanacağı için rekabet yaşamamasından dolayı pahalılık öngörülmektedir.
- Araç üstü enerji depolama sistemi bulunmayan araçlar için işletme sırasında elektrik kesintilerinde jeneratör bulundurma zorunluluğu gerekmektedir.

Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri Avantajları

- Hat geneli gömülü sistemler bulundurmadığı için ilk yatırım maliyetleri düşüktür.
- Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı vardır. Araç üstü ekipmanlar ile verimliliği yükseltilmektedir.
- Tramvay araçları başka tramvay hatlarında da kullanılabilir.
- Jeneratöre ihtiyaç yoktur.
- Alt yapı işleri kısıtlı olmasından dolayı daha kısa inşaat süreleri içerisinde yapılması mümkündür.
- Tedarikçi sayısı fazladır dolayısı ile rekabet ortamı vardır.
- İzole olmayan hat bölgelerinde ilave güvenlik tedbirlerine ihtiyaç yoktur.
- Kış aylarında tuzlanma ve buzlanmadan etkilenmez.
- Enerji depolama ekipmanlarının geri dönüşümleri vardır.

Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri Dezavantajları

- Batarya ve varsa süper kapasitörden dolayı araç ağırlığı artacaktır.
- Araç ağırlığının artmasından dolayı % 5'e varan ekstra enerji harcamaları olacaktır.
- Araç üstü enerji depolama ekipman maliyetleri araç maliyetlerini arttıracaktır.
- Batarya ve süper kapasitör kullanım ömürlerine göre değişim maliyetleri getirmektedir.
- Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, sıcaklıkların aşırı yükselmesinden dolayı araç üstü enerji depolama sistemlerine ekstra olarak soğutma sistemleri de tahsis edilmesi gerekmektedir.

Dünya ve ülkemizde bu sistemler karma olacak şekilde kullanımları mümkündür. Bunların avantaj ve dezavantajları sıralanacak olursa;

Karma Sistemlerin Avantajları

- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet vermez.
- İlk yatırım maliyetleri katener sistemler kadar uygun olmasa da kısıtlı bir bölgede yapıldığı için maliyetler yüksek değildir.
- Katener sistem kısmı yerli üretimi ve istihdamı teşvik eder. Rekabeti teşvik eder.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yerlerde oluşan plansız bekleme ve sıkışık trafikte bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma durumu olmaz.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlamaz.
- APS sistemi (araç üstü enerji depolama sistemi yok ise) hariç kullanılan tüm sistemlerde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı vardır.
- Alstom APS ve Ansaldo Tramwave sistemleri haricinde kış aylarında tuzlama, solüsyon ve buzlanmadan etkilenmez.

- Alstom APS sistemi haricinde aşırı yağmur veya sel durumlarında enerji kesintisi olmadan araç güvenli bölgeye kadar hareket ettirilebilir.
- Araçlar diğer katenerli hatlarda da kullanılabilir.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı kavşaklarda ve hemzemin geçit bölgelerinde oluşan trafik sıkışıklığından ve dur/kalklardan etkilenmez.
- Katenersiz sistem kısmı ihtiyaca göre kısıtlanacağından dolayı bakım maliyetlerinde önemli ölçüde azalacaktır.

Karma Sistemlerin Dezavantajları

- Araç üstü enerji depolama sistemlerinde aracın trafikli alanlarda dur – kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır. Beklenmedik dur/kalklarda sistemdeki enerji çok azalacağından araçta havalandırma ünitesi performans kayıpları olabileceği öngörülmektedir. Aracın enerjisiz kalması durumunda başka bir araç ile hattan çekilmesi gerekebilecektir.
- Alstom APS sisteminde (araç üstü enerji depolama sistemi yok ise) rejeneratif frenleme enerjisinden faydalanılamamaktadır. Fakat, bu kısım Alstom APS ile kısıtlı olan bölgede geçerli olacaktır.
- Katenerli sistemlerde paralel karayolunda 30 – 40 santimetrelik daralma olmaktadır.
- Enerji teminini enerji pabucu ile yapan sistemlerin oluşturduğu kısıtlı kısımlarda hatta; taş, kaya, çöp vb. temizlik yapılması gerekmektedir.
- Bakım parçaları sistemlerin kendine özgü olması sebebiyle tedarik sıkıntısı yaşanması ve parça alımında rekabet yaşanmaması sonrasında pahalılık öngörülmektedir. Fakat, karma sistemlerde bu alanlar sınırlıdır. Yeterli bakım malzemesi stoku yapılabilir.

Yukarıda avantajları ve dezavantajlarından bahsedilen katenersiz sistem çözümlerin uygulanacak tramvay hattı seçiminde dikkate alınması gerekmektedir. Bunları bir tablo halinde bakacak olursak;

Tablo 6. Katenerli ve Katenersiz Sistemler Karşılaştırma Tablosu (Bahadıroğlu, 2020)

	Katenerli Sistem	Alstom APS	Ansaldo Tramwave	Bombardier Primove	Batarya	Batarya Süperkapasitör
Enerji Toplama	Pantograf	Kollektör papucu	Kollektör papucu	Toplama bobini	Kollektör papucu / toplama bobini /pantograf	Kollektör papucu /toplama bobini /pantograf
Temas Şekli	Fiziksel	Fiziksel	Fiziksel	Endüktif Güç Transferi	Fiziksel veya endüktif güç transferi	Fiziksel veya endüktif güç transferi
Araç Ağırlık Artışı (HVAC ESS)	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var
Enerji Kaybı	Yok	Yok	Yok	Var*	Var**	Var**
Rejeneratif Frenleme Enerjisi	Var	Yok	Var	Var	Var	Var
Kar, Su, Buzlanma ve	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Yok

	Katenerli Sistem	Alstom APS	Ansaldo Tramwave	Bombardier Primove	Batarya	Batarya Süperkapasitör
Tuzlanmanın etkilenme						
Maliyet	Sistem maliyeti	Sistem maliyeti	Sistem maliyeti	Endüktif Sistem, batarya-süper kapasitör kombine maliyeti	Batarya maliyeti	Batarya ve süper kapasitör maliyeti
İlk Yatırım Maliyeti	Düşük	Yüksek	Orta	Çok yüksek	Orta	Orta
İşletme Maliyeti	Düşük	Orta	Orta	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek
Cer Gücü Enerjisi	750 VDC	750VDC	750VDC	750 VDC	Sistem Gerilimi	Sistem Gerilimi
Geri Dönüşüm	Kontak Teli (Var)	Veri Yok	Veri Yok	Veri Yok	Var	Var
Yerli Üretim	Var	Yok	Yok	Yok	(Çalışma Yapılmaktadır)	Yok
Kamuya Açık Alanda Riskler	Yüksek	Orta	Orta	Az	Az	Az

* Endüktif Güç transferinden dolayı %5'e kadar enerji kaybı ve Ağırlıktan dolayı %5'e kadar fazla enerji kullanımı

** Ağırlıktan dolayı %5'e kadar fazla enerji kullanımı

Katenersiz kısmın yerli üretimleri yoktur. Tamamen ithal malzemelerdir. Bu sistemlerde yerli üretim olmaması sebebiyle tedarik sıkıntısı yaşanma durumları olabilir. Batarya ve süper kapasitörler maliyetleri araç maliyetlerinin 1/3'ü kadar olması sebebiyle araç bakım maliyetleri yüksektir. Fakat son yıllarda TÜBİTAK Sage tramvay araçları için yerli batarya üretim çalışmaları yapılmaktadır. Bu sayede kullanımı daha avantajlı hale gelebilir.

Günümüz koşullarında tramvay sistemleri ulaşım yükünün büyük kısmını almakla beraber ilk yatırım maliyetleri açısından önemli mali yükler getirmektedir. Yerli üretimlerin yurt içi rekabet koşulları olması sebebiyle maliyetleri uygun olduğu gibi aynı zamanda ekonomiye ve istihdama katkısı büyüktür. Hem ekonomik faktörler hem de çevresel faktörler göz önüne bulundurulduğunda tüm hat boyunca katenersiz cer gücü tesis edilmesi yerine, çevresel kriterlerin belirlendiği yerlerde katenersiz sistemlerin kullanılması optimum çözüm olarak düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Yazarlar çalışmada kullanılan verilerin temini için Metro İstanbul'a; veri toplama, kaynak yardımı, analiz ve yorumlama konusunda katkı sağlayan Metro İstanbul çalışanlarına teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Alstom, (2020), APS Catenary-Free Tramway Operations, 10.02.2020, <https://www.alstom.com>.

Ansaldo, (2020), Tramwave Catenary-Free System, 10.02.2020, <https://www.hitachirail.com>.

Baştürk, G., (2014), Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri ile Karşılaştırılması, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ankara.

Bombardier, (2020), Bombardier Primove Teclonogy, 10.02.2020, <https://www.bombardier.com>.

CAF, (2020), Catenary Free Tram System, 10.02.2020, <https://www.caf.net>.

Can Güven, E., Gedik, K., (2019), “Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi”, İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 726-737.

Cura, B., (2015), Aktif Karbon ve Grafen Esaslı Süperkapasitörlerin Farklı Desarj Akımı ve İyon Türlerindeki Elektrolitler ile Gösterdiği Performans Değişimleri, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 139, Ankara.

Energysys, (2020), Powersafe Sbs Batteries, 20.12.2020, <https://www.energysys.com>.

Hemmati, R., Saboori, H., (2016), “Emergence of Hybrid Energy Storage Systems in Renewable Energy and Transport Applications-A Review”, Renewable and Sustainable Energy Review, 65, 11-23.

Metro İstanbul, (2020), Hatlarımız, 10.10.2020, <https://www.metro.istanbul>.

Nair, N.K.C., Garimella, N., (2010) “Battery Energy Storage Systems: Assessment for Small-Scale Renewable Energy İntegration”, Energy and Buildings, 42(11), 2124-2130.

Rayhaber, (2020), Konya Tramvayı Katenersiz Sistem, 10.10.2020, <https://rayhaber.com>.

Siments, (2020), Siments HES&MES System, 10.10.2020, <https://assets.new.siemens.com>.

USTG, (2013), Alternative Analysis Study Report Released, 10.02.2020, <http://unionstationtogeorgetown.com>.

Wikipedia, (2020), Türkiye’deki Tramvay Hatları, 10.02.2020, <https://tr.wikipedia.org>.



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Istanbul Commerce University Journal of Science

<http://dergipark.gov.tr/ticaretfbd>



Araştırma Makalesi / Research Article

İSTANBUL TOPLU TAŞIMA SİSTEM ALGISININ MEVCUT VE SANAL TERCİHLER ÇERÇEVESİNDE LOJİT MODEL İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE ISTANBUL PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEM
PERCEPTION WITH THE LOGIT MODEL WITHIN THE FRAMEWORK OF REVEALED
AND STATED PREFERENCES

Mahmut Esad ERGİN¹

Hüseyin Onur TEZCAN²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
meergin@ticaret.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
16.11.2020

Kabul Tarihi / Accepted
04.01.2021

Öz

Kişilerin bütün bir ulaştırma sistemi algılarının yanı sıra, toplu taşıma türünü seçip seçmeme durumu kişinin toplu taşıma sistem algısı ile ilgilidir. Bu çalışmayla, kullanıcıların toplu taşıma sisteminin hangi özelliklerini nasıl algıladıkları, tür seçiminde hangi özelliğin daha etken olduğu ikili lojit modeliyle açıklanmaya çalışılmıştır. Bireylerin toplu taşıma sistemi algısının, sosyo-ekonomik ve ulaştırma türlerine ait özelliklerle birlikte, toplu taşımanın hizmet kalitesi ile ilgili çeşitli kriterler açısından nasıl etkilendiği incelenmiştir. Söz konusu toplu taşıma sistem algısı mal ve can güvenliği, kalabalıklık, stres, gerginlik ve motivasyon kaybı ve yorgunluk olmak üzere dört grupta incelenmiştir. Sonuçta, kullanıcıların genel olarak sistemin Mal ve Can Güvenliği kapsamında yeterli olmadığı, stres ve gerginliğin en fazla etki ettiği yolculuk türünün ev-iş yolculukları olduğu gibi değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Algı analizi, ikili lojit model, ödeme isteği analizi, toplu taşıma sistem algısı.

Abstract

Besides users' perception of a whole transportation system, the situation of whether the users choose the mode of public transportation or not is related to their perception of the public transportation system. In this study, it has been tried to explain which features of the public transportation system perceived by users and how, and which variable is more effective in choosing the type of transportation by using binary logit model. The mentioned public transport system perception has been examined in four groups as property and life safety, crowding, stress, tension and loss of motivation and fatigue. As a result, it has been evaluated that the users are generally not satisfied within the scope of the property and life safety of the public transport system, and it is revealed that the most impacted type of trip by stress and tension is home-based trips.

Keywords: Binary logit model, perception analysis, public transport user perception, willingness to pay analysis.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Ulaştırma Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sütüce, İstanbul, Türkiye.
meergin@ticaret.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-1038-3530](https://orcid.org/0000-0002-1038-3530).

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, İstanbul, Türkiye.
tezcandu@itu.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-6036-9323](https://orcid.org/0000-0002-6036-9323).

1. GİRİŞ

Küresel olarak, kentsel alanlarda kırsal alanlardan daha fazla insan yaşamaktadır; 1950 yılında dünya nüfusunun %30'u kentlerde yaşarken, 2018 yılında dünya nüfusunun %55'i kentsel alanlarda ikamet etmektedir. Rapora göre 2050'ye kadar dünya nüfusunun %68'inin kentsel alanlarda yaşayacağı öngörülmektedir. 2020 yılında tarihte ilk kez dünya nüfusunun yarıdan fazlası şehirli hale gelmiştir (%56,2) (Demographia, 2020). Bu durumda, her 10 kişiden 6'sının kentte yaşadığı, kentli olduğu söylenebilir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2020) verilerine göre 2020 yılında yaklaşık 16 milyon (15,6 milyon) nüfusu bulunan, yerli ve yabancı turist, çevre illerden yapılan ev – iş yolculuklarının da dâhil edilmesiyle birlikte yaklaşık 20 milyon kişinin yaşadığı ve yoğun kentleşmenin yaşandığı İstanbul gibi büyük şehirlerde, yeni hizmetlerin ve servislerin sağlanması kolay olmadığı gibi aynı zamanda yüksek maliyetlidir. Kent nüfusunun beklenenden fazla artması, daha önce kent çeperinde veya merkezin uzağında konumlanmış sanayi gibi kirletici veya türüne göre gürültülü olan kullanımların kent içinde kalmasına, kontrolsüz ve düzensiz bir kentleşmeye, gürültü, hava, toprak ve su kirliliği gibi çevresel kirliliğe, kültür çatışması, işsizlik gibi nedenlerden dolayı çeşitli toplumsal gerilimlere neden olabilmektedir.

Kent hayatına etki edecek bu gibi gelişmeler, kişilerin algıları üzerinde etki sahibidirler. Kentsel algı üzerine yapılan bir araştırma kapsamında geliştirilen konsept modellerde kullanılmak üzere mahallenin güvenliği, toplu taşıma kullanımı, toplu taşıma sistemi değerlendirilmesi, komşuluk, alışveriş yolculuklarının sayısı, oyun alanları, park gezileri, yürüyüş sayıları, muayene sayıları, kaza sayıları, çocuklarla geçirilen zaman gibi değişkenler modellenmeye çalışılmış, politika veya iyileştirme yapılmadan önce kişilerin algıları, değerlendirmeleri, davranışları belli ölçeklerde tekrarlanarak değerlendirilmelidir sonucu elde edilmiştir (Marans, 2012).

Kişilerin bütün bir ulaştırma sistemi algılarının yanı sıra, toplu taşıma türünü seçip seçmeme durumu kişinin toplu taşıma sistem algısı ile ilgilidir. Toplu taşıma sisteminin kalitesi, dakiklik, sistem ağı büyüklüğü, hatların birbirleriyle olan bağlantıları, hizmetin sıklığı gibi hizmet değişkenlerinin puanlandırılmasıyla ölçülebilir, hatta bu puanlama, toplu taşıma sistemi geneli üzerinden kullanıcılara sorulabilir (Del Castillo ve Benitez, 2012). Toplu taşıma sisteminde yapılacak iyileştirmelerin kullanıcı memnuniyetine etkisinin ne olduğu ve olumsuz olayların sıklığının kullanıcıların algısına nasıl etki ettiği sorularına cevap aramak için yapılan çalışmada, toplu taşıma sistem kalitesinin artırılmasının, kullanıcıların algısı üzerinde sadece belirli kısıtlarla etkisinin bulunduğu, hatta incelenen bölgelerin yarısında, yapılan iyileştirmelerden sonra kullanıcıların memnuniyet oranında düşüş olduğu sonucuna varılmıştır (Friman, 2004). Bir başka çalışmada toplu taşıma kullanıcıları en fazla bekleme süresi, temizlik ve konfor değişkenlerine değer biçtikleri ve sürücünün kibar davranması, kalabalıklık ve yolculuk süresi gibi değişkenlere daha az değer verildiği gözlenmiştir (Dell'Olio, vd., 2011). Ulaşım türü seçiminde sadece ölçülebilen kriterlerin değil, ölçülemeyen ancak kullanıcılar tarafından algılanan farklı etkenler de önemli rol oynamaktadır. Wener ve Evans'ın (2010) yapmış oldukları çalışmada ev-iş yolculukları yapan kişilerden, özel araç kullanıcıları ile raylı sistem kullanıcılarının yolculukları esnasında yaşamış oldukları stresi incelemiştir. Analizin sonucunda özel araç ile ev-iş yolculuklarını yapan kişilerin daha olumsuz bir ruh halinde oldukları ve daha stresli bir yolculuk yaptıkları ortaya çıkmıştır. Benzer olarak, kalabalıklığın kullanıcılar için zamandan ne kadar kazanç sağladığı ve bu durumun zamanın parasal değerini artırdığı belirtmiştir. Diğer bir ifadeyle, kalabalık olmasına rağmen kullanıcıların yine de bir sonrakini beklemediklerini, kullanıcının zaman değerini artırdığı sonucunu ortaya koymuşlardır (Li ve Hensher, 2011). Kullanıcıların toplu taşıma sisteminde otobüs algısının modellenmesi kapsamında mevcut tercih ve sanal tercihlerin sorulduğu bir anket çalışması yapılmış ve kullanıcıların toplu taşıma sistemini tam olarak değerlendiremedikleri ve

algılarının, bilgilendirmelerle olumlu yönde artırılabilceği sonucuna varılmıştır (Dell’Olio vd., 2010).

Bu çalışmayla, kullanıcıların toplu taşıma sisteminin hangi özelliklerini nasıl algıladıkları, tür seçiminde hangi özelliğin daha etken olduğu ikili lojit modeliyle açıklanmaya çalışılmıştır. Bireylerin toplu taşıma sistemi algısının, sosyo-ekonomik ve ulaştırma türlerine ait özelliklerin yanı sıra, toplu taşımanın hizmet kalitesi ile ilgili çeşitli kriterler açısından nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bu incelemeye ek olarak, seçilen kalite ölçütleri çerçevesinde yapılabilecek iyileştirmeler karşılığında ödemeye razı oldukları ek ücret araştırması da yapılarak, söz konusu algının gelir etkileri altında farklı bir durum alıp almayacağı da değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında, yöntem bölümünde, öncelikle yapılan anket çalışmasının nerede ve nasıl yapıldığı anlatılmış, sonraki bölümde elde edilen verilerin tanımlanması istatistiksel göstergeler ve sonuçlarla yapılmıştır. Verilerin tanıtılmasından sonra toplu taşıma sistemi kullanıcılarının algılarının değerlendirilmesi açısından geliştirilen model anlatılmış ve sonrasında model sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak, değerlendirme bölümünde elde edilen model sonuçları yorumlanmış ve önerilerde bulunulmuştur.

2. YÖNTEM

2015 yılında yapılan bu çalışma kapsamında, Avrupa yakasında 90, Asya yakasında ise 85 olmak üzere rastgele seçilen 175 kişiye anket yapılmıştır. Anket, yüz yüze görüşme yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve katılımcıların soruları tam ve doğru olarak anlamaları sağlanmaya çalışılmıştır. Anket çalışması için İstanbul’da aktivite-yoğun dört ilçe merkezi seçilmiş (Şişli, Beşiktaş, Üsküdar ve Kadıköy) ve genellikle iş çıkış saati olmak kaydıyla, gün/saat ayırımına gidilmeksizin tamamlanmıştır. Mevcut Tercih (MT) ve Sanal Tercih (ST) kısımlarından oluşan anket verileri, istatistiksel değerlendirmeler ve algı durumunun yorumlanması için kullanılan model tahmininde kullanılmıştır.



Şekil 1. Anketlerin Yapıldığı İlçeler

Toplu taşıma sistem özelliklerinden “mal ve can güvenliği”, “kalabalıklık”, “stres, gerginlik ve motivasyon kaybı” ve “yorgunluk” değişkenleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, özel araç kullanıcıları ve toplu taşıma kullanıcılarının, toplu taşıma sistemi hakkındaki algısı ölçülmüştür. Bu ölçümde, anket yapılan kişilerden 1 ile 5 arasında puanlama yapmaları istenmiş ve bu kişilere

durumun iyileştirilmesi için, birbirinden bağımsız olmak kaydıyla ne kadar bir ücret ödemeyi göze alabilecekleri sorulmuştur. 1-5 ölçeğinde; 1-çok kötü, 2-kötü, 3-orta, 4-iyi, 5-çok iyi anlamlarını taşımaktadır. Bu değerlendirme için ankete katılanlar iki grupta toplanmıştır: Özel araç kullanıcıları ve toplu taşıma sistemi kullanıcıları.

Bu çalışmada, toplu taşıma kullanıcı algısının değerlendirilmesi için İkili Lojit Model yaklaşımı kullanılmıştır.

2.1. Lojit Model Yaklaşımı

Ulaştırma tür seçimi modelleri ulaşım planlaması çalışmalarının önemli ayaklarından birisidir. Bu modeller mevcut sistemi kullanan bireylerin davranışlarıyla ilgili ipuçları sağlamanın yanı sıra, geleceğe yönelik kestirim ve senaryo analizleri gibi çalışmalarda da kullanılabilir. Bu bağlamda, toplu taşıma araçlarında yapılacak bir fiyat artışının kullanıcı tarafından nasıl bir tepki alacağı, sefer sıklığı artış veya azalışında sistem kullanıcılarının nasıl davranacağı, toplu taşıma sistemindeki bir iyileştirme sonucu özel araç sahiplerinin davranışının değişip değişmeyeceği gibi konular tür seçimi modellerinin yanıt verebildiği konulardır. Esneklik yöntemi, ulaştırma sistemindeki fiyat artışı, toplu taşıma frekansı, güzergâhı gibi değişikliklerin kesin sonuçlarını verememektedir (Horowitz vd., 1986). Toplu türel ayırık modelleri ise bir grup yolcunun veya bir bölgede yaşayanların, gözlemlenen ortalama yolculuk ilişkisini toplu olarak incelemesi nedeniyle yeteri kadar hassas olmamaktadır. Diğer yandan, ayırık talep modelleri yolcuların bireysel tercihleriyle ilgilenmektedir. Toplu talep modelleri 1980'lere kadar kullanılmıştır ve bu tarihlerden sonra ayırık talep modelleri öne çıkmaya başlamıştır (Williams, 1981).

Ayırık talep analizinin temelinde ayırık seçim modelleri yer almaktadır. Her bir bireyin seçimi değerlendirilerek modelleme yapılan ayırık seçim modellerinin temel varsayımı:

“Verilen seçeneklerden bir tanesinin bireysel olarak seçilme olasılığı, bireylerin sosyo-ekonomik özelliklerinin ve seçeneklerin özelliklerine bağlı olarak değişen bir fonksiyondur.”(Ortuzar ve Willumsen, 2011) olarak ifade edilmiştir.

Ulaştırma tür seçimi modellemesi yapılırken, kullanıcının faydasını en fazla yapmaya veya zararını en aza indirmeye çalışacağı varsayımı yapılır. Ancak, seçenekler faydayı üretmezler. Fayda seçeneklerin özelliklerinden ve/veya bireylerin sosyo-ekonomik karakteristiklerinden türer (Lancaster, 1966).

Kullanıcıların faydaları bir fonksiyonla tanımlanır ve bu fonksiyona fayda fonksiyonu denir. Fayda fonksiyonu genellikle doğrusal olarak ifade edilen bir fonksiyondur (1).

$$U = V + \varepsilon \quad (1)$$

U= Fayda

Denklemden bulunan V değişkeni, gözlem ile ölçülebilen büyüklükleri (yaş, yolculuk süresi, yolculuk maliyeti, gelir vb.) ifade eder. Bu kısım, modelin belirleyici bileşenlerini oluşturur ve modelin açıklayabildiği kısımdır. ε ise, seçeneğe özgü bir hata terimidir. Bu kısım ölçülmesi veya gözlemlenmesi kolay veya mümkün olmayan ancak tür seçiminde etkisi olan özellikleri

anlatmaktadır. Bu kısım rassal kısımdır. Kişinin algısı, konfor, rahatlık gibi değişkenleri içinde barındırmaktadır.

Yani fayda fonksiyonunun bir rastgele kısmı bulunmaktadır. Bu kısmın temeli Rastgele Fayda Teorisi'ne dayanmaktadır. Domencich ve Mc Fadden (1975) ve Williams'a (1977) göre, ayrık seçim modelinin temelinde Rastgele Fayda Teoremi yer almaktadır. Ayrık seçim modeli kullanılarak incelenen iki seçeneğin fayda fonksiyonları karşılaştırıldığında iki seçeneğe ait farklı deterministik ve hata terimleri bulunacaktır. İki tür arasında seçim yapmak isteyen bir kullanıcı, kendisine en fazla faydayı getirecek türü seçeceği varsayılır. Ancak bazı analistler hata terimlerinin karşılaştırılmasında $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ gibi bir çıkarma işleminin doğru olmadığını ve hata teriminin varlığında deterministik bir sonuca ulaşılamayacağını savunmaktadırlar (Ortuzar, 1990) gibi bir sonuca varılır. Ancak bazı analistler $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ gibi bir çıkarma işleminin doğru olmadığını ve hata teriminin varlığında deterministik bir sonuca ulaşılamayacağını savunmaktadırlar (Ortuzar, 1990). Bu nedenle, seçilme olasılıklarının alınması daha uygun olacaktır. Seçeneklerin seçilme olasılığı karşılaştırıldığında;

$$P_r(1) = P_r(U_1 > U_2)$$

$$P_r(1) = P_r(V_1 + \varepsilon_1 > V_2 + \varepsilon_2)$$

$$P_r(1) = P_r(V_1 - V_2 > \varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

sonucuna varılır. Burada P değeri 0-1 aralığında bir değer alır.

2.2. İkili Lojit Model

İki seçenek arasından bir seçim yapma durumu olduğunda kullanılan yöntem ikili lojit model adını almaktadır. Bu durumda, seçenekler kümesinde Seçenek 1 ve Seçenek 2 bulunmaktadır. Bu modele göre Seçenek 1'in seçilme olasılığı aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$P_r(1) = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2}}$$

$$P_r(1) = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2}} * \frac{e^{V_1}}{e^{V_1}}$$

$$P_r(1) = \frac{1}{1 + e^{(V_2 - V_1)}}$$

Pr(1) = seçenek 1'in seçilme olasılığı.

V1 ve V2 = sırasıyla Seçenek 1 ve Seçenek 2'nin fayda fonksiyonlarının belirleyici bileşenleri (Gerçek, 2011). Seçenek 2'nin seçilme olasılığının artması, Seçenek 2'nin belirleyici bileşenin artmasına veya Seçenek 1'in belirleyici bileşenin azalmasına bağlıdır (Horowitz vd., 1986).

Bu çalışmada 175 anket ile toplanan veriler, ikili lojit modelleme yaklaşımıyla modellenmiştir. Modellerde toplam 8 tane değişken kullanılmıştır. Bu değişkenler 4 grupta toplanmıştır. Modellerde kullanılan değişkenlerden yolculuk süresi, yolculuk maliyetinin gelire oranı (Yolculuk Maliyeti/Gelir) ve özel araç kullanımı, kullanıcıların nasıl bir yolculuk yaptığını göstermesi açısından alınmıştır ve modelin birinci grup değişkenlerini oluşturmaktadır. Gelir, tek başına

modelde bir değişken olarak alınmamıştır. Çünkü önemli olan, yolculuk maliyetinin, kullanıcının gelirindeki payıdır. Yaş, Cinsiyet ve Evlilik Durumu değişkenler yolcu profilini anlatmakta ve modelin ikinci grup değişkenlerini oluşturmaktadır. Ev-İş değişkeni yolculuk amacını anlatmakta, “ORT” değişkeni ise kullanıcının, seçtiği türe orta değerden (3 değerinden) daha yüksek bir puan vermesi durumunda 1, aksi halde 0 değerini alan bir değişken olarak alınmaktadır. “Ek Ödeme” ise dördüncü grup değişken olarak sınıflandırılmıştır. Ek ödeme, kullanıcıların mal ve can güvenliği, kalabalıklık, stres, gerginlik ve motivasyon kaybı ve yorgunluk gibi etkenlerin daha iyi şartlara getirilmesi, bir başka deyişle daha konforlu bir toplu taşıma sistemi için ne kadar para vermeyi göze aldıklarını ortaya koymak için oluşturulmuştur.

Tablo 1. Değişkenlerin Gruplandırılması

1. Grup Değişkenler: Yolculuk Profili	1) Yolculuk Süresi, 2) Yolculuk Maliyeti/Gelir, 3) Özel Araç Kullanımı
2. Grup Değişkenler: Yolcu profili	1) Yaş, 2) Cinsiyet, 3) Evlilik Durumu
3. Grup Değişkenler: Yolculuk amacı ve kalitesi	1) Ev-İş, 2) Ortalama Puan (ORT)
4. Grup Değişken: Kukla Değişken	1) Ek Ödeme

Anket verilerine göre, anket katılımcıları büyük oranda daha konforlu bir ulaştırma hizmeti için ek ödeme yapmak istemediklerini belirtmişlerdir. Bu oran incelenen tüm parametreler (mal ve can güvenliği, kalabalıklık, stres ve motivasyon kaybı, yorgunluk) göz önüne alındığında ortalama olarak %34,5'tir. Yapılabilir ödemelere bakıldığında 1 TL, 2 TL ve 5 TL miktarlarında yoğunluk olduğu görülmektedir. Gözden çıkarılan bu para miktarlarının oranları, sırasıyla, ortalama olarak, %14,5, %16 ve %10'dur. Geriye kalan yaklaşık %25'lik bir oran da ara değerlere dağılmıştır. Bu nedenlerden dolayı, kukla değişkenler, kullanıcıların, toplu taşıma sistemi hizmet şartlarının daha iyi olması için mevcut ulaşım maliyetine ek olarak verebileceklerini belirttikleri parasal miktarlar olarak 1 TL, 2 TL ve 5 TL olarak belirlenmiştir.

Model verisi elde edilirken, her bireyin, kabul edilen ek ödeme tutarları karşısında, belirttikleri fiyata göre eski türde mi kalacakları ya da yeni türe mi geçecekleri incelenmiştir. Bu durumda, aynı 175 birey, Ek Ödeme = 1 TL, Ek Ödeme = 2 TL ve Ek Ödeme = 5 TL için ayrı ayrı alınmış ve toplam veri sayısı $175 \times 3 = 525$ olmuştur. Modelleme çalışmasında her bir ölçüt için ayrı bir ikili lojit model kurulmuştur. Bu modellerde, kişilerin vermeyi göze aldıkları değerler üzerinden, ESKİ türünde kalıp kalmadıkları ve hangi şartlarda YENİ tür seçimi yaptıkları araştırılmıştır. Ayrıca, hangi bağımsız değişkenlerin, kişilerin tür seçiminde daha etkin rol oynadığı da aşağıdaki modellerde ortaya konmuştur.

3. VERİNİN TANITILMASI

Anket yapılan kişilerin yaş ortalaması 29,7'dir. Anket yapılan kişilerin %67'si erkektir ve %67'si bekârdır. Ayrıca, ortalama hane halkı büyüklüğü 3,09 olarak elde edilmiştir. Bu değer İstanbul Ulaşım Ana Planı (İUAP) 2006 Raporu'nda verilen ve 3,53 olan ortalama hane halkı büyüklüğüne yakındır. Anket katılımcılarının %69'unun çalıştığı, %50'sinin ev sahibi olduğu ve %45'inin özel aracının bulunduğu belirlenmiştir.

Anket sonuçlarına göre aylık ortalama hane halkı toplam geliri 5.300 TL'dir. Çalışma kapsamında elde edilen verilere göre yolcuların %45'i Avrupa yakası merkezli gerçekleşmektedir ve bu şekilde başlayan yolculukların %45'i Asya yakasında bitmektedir. Yapılan yolculukların %35'i yakalar arası yapılmaktadır. Toplam yolculuk içinde yakalar arası yolculukların payları Asya-Avrupa yaka geçişi %23 ve Avrupa-Asya yaka geçişi ise %12'dir. Amaçlarına göre yapılan yolculuklar incelendiğinde yolculukların %41'inin ev-iş yolculuğu olduğu görülmektedir. Katılımcıların %45'inin özel aracı olmasına rağmen sadece özel aracıyla yolculuk yapanların oranı %20, özel aracı ve aktarma yaparak toplu taşımayı kullanan kişilerin oranı ise sadece %6'dır. Yapılan çalışmadan elde edilen verilere göre ortalama yolculuk süresi tek yönde 48,8 dakika ve ortalama yolculuk maliyeti yine tek yönde 6,25 TL'dir. Ortalama yolculuk süresi İUAP raporuna göre de 48,9 dakikadır.

4. SONUÇLAR

Modelde oluşturulan fayda fonksiyonu her bir ölçüt için aynıdır. Yalnızca YENİ tür için fayda fonksiyonu tahmin edilmiştir. Böylece tahmin edilen katsayılar, ESKİ türe göre karşılaştırmalı etkiyi ifade etmektedir. Bütün modeller, tüm örneklem için ve özel araç ve toplu taşıma kullanıcıları olmak üzere iki katman için olmak üzere 3 defa tahmin edilmiştir. Katmanların tahminlemede kullanılan fayda fonksiyonunda Özel Araç Kullanımı değişkeni modele dâhil edilmemiştir

Tüm örneklem modeli:

$$U(\text{YENİ}) = \text{Sabit Terim} + \text{TT} * \text{Yolculuk Süresi} + \text{TCI} * \text{Yolculuk Maliyeti/Gelir} + \text{SPC} * \text{Ek Ödeme} + \text{AGE} * \text{Yaş} + \text{MALE} * \text{Cinsiyet} + \text{MAR} * \text{Evlilik Durumu} + \text{PVK} * \text{Özel Araç Kullanımı} + \text{EVIS} * \text{Ev-İş Yolculuğu} + \text{ORT} * \text{Ortalama Puan}$$

Katmanlar modeli:

$$U(\text{YENİ}) = \text{Sabit Terim} + \text{TT} * \text{Yolculuk Süresi} + \text{TCI} * \text{Yolculuk Maliyeti/Gelir} + \text{SPC} * \text{Ek Ödeme} + \text{AGE} * \text{Yaş} + \text{MALE} * \text{Cinsiyet} + \text{MAR} * \text{Evlilik Durumu} + \text{EVIS} * \text{Ev-İş Yolculuğu} + \text{ORT} * \text{Ortalama Puan}$$

Görüldüğü gibi, tek model oluşturulduğundan katsayılar genel değil, seçeneğe özgü katsayılar olacaktır.

4.1. Mal ve Can Güvenliği

Tablo 2. Mal ve Can Güvenliği İkili Lojit Modeli Sonuçları

Değişken	Tüm Örneklem		Özel Araç Kullanıcıları		Toplu Taşıma Kullanıcıları	
	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği
Yolculuk Süresi	0,023	5,311(a)	0,019	2,142(a)	0,029	5,180(a)
Yolculuk Maliyeti/Gelir	-13,260	-2,181(a)	-11,039	-1,049	-16,205	-2,090(a)
Ek Ödeme	-0,504	-7,264(a)	-0,244	-1,977(a)	-0,651	-7,101(a)
Yaş	0,068	4,460(a)	0,077	2,552(a)	0,070	3,404(a)
Cinsiyet	-0,289	-1,235	-1,693	-2,705(a)	-0,489	-0,178
Evlilik Durumu	-0,408	-1,295	0,093	0,148	-0,550	-1,372

Özel Araç Kullanımı	0,288	1,062	-	-	-	-
Ev-İş Yolculuğu Ortalama Puan	-0,368	-1,528	-0,225	0,444	-0,566	-1,871(b)
Sabit Terim	-1,843	-5,437(a)	-3,523	-4,210(a)	-1,359	-3,449(a)
Gözlem Sayısı	525		138		387	
LL()	271,950		68,757		191,186	
LL(M)	348,387		94,724		252,103	
- 2LL	152,875		51,935		121,834	
ρ^2	0,219		0,274		0,242	

(a) %95 güven aralığında anlamlı (1,960)

(b) %90 güven aralığında anlamlı (1,645)

Not: %90 ve üstü güven aralığında anlamlı olan katsayılar koyu yazılmıştır.

Tablo 2’de görüldüğü gibi örneklem genelinde *yolculuk süresi* arttıkça yeni türe geçilme olasılığı artmaktadır. Özel araç kullanıcıları ve toplu taşıma kullanıcıları için yolculuk süresi %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. *Yolculuk Maliyeti/Gelir* arttıkça örneklem genelinde, kullanıcıların eski türde kalma olasılığı artmaktadır. Yolculuk maliyeti hem örneklem geneli için hem de toplu taşıma kullanıcıları için olumsuz etki yapmaktadır. Modelde ağırlığı en fazla olan değişkendir. Bu değişken, mal ve can güvenliği için dahi olsa, kullanıcıların tür seçiminde en büyük etkiye sahip değişkendir ve toplu taşıma sisteminin durumundan (kalitesinden, özelliklerinden) bağımsız bir etkisi olduğu görülmektedir. Ek Ödeme, yani kullanıcıların gözden çıkardığı para miktarı, arttıkça örneklem genelindeki kullanıcıların, özel araç kullanıcılarının ve toplu taşıma kullanıcılarının yeni türe geçiş yapmama ve eski türde kalma olasılığı artmaktadır. Yaş arttıkça kullanıcıların yeni türe geçiş yapma olasılığı artmaktadır. Bu durum yaş arttıkça, kişilerin mal ve can güvenliğini daha fazla önemseyişinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Cinsiyetin, mal ve can güvenliği konusunda tür seçimine etkisine bakıldığında, örneklem genelinde ve toplu taşıma kullanıcıları açısından %90 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir. *Ev-İş Yolculuğu* değişkeninin katsayısının negatif çıkması nedeniyle, ev-iş yolculuklarında kullanıcıların mevcut türde kalma olasılığı artmaktadır. Bu durum, özellikle gelir seviyesiyle yakından ilgili olmakla birlikte toplu taşıma kullanıcılarının genelinin başka bir seçeneği olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. *Ortalama Puan*, tür seçimine etkisi, örneklem genelinde, özel araç kullanıcıları ve toplu taşıma kullanıcıları içerisinde %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu durum da, kullanıcıların verecekleri ortalama değer arttıkça eski türde kalacaklarını göstermektedir. Bu normal bir sonuçtur çünkü sistem için mevcut algılarının pozitif (göreceli olarak yüksek) olması, onları yeni bir türe geçme konusunda isteksiz kılmaktadır.

4.2. Kalabalıklık

Tablo 3. Kalabalıklık İkili Lojit Modeli Sonuçları.

Değişken	Tüm Örneklem		Özel Araç Kullanıcıları		Toplu Taşıma Kullanıcıları	
	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği
Yolculuk Süresi	0,020	4,957(a)	0,013	1,698(b)	0,028	5,083(a)
Yolculuk Maliyeti/Gelir	-7,717	-1,245	2,989	0,261	-14,394	-1,866(b)
Ek Ödeme	-0,475	-7,080(a)	-0,204	-1,809(b)	-0,630	-7,025(a)
Yaş	0,072	4,811(a)	0,082	3,077(a)	0,070	3,416(a)
Cinsiyet	-0,424	-1,886(b)	-0,899	-1,737(b)	-0,235	-0,889
Evlilik Durumu	-0,587	-1,936(b)	-0,600	-1,096	-0,645	-1,631
Özel Araç Kullanımı	0,198	0,746	-	-	-	-
Ev-İş Yolculuğu	-0,188	-0,811	-0,093	-0,202	-0,317	-1,091
Ortalama Puan	-0,557	-1,540	-1,659	-2,712(a)	0,357	0,753
Sabit Terim	-1,816	-3,895(a)	-2,029	-1,910(b)	-1,768	-3,098(a)
Gözlem Sayısı	525		138		387	
LL(0)	289,318		81,674		197,659	
LL(M)	348,387		94,724		252,103	
- 2LL	118,138		26,100		108,888	
ρ^2	0,170		0,138		0,216	

(a) %95 güven aralığında anlamlı (1,960)

(b) %90 güven aralığında anlamlı (1,645)

Not: %90 ve üstü güven aralığında anlamlı olan katsayılar koyu yazılmıştır.

Yolculuk süresinin artması halinde, kullanıcılar yeni türe geçme eğilimi göstermektedirler. Bu durum, kullanıcıların daha kısa süren yolculuk yapma isteği olacağından normaldir. *Yolculuk Maliyeti/Gelir* oranı arttıkça, toplu taşıma kullanıcılarının eski türde kalma olasılıkları artmaktadır. Bu değişken, sadece toplu taşıma kullanıcıları için %90 güven aralığında anlamlı çıkarken, örneklem geneli ve özel araç kullanıcıları için istatistiksel olarak anlamlı değildir. *Ek Ödeme* değeri arttıkça kullanıcıların eski türde kalma olasılıkları artış göstermektedir. Yani kullanıcıların gözden çıkardığı para daha da arttıkça, kullanıcılar genel olarak eski türde kalma eğilimi göstermektedir. Kullanıcıların ulaştırmaya çok daha fazla para vermek istemedikleri, mevcut sisteme olan alışılmışlık bu durumun ortaya çıkmasının nedenlerindedir. *Yaş* değişkeni, kalabalıklık çerçevesinde incelendiğinde, örneklem geneli, özel araç kullanıcıları ve toplu taşıma kullanıcıları için önemli bir değişkendir ve %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. Yaş arttıkça, kullanıcıların yeni türe geçme olasılıkları artmaktadır. Bu durumun, yaş arttıkça, kalabalıklığın yolculuğu zorlaştırması nedeniyle ortaya çıktığı söylenebilir. *Cinsiyet* değişkeni sadece toplu taşıma kullanıcıları için istatistiksel olarak anlamlı değildir. Değişken katsayısının negatif çıkması, cinsiyetin erkek olması halinde eski türde kalma olasılığının arttığı anlamına

gelmektedir. *Evlilik Durumu*, %90 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıyken, özel araç ve toplu taşıma kullanıcıları açısından istatistiksel bir anlamı bulunmamaktadır. Örneklem genelinde, kullanıcıların evli olmaları halinde eski türde kalma olasılıkları artmaktadır. Kullanıcıların mevcut sisteme verdikleri puana göre belirlenen *Ortalama Puan* değişkeni, sadece özel araç kullanıcıları için anlamlı çıkmıştır. Bu durum özel araç sahiplerinin toplu taşıma sistemini kullanmamalarındaki sebeplerden veya toplu taşıma sistemini itici bulmalarındaki bir neden olarak ele alınabilir.

4.3. Stres, Gerginlik ve Motivasyon Kaybı

Tablo 4. Stres, Gerginlik ve Motivasyon Kaybı İkili Lojit Modeli Sonuçları.

Değişken	Tüm Örneklem		Özel Araç Kullanıcıları		Toplu Taşıma Kullanıcıları	
	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği
Yolculuk Süresi	0,021	4,842(a)	0,019	2,279(a)	0,023	4,169(a)
Yolculuk Maliyeti/Gelir	5,405	0,934	-11,327	-1,136	12,709	1,645(b)
Ek Ödeme	-0,637	-9,018(a)	-0,351	-2,980(a)	-0,850	-8,414(a)
Yaş	0,015	1,080	0,006	0,261	0,026	1,300
Cinsiyet	-0,154	-0,675	-1,023	-1,825(b)	0,112	0,410
Evlilik Durumu	0,299	0,987	-0,081	-0,145	0,351	0,875
Özel Araç Kullanımı	0,593	2,182(a)	-	-	-	-
Ev-İş Yolculuğu	-0,437	-1,820(b)	0,865	1,733(b)	-0,965	-3,071(a)
Ortalama Puan	-0,827	-2,923(a)	-1,605	-3,134(a)	-0,664	-1,826(b)
Sabit Terim	-0,157	-0,339	0,637	0,591	-0,307	-0,534
Gözlem Sayısı	525		138		387	
LL(0)	282,706		77,678		187,602	
LL(M)	358,526		95,639		260,536	
- 2LL	151,640		35,922		145,868	
ρ^2	0,211		0,188		0,280	

(a) %95 güven aralığında anlamlı (1,960)

(b) %90 güven aralığında anlamlı (1,645)

Not: %90 ve üstü güven aralığında anlamlı olan katsayılar koyu yazılmıştır.

Yolculuk süresi değişkeni örneklem geneli, özel araç ve toplu taşıma kullanıcıları için %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. Katsayı işaretinin pozitif olması, yolculuk süresinin artması halinde kullanıcıların yeni türe geçme olasılığının artacağı anlamına gelmektedir. Bu durum, yolculuk süresinin stres üzerinde önemli bir etkisinin olduğunun göstergesidir. Yolculuk süresinin artması, stresin de artmasına neden olduğu görülmektedir. *Yolculuk maliyet / gelir* oranı arttıkça kullanıcılar yeni türe geçme eğilimi göstermektedirler. İstatistiksel olarak sadece toplu taşıma kullanıcıları için bu oranın kullanıcılar üzerinde stres konusunda bir anlamı olduğu söylenebilir. *Ek Ödeme*, katsayısının negatif olması sebebiyle, gözden çıkarılan parasal değer arttıkça kullanıcılar eski türde kalma eğilimi gösterdikleri sonucu elde edilmiştir. *Cinsiyet* erkek

oldukça, kullanıcıların, eski türde kalmaya devam etmeleri olasılığı artmaktadır. Kadın özel araç kullanıcılarının daha az stres ve gerginlik durumu için yeni türe geçme olasılığı artmaktadır yorumu yapılabilir. *Özel araç kullanımı* arttıkça kullanıcıların yeni türü seçme olasılığı artmaktadır. Bu durumda, özel araç kullanıcılarının mevcut trafik koşullarında, özel aracıyla yolculuk yapıyor olsalar dahi stres, gerginlik ve motivasyon kaybı yaşadıkları söylenebilir. *Ev-İş Yolculuğu* değişkeni, toplu taşıma kullanıcıları için %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı çıkarırken, örneklem genelinde ve özel araç kullanıcıları bazında %90 güven aralığında anlamlıdır. Özel araç kullanıcılarının ev-iş yolculuklarında stres hali arttıkça yeni türe geçme olasılıkları artarken, toplu taşıma kullanıcılarının stres hali arttıkça eski türde kalma olasılıklarının arttığı görülebilir. Böylece, özel araç sahiplerinin ev – iş yolculuklarında yeni bir türe ihtiyaç duyduğu, toplu taşıma kullanıcılarının başka bir seçenekleri olmadığından ve mevcut sistemi kanıksadığından dolayı eski türde kalma eğilimi gösterdiği düşünülmektedir. *Ortalama Puan* değişkeni, toplu taşıma kullanıcıları için %90 güven aralığında, örneklem geneli ve özel araç kullanıcıları için de %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır.

4.4. Yorgunluk

Tablo 5. Yorgunluk İkili Lojit Modeli Sonuçları.

Değişken	Tüm Örneklem		Özel Araç Kullanıcıları		Toplu Taşıma Kullanıcıları	
	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği	Katsayı	t-istatistiği
Yolculuk Süresi	0.016	4.063(a)	0.019	2.260(a)	0.021	3.951(a)
Yolculuk Maliyeti/Gelir	3.015	0.554	17.669	1.250	-2.788	-0.407
Ek Ödeme	-0.458	-7.237(a)	-0.198	-1.789(b)	-0.600	-7.230(a)
Yaş	0.024	1.736(b)	0.056	2.205(a)	0.018	0.907
Cinsiyet	0.138	0.622	-1.118	-2.059(a)	0.456	1.739(b)
Evlilik Durumu	-0.368	-1.254	0.116	0.220	-0.651	-1.689(b)
Özel Araç Kullanımı	0.465	1.802(b)	-	-	-	-
Ev-İş Yolculuğu Ortalama Puan	-0.041	-0.181	-0.125	-0.264	-0.216	-0.764
Sabit Terim	-1.056	-3.716(a)	-1.196	-2.455(a)	-1.127	-3.136(a)
Gözlem Sayısı	525		138		387	
LL()	301.157		83.270		207.280	
LL(M)	356.321		95.596		258.836	
- 2LL	110.328		24.651		103.113	
ρ^2	0.155		0.129		0.199	

(a) %95 güven aralığında anlamlı (1,960)

(b) %90 güven aralığında anlamlı (1,645)

Not: %90 ve üstü güven aralığında anlamlı olan katsayılar koyu yazılmıştır.

Yolculuk Süresi arttıkça, bütün kullanıcıların yeni türe geçme olasılıkları artmaktadır. İstatistiksel olarak her kullanıcı için %95 güven aralığında anlamlıdır. *Ek Ödeme*, örneklem geneli ve toplu taşıma kullanıcıları için %95 güven aralığında, özel araç kullanıcıları için ise %90 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. Kullanıcıların yorgunluğun azalması için gözden çıkardıkları değer arttıkça eski türde kalma olasılıkları artmaktadır. *Yaş* değişkeni toplu taşıma kullanıcıları için istatistiksel bir anlam taşımamaktadır. Özel araç kullanıcıları için %95 güven aralığında, örneklem geneli için ise %90 güven aralığında istatistiksel anlam taşımaktadır. Özel araç kullanıcılarının yaşı arttıkça, yeni türe geçme olasılıkları da artmaktadır. *Cinsiyet* değişkeni, örneklem geneli için anlamlı olmasa da, özel araç kullanıcıları için %95 güven aralığında, toplu taşıma kullanıcıları için ise %90 güven aralığında istatistiksel bir anlam taşımaktadır. Cinsiyet, erkek oldukça özel araç kullanıcıları eski türde kalma, toplu taşıma kullanıcıları için ise yeni türe geçme olasılığı artmaktadır. *Evlilik* değişkeni istatistiksel olarak sadece toplu taşıma kullanıcıları için %90 güven aralığında anlamlı çıkmıştır. Özel araç kullanıcılarının *özel araç kullanımlarının* artması, kullanıcıların yeni türe geçme olasılığını arttırmaktadır. Söz konusu durum, özel araç ile yapılan yolculukların mevcut trafik şartlarında kullanıcılar üzerinde yarattığı yorgunluğun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. *Ortalama Puanı* arttıkça kullanıcılar eski türde kalma eğilimi göstermektedirler. Benzer şekilde verilecek parasal değer azaldıkça yeni türe geçme olasılıkları artmaktadır. Her kullanıcı için %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Katılımcılar genel olarak kentiçi ulaştırma sistemi için “orta” derecede, “kötü” veya “çok kötü” olarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Bu durum, kullanıcılarının genel olarak sistemin Mal ve Can Güvenliği kapsamında yeterli olmadığı görüşünde olduklarının bir göstergesidir. Kalabalıklık ve Yorgunluk ikinci dereceden önemli bir değişken, Stres, Gerginlik ve Motivasyon Kaybı ise son sırada gelmektedir. Stres durumunun düşük gelmesindeki neden, anket katılımcılarının belirttiği üzere alışılmış bir çaresizlik olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Sadece bu bilgiler ışığında, kullanıcıların memnuniyetinin artırılması için kentiçi ulaştırma sisteminde yapılması gereken yatırımlar bu çerçevede olmasının uygun olacağı söylenebilir. Özellikle Ortalama Puan değişkeninin, Kalabalıklık İkili Lojit Modeli sonuçlarında negatif katsayıyla elde edilmiş olması, toplu taşıma sisteminde yaşanacak yoğunluk arttıkça Ortalama Puan değeri düşeceğinden, kullanıcıların toplu taşıma sistemini kullanmaktan caydırıcı şartların ortaya çıkması anlamına gelmektedir. İncelenen dört durum çerçevesinde de kullanıcıların yolculuk süreleri arttıkça yeni türe geçme olasılıkları artmaktadır. Yapılacak iyileştirmelerle birlikte, örneğin mevcut trafiğe takılmadan hizmet verebilecek toplu taşıma türleriyle, daha kısa sürecek yolculuk imkânı dolayısıyla özel araç kullanıcılarının toplu taşıma kullanımına teşvik edilebileceği söylenebilir. Yolculuk maliyetinin gelir içindeki payı daha karşılaştırılabilir bir değişken olacaktır. Yolculuk maliyetinin gelir içindeki payı özel araç kullanıcıları için istatistiksel olarak anlamlı değildir, ancak, toplu taşıma kullanıcıları için yolculuk maliyetinin gelir içindeki payı arttıkça Mal ve Can Güvenliği ve Kalabalıklık kapsamında eski türde kalma eğiliminde oldukları görülmektedir. Kullanıcıların yaşları arttıkça daha konforlu, daha güvenli bir yolculuk yapma istekleri ortaya çıkmaktadır. Kadın kullanıcılar, erkek kullanıcılara oranla daha fazla iyileştirilmiş toplu taşıma hizmeti almak istemektedirler. Stres ve gerginliğin en fazla etki ettiği yolculuk türü ev-iş yolculuklarıdır. Bu durum yolculuk yapan kullanıcılar bir yere zamanında yetişebilme amacıyla daha fazla stres yaşadıklarından kaynaklanmaktadır.

Öncelikle toplu taşıma kullanmaktan başka seçeneği olmayan bireyler için ve daha sonra özel araç kullanımından kullanıcı çekmek adına kaliteli bir toplu taşıma sistemi sunulmalıdır. Bunun için bir takım iyileştirmeler yapılmalı ve bu iyileştirmeler, bu analiz sonuçlarına göre sefer sıklığının artırılması, toplu taşıma araçlarında koltuk sayısının artırılması, kazaya karışma riskinin daha az olabileceği tercihli yol uygulaması, belirtilen yolculuk süresinin şaşmaması için akıllı ulaştırma sistemlerinin kullanılması ve bu bilgilerin tutarlı olması, aktarma merkezlerinde yürüme mesafesinin bireylerin aktarma yapmakta zorlanmalarına neden olmayacak şekilde düzenlenmesi gibi sayılabilir. Örneklerden de görüleceği gibi, bireylerin hafızalarında yer etmiş bazı kötü izlenimlerin silinmesi, bireylerin toplu taşıma sistemini kullanmaya teşvik edilmesi için öncelikle yapılacak iyileştirmelerin neler olacağı/olduğu kentte yaşayanlara açıklayıcı bir şekilde anlatılmalıdır.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Demographia, (2020), Demographia World Urban Areas: 16th Annual Edition June 2020., 05.11.2020, <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>.

Del Castillo, J.M., Benitez, F.G., (2012), “A Methodology for Modeling and Identifying Users Satisfaction Issues in Public Transport Systems Based on Users Surveys”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 1104-1114.

Dell’Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P., (2010), “Modelling User Perception of Bus Transit Quality”, *Transport Policy*, 17, 388-397.

Dell’Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P., (2011), “The Quality of Service Desired by Public Transport User”, *Transport Policy*, 18, 217-227.

Domencich, T.A., McFadden, D., (1975), *Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Friman, M., (2004), Implementing Quality Improvements in Public Transport, *Journal of Public Transportation*, 7(4), 49-65.

Horowitz, J.L., Koppelman, F.S., Lerman, S.R., (1986), “A Self – Instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modelling”, Federal Transit Administration, Washington.

Lall, S.V., Selad, H., Shalizi, H., (2006), “Rural-Urban Migration in Developing Countries: A Survey of Theoretical Predictions and Empirical Findings”, World Bank Policy Research Working Paper, 3915.

- Lancaster, K.J.**, (1966), “A New Approach to Consumer Theory”, *Journal of Political Economy*, 14(2), 132-57.
- Li, Z., Hensher, D.A.**, (2011), “Crowding and Public Transport: A Review of Willingness to Pay Evidence and Its Relevance in Project Appraisal”, *Transport Policy*, 18, 880-887.
- Marans, R.W.**, (2012), “Quality of Urban Life Studies: An Overview and Implications for Environment-Behavior Research”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 35, 9-22.
- Ortuzar, J.D., Willumsen, L.G.**, (2011) “Modelling Transport: 4th Edition”, John Wiley & Sons, UK.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK)**, (2020), 05.11.2020, <https://data.tuik.gov.tr/tr/main-category-sub-categories-sub-components2/>.
- United Nations**, (2018), World Organization Prospect. 05.11.2020, <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.
- Wener, R.E., Evans, G.W.**, (2010), ”Comparing Stress of Car and Train Commuters”, *Transportation Research Part F*, 14, 111-116.
- Williams, H.C.W.L.**, (1977). “On The Formation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit”, *Environment and Planning A*, 9(3), 285-344.
- Williams, H.C.W.L.**, (1981). “Travel Demand Forecasting: an Overview of Theoretical Development. In D.J. Banister and P.G. Hall (eds.)”, *Transport and Public Policy Planning*, Londra.

Ek: Anket Soruları**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ANKET SORULARI****Anketin Yapıldığı Yer:****Tarih:****1- Yaşınız?****2- Cinsiyet**

- E
 K

3- Medeni Hal

- Evli
 Bekar

4- Evde Kaç Kişi Yaşıyor?**5- İş Durumu**

- Çalışıyor
 Çalışmıyor

6- Ev Durumu

- Ev sahibi
 Kiracı
 Diğer

7- Otomobiliniz Var mı?

- Var
 Yok

8- Hanehalkı Toplam Geliri Ne Kadardır? TL**9- Yolculuğun başlangıç yeri****10- Yolculuğun bitiş yeri****11- Yolculuğun amacı?**

- Ev - İş
 Ev - Okul
 Ev - Diğer
 Ev Odaklı Olmayan

12- Buraya Gelirken Hangi Ulaşım Türünü Kullandınız?

- Otobüs
 Metro
 Metrobüs
 Marmaray
 Minibüs
 Özel Araç
 Denizyolu
 Yürüme
 Diğer (Lütfen Belirtiniz)

13- Yolculuk Süreniz Ne Kadardır?dk

14- Yolculuğunuzun Toplam Maliyeti Ne Kadardır? TL

Yolculuk sürenizin

dk inmesi için en fazlaTL verirsiniz?

15- Anket yapılan kişi özel aracıyla yolculuk yapıyorsa aşağıdaki sorulardan devam ediniz.

ÖZEL ARAÇ KULLANICILARI İÇİN	Kaç Dk?	Verdiği Puan (1-5)	SORULAR
Dakiklik (İstenen Yere Varma Süresi Olarak)			Trafikte Bekleme Sürenizin dkya inmesi içinTL verirsiniz?
Mal ve Can Güvenliği			Mal ve Can güvenliğinizin daha iyi olması için ...TL veririm.
Trafik Tıkanıklığı			Daha akıcı trafikte gitmek içinTL veririm.
Motivasyon Kaybı (Stres, Gerginlik)			Motivasyon kaybımın azalması içinTL veririm.
Uzun Yolculuk süresi (Yorgunluk)			Daha kısa süren yolculuk yapmak içinTL veririm.

16- Anket yapılan kişi Toplu Taşıma kullanarak yolculuk yapmışsa aşağıdaki sorulardan devam ediniz. Özel araç kullanıcılarına alternatif bir ulaşım türü seçmelerini ve şuan ki tahminlerine göre sistemi puanlandırmaları ve diğer sorulara cevap vermeleri istenmelidir.

TOPLU TAŞIMA KULLANICILARI İÇİN(ÖZEL ARAÇ KULLANICILARI İÇİN ALTERNATİF)	Kaç Dk?	Verdiği Puan (1-5)	SORULAR
Dakiklik (Durakta Bekleme Süresi Olarak)			Durakta Bekleme Sürenizin dkya inmesi içinTL verirsiniz?
Mal ve Can Güvenliği			Mal ve Can güvenliğinizin daha iyi olması için ...TL veririm.
Kalabalıklık (Oturma İmkanı)			Her zaman oturma imkanı olması içinTL veririm.
Motivasyon Kaybı (Stres, Gerginlik)			Motivasyon kaybımın azalması içinTL veririm.
Uzun Yolculuk süresi (Yorgunluk)			Daha kısa süren yolculuk yapmak içinTL veririm.

17- Sadece Özel Araç kullanıcılarına sorulacaktır.

Yukarıdaki gibi bir ulaşım türü olsaydı özel aracınızı kullanmayı bırakır mıydınız?

- Evet
 Hayır
 Kararsız



Araştırma Makalesi / Research Article

**VERİLOG İLE TAUSWORTHE DENKLEMİNE DAYANAN YENİ BİR
RASTGELE SAYI ÜRETECİ TASARIMI***

**A NEW RANDOM NUMBER GENERATOR DESIGN BASED ON TAUSWORTHE
EQUATION WITH VERILOG**

Minare HASANBEYLİ¹

Vedat TAVAS²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
minare.hesenli.95@mail.ru

Geliş Tarihi / Received
12.05.2021

Kabul Tarihi / Accepted
08.06.2021

Öz

Rastgele sayılar şifreleme, bilgisayar benzetimi, rastgele tasarım gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Rastgele sayılar herhangi bir öngörülebilirlik içermeyen rastgele süreçlerden elde edilir. Rastgeleliğin yetersizliği tüm sistemin güvenliğini etkileyebilir. Bu yüzden rastgele sayıların tahmin edilememesi gerekir. Rastgele sayılar oluşturmanın birçok farklı yolu vardır. Rastgele sayıların en önemli özelliği ise bağımsız olmasıdır, böyle olması ardışık sayılar arasında hiçbir ilişki kurulmamasına neden olur. Bu çalışmada Tausworthe denklemine dayanan ayrık zamanlı rastgele sayı üretici tasarlanmıştır. Tasarımda geri beslemeli kaydırmalı yazmaçlar kullanılmıştır. Tasarım Xilinx yazılımı kullanılarak Verilog donanım tanımlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemle üretilen bit dizilerinin rastgeleliğini belirlemek için FIPS test kümesi kullanılmış ve diziler bu testlerden başarıyla geçmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri beslemeli kaydırmalı yazmaç, rastgele sayı üretici, Tausworthe yöntemi, Verilog.

Abstract

Random numbers are used in many fields such as encryption, computer simulation, random design. Random numbers are derived from random processes that do not involve any predictability. The lack of randomness can affect the security of the entire system. Therefore, random numbers should not be predictable. There are many different ways to generate random numbers. The most important feature of random numbers is that they are independent, which causes no relationship to be established between consecutive numbers. In this study, feedback shift registers are used in the lunar design based on the Tausworthe equation. The design was implemented with Verilog hardware description language using Xilinx software. FIPS test set was used to determine the randomness of the bit strings produced by the proposed method and the strings passed these tests successfully time random number generator is designed.

Keywords: Feedback shift register, random number generator (RNG), Tausworthe method, Verilog.

*Bu yayın Minare HASANBEYLİ isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Küçükalya, İstanbul, Türkiye. minare.hesenli.95@mail.ru, Orcid.org/0000-0002-5470-6194.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Küçükalya, İstanbul, Türkiye. vtavas@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-2945-9846..

1. GİRİŞ

Rastgele Sayı Üreteçlerinin günümüzdeki önemi çok fazladır. Rastgele sayılar şifreleme (Özkaynak vd., 2015), istatistiksel örnekleme (Robinson ve Dessart, 1998), tamamen rastgele tasarım (Elbaşı ve Eskicioğlu, 2006), bilgisayar simülasyonu (Schoukens vd., 1988) gibi öngörülemez rastgele sayıların istendiği alanlarda önemli uygulamalara sahiptir. Rastgele sayılar bir rastgele sayı üreteci tarafından üretilir. Rastgele sayı oluşturmanın birçok farklı yolu vardır. Rastgele sayıların en önemli özelliği sayılar arasında hiçbir ilişki kurulamamasıdır. Rastgele sayı üreteçleri “gerçek rastgele sayı üreteci (True Random Number Generator, TRNG)” ve “sözde rastgele sayı üreteci (Pseudo Random Number Generator, PRNG)” olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. (ICYSCIENCE, 2021).

1.1. Gerçek Rastgele Sayı Üreteci

Gerçek Rastgele Sayı Üreteçleri (GRSÜ) kontrol edilemeyen ve tahmin edilemeyen gerçek fiziksel süreçleri kullanarak sayı üretir. Bu rastgele sayı üreteçlerinin gerçek rastgeleliği tamamıyla entropi kaynağına bağlıdır. Entropi kaynağı nitelikli olursa üretilen rastgele sayılarda nitelikli olur (Büyüksaraçoğlu ve Buluş, 2021).

1.2. Sözde Rastgele Sayı Üreteci

Sözde Rastgele Sayı Üreteçlerinin (SRSÜ) çıktıları gerçek anlamda rastgele değildir. Bu tür algoritmalar gerçek rastgele sayı dizilerinin bazı özelliklerini takribi olarak taşır. SRSÜ simülasyon, video oyunları ve kriptografi gibi uygulamaların çekirdeğidir (Genç ve Tuncer, 2019).

1.3. Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri ve Donanım Tanımlama Dilleri

Alanda Programlanabilir Kapı Dizilerinin (Field-programmable gate array, FPGA) önemli bir özelliği, yeniden yapılandırma yeteneğidir (İçer, 2016). FPGA’lar bir donanım tanımlama dili kullanılarak sayısal tasarım yapmaya imkân sağlayan geliştirme platformlarıdır. FPGA, devre programlamayı destekleyen ve devrenin simülasyonunu gerçekleştiren bir çiptir. FPGA’lar piyasaya 1980 tarihinden itibaren girdiklerinden dolayı genel amaçlı Merkezi İşlem Birimi (Central Process Unit, CPU), Uygulamaya Özgü Tümlşik Devreler (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) ve hatta Grafik İşlemci Birimi (Graphics Processing Unit, GPU) rekabet ettikten sonra bir arada var olabildiler (Sass vd, 2010)

FPGA iç bağlantılarının yapılması ancak programlanması ile mümkündür. FPGA'nın içerisinde olacak devrenin tasarımı 2 yolla yapılmaktadır. Bunlardan biri şematik tasarım ile devrenin çizilmesi, diğeri ise donanım tanımlama dillerinden biri ile devrenin davranışının tanımlanmasıdır. En yaygın kullanılan donanım tanımlama dilleri Verilog ve VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language, Yüksek Hızlı Tümlşik Devreler İçin Donanım Tanımlama Dili) dir.(Savran, 2017),

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde Rastgele sayı üreteçleri, birçok farklı matematiksel yöntem kullanılmaktadır. Bunlara genel olarak doğrusal eşzamanlı oluşturucu, orta kare yöntemi, olasılık dağılımına dayanan ters çevirme, kabul-ret yöntemi gibi örnekler verilebilir. Bu yöntemlere bağlı olarak Mersenne Twister, Monte Carlo, Tausworthe gibi farklı algoritmalar kullanılmaktadır (L'ecuyer, 2017).

Koçdoğan (2015), yaptığı çalışmada bir boyutlu hücrel otomat yapısı tasarlamıştır. İlk olarak temel hücrel otomat yapıları sonra hafızalı hücrel otomat yapısı incelenmiş ve daha sonra rastgele hafızalı hücrel otomat yapısı incelenmiştir. Hücrenin önceki değerlerine rastgele olarak bakılan yeni hücrel otomat yapısı tasarlanmıştır. Bu nedenle, hücrenin o anki değeri belirlenirken bir önceki ve şimdiki değerine rastgele olarak bakılır. Komşuları için de bu işlem yapılır ve hücrelerin değerleri belirlenir. Böylece bu değerler muayyen bir kurala göre etkileşerek hücrenin bir sonraki değeri belirlenir. Tasarımın FPGA üzerinde sayısal gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Gerçek rastgele sonuçlar alındığı görülmüş ve sonra da bu sistem üzerinden rastgele sayı üretici tasarımı yapılmıştır (Koçdoğan, 2015).

Dereli (2020), yaptığı çalışmada doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici temelli sözde rastgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu rastgele sayı üreticinin bariz farkı ürettiği sayıların “0” ve “1” arasında 32-bitlik hassasiyete sahip kayan noktalı sayılar olmasıdır. O nedenle yapılan çalışmada üretilen sayıların 0.1’den büyük ve 1.0’dan küçük olması sağlanmıştır (Dereli, 2020). Özkaynak vd. (2015), yaptığı çalışmada mobil cihazlar için sağlam yapıları bir gerçek rastgele sayı üretici algoritması önermişlerdir. Algoritmanın bir uygulaması iki seviyeli kimlik doğrulama uygulamasında gösterilmiştir. Güvenlik tahlilleri önerilen algoritmanın iyi performans öz yapısına sahip olduğunu göstermiştir (Özkaynak vd., 2015).

Arathy vd. (2018) yaptığı çalışmada karmaşıklığı düşük, esnek, toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kanal emülatörü yapmışlar. Yapılan işte tek tip rastgele sayılar elde etmek için çok sayıda gelişmiş Tausworthe üretici kullanmışlar. Daha sonra Gauss rastgele sayılar oluşturmak için merkezi limit teoremi kullanılarak 12 ve 48 rastgele sayı üretici ile AWGN kanal emülatorunun tasarımı ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir (Arathy vd., 2018).

Huang vd. (2010) yaptığı çalışmada Tausworthe mimarisi, Box- Muller ve CORDIC IPcore kullanarak bağlantılı Lognormal dağıtılmış diziyi oluşturmak için donanım mimarisi önermişler. FPGA üzerindeki uygulama 4210 dilim, 4 blok RAM ve 2DSP48S kullanır. Sayısal deney önerilen yöntemin Lognormal dağıtılmış diziyi doğru bir şekilde oluşturma bildiğini göstermektedir. Önerilen bu yöntemin radar eko ve dağınıklık simülatörü için kullanılabilir olduğu belirtilmiştir (Huang, vd. 2010).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 1965 yılında kabul edilen Tausworthe yöntemini temel alıp FPGA ile rastgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şifreleme metotlarıyla ilgili olan bu yöntemde rastgele sayılar art arda gelen sayı çiftlerinin tekrarlanmasıyla üretilir (Tausworthe, 1965). Ayrıca Doğrusal Geri Besleme Kaydırma Yazmacı (Linear Feedback Shift Registers (LFSR) rastgele sayı üreticileri Tausworthe üreticileri olarak adlandırılır (L'ecuyer, 1999).

$$b_i = (c_1 b_{i-1} + c_2 b_{i-2} + \dots + c_q b_{i-q}) \text{ mod } 2 \quad (1)$$

Denklemden c_q katsayılarının en fazla 2 tanesi sıfırdan farklı olabilir. Bu nedenle denklem en basit haliyle;

$$b_i = (b_{i-r} + b_{i-q}) \text{ mod } 2 \quad (2)$$

olarak yazılır. Burada r ve q tamsayı ve $0 < r < q$ olmalıdır.

$$b_i = \begin{cases} 1, & b_{i-r} = b_{i-q} \\ 0, & b_{i-r} \neq b_{i-q} \end{cases} \quad (3)$$

Giriş değerlerinin 0 veya 1 olması durumunda (3) numaralı eşitlik denklemin sonucunun XOR lojik kapısının doğruluk tablosuyla aynı olduğunu göstermektedir (Math, 2021). Tausworthe yöntemiyle üretilen rastgele sayıların periyodu $2^q - 1$ şeklinde belirlenir. Uzun periyotlu rastgele sayı dizisi üretmek için q değerini büyük tutmak gerekmektedir.

Üretilen bitlerin rastgeleliği NIST ve FIPS testleri kullanılarak test edilebilir. Bu çalışmada üretilen bitlerin rastgeleliği FIPS testleri ile incelenmiştir. FIPS test kümesi dört testten oluşmaktadır. Bu testler Monobit, Poker, Koşu ve Uzun Koşu testleridir. Monobit testinin başarılı olabilmesi için alınan değerlerin $9654 < X < 10346$ aralığında olması gereklidir. Poker testinin başarılı olabilmesi için alınan değerlerin $1.03 < X < 57.4$ aralığında olması gereklidir. Uzun koşu testlerinin başarılı olabilmesi için alınan değerlerin ≤ 34 değerine eşit veya bu değerden küçük olmalıdır. Koşu testinin başarılı olabilmesi için alınan değerlerin Tablo 1 de verilen değer aralıklarında olması gereklidir (Akkaya, 2016).

Tablo 1. Koşu Testi İçin Değer Aralığı

1- 2267 <X< 2733
2- 1079 <X< 1421
3- 502 <X<748
4- 223 <X< 402
5- 90<X<223
6- 90<X<223

4. YÖNTEMİN UYGULANMASI

Tausworthe denklemini kullanırken XOR kapısını doğrudan ikili bit içeren negatif olmayan tamsayılar dizisi üzerinde kullanmak daha uygundur (Math, 2021). Rastgele bitleri üretmek için ilk başta bir başlangıç bit dizisi tanımlanır. FIPS testlerinin kullanılabilmesi için yirmi bin bitlik bir dizeye ihtiyaç duyulmaktadır. Tausworthe denklemini en az $2^q - 1$ periyotlu olduğundan rastgeleliği vermesi öngörülen denklemin derecesi en az $q=15$ olması gerekmektedir. Denklemin değeri 1 olan yazmaçların değerleri XOR kapısından geçirerek sisteme geri besleme değeri olarak verilmiş, en yüksek değerli yazmaçtaki değer rastgele sayı dizisini oluşturacak şekilde bit dizisi çıktısı elde edilmiştir. Elde edilen sayı dizisi FIPS testlerinden geçirilmiştir.

Önce tek denklemler uygulanmış ve tek denklemler yapıların yeterli rastgelelikte bir dizisi oluşturmadığı doğrulanmıştır. Daha sonra iki denklemler uygulanmış, literatürde olan eşzamanlı doğrusal geri beslemeli kaydırmalı yazmaç (LFSR) yapısı ile ve önerilen yöntem ile elde edilen bit dizilerinin rastgelelik analizleri yapılmıştır. Tek denklemler sistemlerde kullanılan denklemler değiştirilmeden ikinci bir denklem sisteme eklenerek önerilen yöntemin etkinliği gösterilmeye çalışılmıştır.

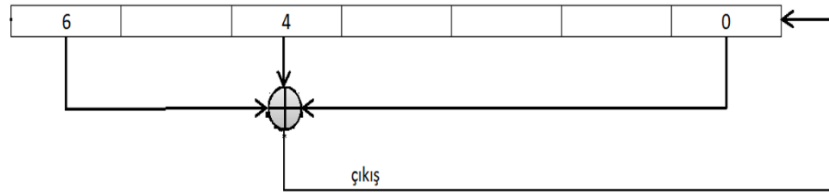
$X^7 + X^5 + 1$ denkleminin başlangıç bit dizisi Tablo 2’ deki gibidir.

Tablo 2. Tausworthe Denklemine $q=7$ için Kullanılan Denklem ve Başlangıç Dizisi

Kullanılan denklem	Başlangıç dizisi
$X^7 + X^5 + 1$	[0101010]

$X^7 + X^5 + 1$ denklemine dayanan LFSR devresi yapısı Şekil 1’deki gibidir. Burada sıfıncı yazmaç denklemindeki +1’i, dördüncü yazmaç denklemindeki X^5 ’i ve altıncı yazmaç denklemindeki X^7 ’i temsil etmektedir. Bu üç yazmaçtaki verinin (1 veya 0) XOR devresinden geçirilmesiyle oluşan sonuç

sıfırıncı yazmaca geri besleme verisi olarak yazılır. Bu yazmaçtaki veri bir sonraki yazmaca aktarılır. XOR devresinden geçirilmesiyle oluşan bir aynı zamanda çıkış verisini de oluşturmaktadır.



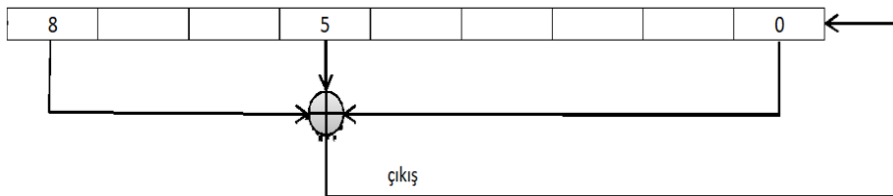
Şekil 1. $X^7 + X^5 + 1$ Denklemi Gerçekleyen LFSR Şeması

$X^9 + X^6 + 1$ denklemi için başlangıç bit dizisi Tablo 3' deki gibidir.

Tablo 3. Tausworthe Denklemde $q=9$ için Kullanılan Denklem ve Başlangıç Dizisi

Kullanılan denklem	Başlangıç dizisi
$X^9 + X^6 + 1$	[010101010]

$X^9 + X^6 + 1$ denklemi kullanan LFSR yapısı Şekil 2'deki gibidir.



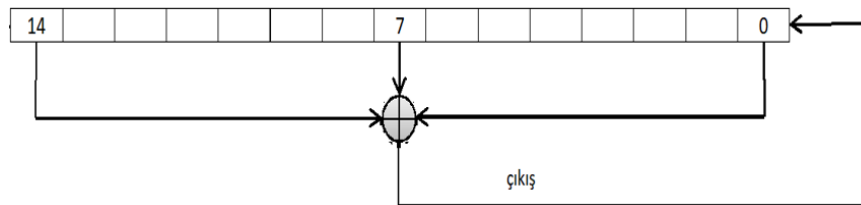
Şekil 2. $X^9 + X^6 + 1$ Denklemi Gerçekleyen LFSR Şeması

$X^{15} + X^8 + 1$ denklemi için başlangıç bit dizisi Tablo 4'teki gibidir.

Tablo 4. Tausworthe Denklemde $q=15$ için Kullanılan Denklem ve Başlangıç Dizisi

Kullanılan denklem	Başlangıç dizisi
$X^{15} + X^8 + 1$	[010101010101010]

$X^{15} + X^8 + 1$ denklemi kullanan LFSR yapısı Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. $X^{15} + X^8 + 1$ Denklemi Gerçekleyen LFSR Şeması

Tausworthe denklemde en fazla iki katsayı sıfırdan farklı olması öngördüğünden ve aynı denklemin çıktısını kendine girdi olarak almasından dolayı LFSR yapısı yeterince rastgele sayı üretememektedir. Rastgeleliği artırmak için Tausworthe denklemde ikiden fazla katsayının sıfır seçilmesi ve/veya birden fazla LFSR yapısının Şekil 4'te de gösterildiği gibi eşzamanlı olarak kullanılması gibi tasarım kullanılmıştır (Arathy vd., 2018).

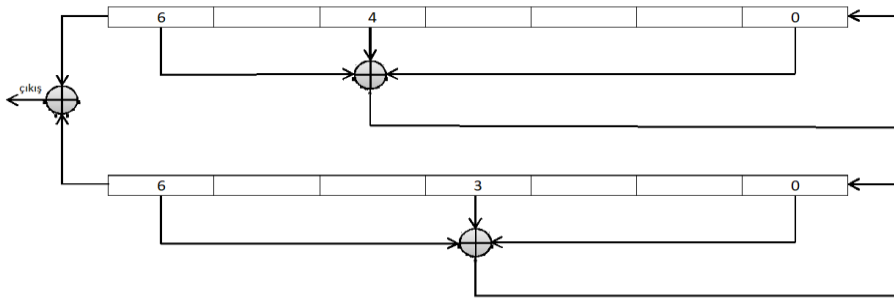
Bu çalışmada da rastgeleliği artırmak için birden fazla Tausworthe denklemi eşzamanlı olarak kullanılmıştır. Literatürde olan doğrusal geri besleme yerine geri besleme yapısı her bir denklem değerini besleyecek şekilde çapraz olarak değiştirilmiştir. Çünkü LFSR yapısı aynı denklem çıktısını kendine geri besleme olarak aldığından sistemde bir periyodiklik oluşmakta, bu da çıktılarının rastgele olmamasına neden olmaktadır. Çapraz geri besleme kullanılarak LFSR yapısının doğasındaki periyodikliğin kırılması amaçlanmıştır.

Yapılan tasarımlarda kullanılan ikincil denklemlerin dereceleri birincileri ile aynı seçilmiştir. Burada 'q' Tausworthe denkleminin derecesini belirtmek üzere $q=7$, $q=9$ ve $q=15$ için uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te $q=7$ için kullanılan denklemler ve başlangıç dizeleri verilmiştir.

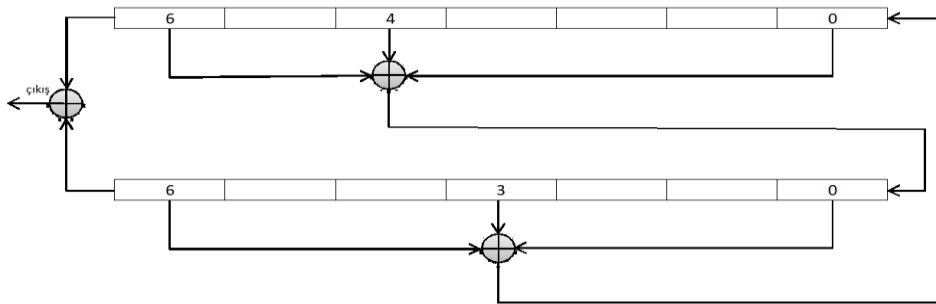
Tablo 5. Tausworthe Denklemine $q=7$ için Kullanılan Denklemler ve Başlangıç Dizeleri

Kullanılan denklem	Başlangıç dizesi
$X^7 + X^5 + 1$	[0101010]
$X^7 + X^4 + 1$	[0101010]

Bit üretimi için kullanılan eşzamanlı LFSR devresinin blok yapısı Şekil 4'te gösterildiği gibidir. Önerilen çapraz geri beslemeli devrenin blok yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. $q=7$ için Kullanılan Doğrusal Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması



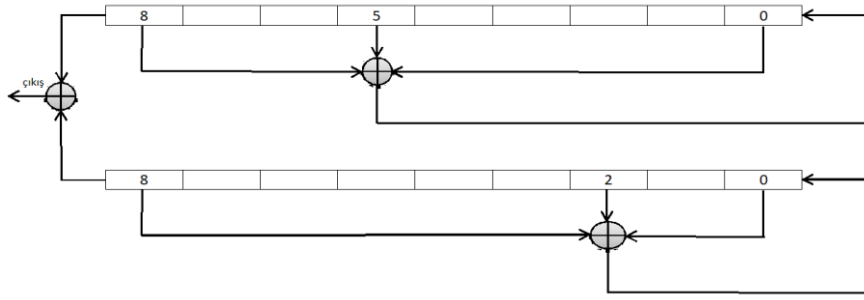
Şekil 5. $q=7$ için Kullanılan Çapraz Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması

Tablo 6'da $q=9$ için kullanılan denklemler ve başlangıç dizeleri verilmiştir.

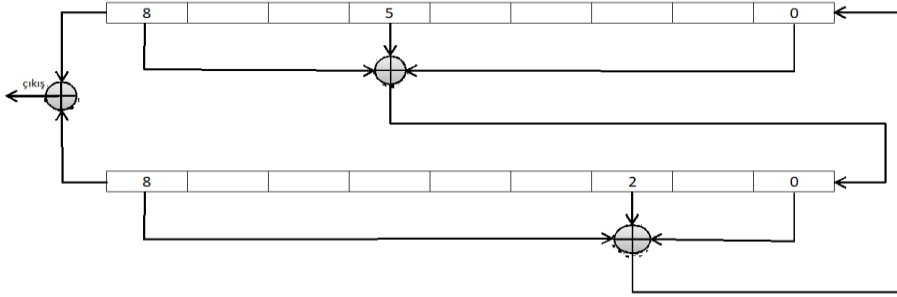
Tablo 6. Tausworthe Denklemine $q=9$ için Kullanılan Denklemler ve Başlangıç Dizeleri

Kullanılan denklem	Başlangıç dizesi
$X^9 + X^6 + 1$	[0101010]
$X^9 + X^3 + 1$	[0101010]

Şekil 6’da $q=9$ için kullanılan eşzamanlı LFSR devresinin blok yapısı gösterilmiştir. Önerilen çapraz geri beslemeli yapı ise Şekil 7’de verildiği gibidir.



Şekil 6. $q=9$ için Doğrusal Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması



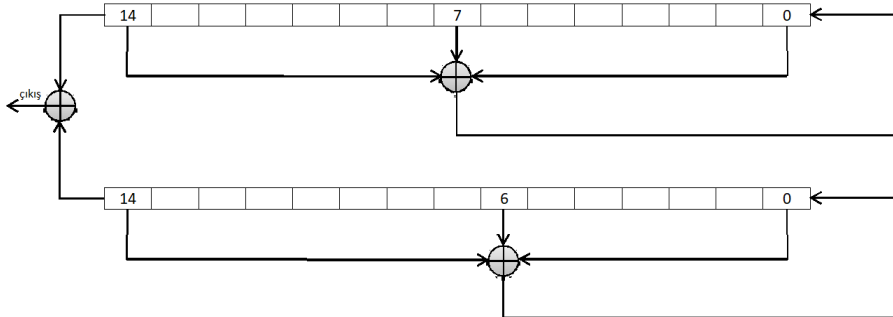
Şekil 7. $q=9$ için Çapraz Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması

Son olarak $q=15$ için üretim denklemleri ve başlangıç dizisi Tablo 7’de verilmiştir.

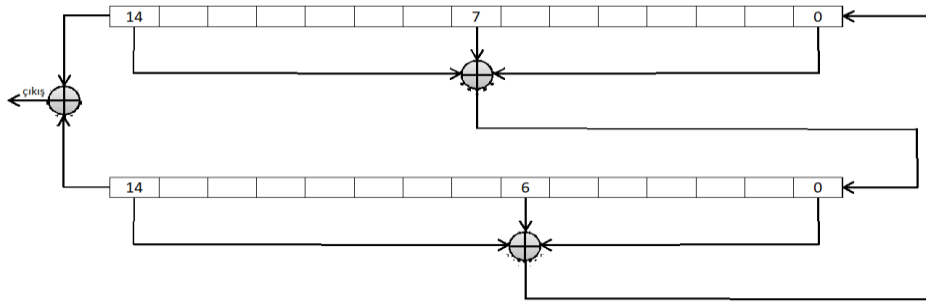
Tablo 7. Tausworthe Denklemine $q=15$ için Kullanılan Denklemler ve Başlangıç Dizisi

Kullanılan denklem	Başlangıç dizisi
$X^{15} + X^8 + 1$	[0101010]
$X^{15} + X^7 + 1$	[0101010]

Şekil 8’de $q=15$ için kullanılan devrenin blok yapısı gösterilmiştir. Birinci ve ikinci dizelerin geri beslemeleri çapraz olacak şekilde değiştirilmesi ise Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. $q=15$ için Doğrusal Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması



Şekil 9. q=15 için Çapraz Geri Beslemeli Rastgele Sayı Üretici Şeması

5. TESTLER

Yukarıda blok yapıları verilen tasarımlar Verilog donanım tanımlama dili ile Vivado HLS v.2020.2 programı ile sentezlenmiştir. Sentezlenen her bir tasarımdan FIPS testleri için 20 bin adet bitten oluşan veri üretilmiştir. Bu bit dizelerinin rastgele kabul edilebilmesi FIPS test kümesinde tanımlı dört testten de geçmesi gerekmektedir. Bu testler Monobit, Poker, Koşu ve Uzun Koşu testleridir. FIPS testleri ile ilgili bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir.

Bölüm 4'de belirtildiği gibi Tausworthe yöntemine dayanan tek denklemlilerden elde edilen verinin rastgeleliğinin kötü olduğunu göstermek için ilk önce tek denklemliler tasarımların test sonuçları verilmiştir. Daha sonra literatürde kullanılan iki denklemliler LFSR yapısı ile önerilen iki denklemliler çapraz geribeslemeli kaydırıcı yazmaç (FSR, feedback shift register) test sonuçları verilmiştir. Önerilen çapraz geri beslemeli yöntemin etkinliğini göstermek için iki denklemliler yapılarında kullanılan denklemlerden biri tek denklemliler LFSR yapısında kullanılan denklemlilerle aynı seçilmiştir. Elde edilen iki denklemliler doğrusal ve çapraz FSR yapıları sonuçları karşılaştırılmıştır.

$X^7 + X^5 + 1$ denklemlilerden elde edilen bit dizisinin FIPS test sonucu Tablo 8'de verilmiştir. q=7 olacak şekilde gerçekleştirilen tekli LFSR yapısı ile yeterli rastgelelikle bit dizisi üretilmemiştir.

Tablo 8. q=7 Durumu için FIPS Test Sonucu

FIPS test	Tausworthe yöntemi	Beklenen değer
Koşu 0	5335	%1 2267 - 2733
	1333	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	0	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Koşu 1	4002	%1 2267 - 2733
	1333	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	1333	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Uzun koşu 0	2	≤ 34
Uzun koşu 1	4	≤ 34
Monobit	12000	$9654 < X < 10346$
Poker	3.89	$1.03 < X < 57.4$

$X^9 + X^6 + 1$ denklemiyle oluşturulan bit dizisinin FIPS test sonucu Tablo 9’da verilmiştir. $q=9$ olarak seçilen denklemden de yeterli rastgelelik sağlanamamıştır.

Tablo 9. $q=9$ Durumu için FIPS Test Sonucu

FIPS test	Tausworthe yöntemi	Beklenen değer
Koşu 0	10000	%1 2267 - 2733
	0	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	0	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Koşu 1	10001	%1 2267 - 2733
	0	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	0	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Uzun koşu 0	1	≤ 34
Uzun koşu 1	1	≤ 34
Monobit	10001	$9654 < X < 10346$
Poker	75000	$1.03 < X < 57.4$

$X^{15} + X^8 + 1$ durumu için FIPS test sonucu Tablo 10’da verilmiştir. Bu durumda da yeterli rastgelelik elde edilememiştir.

Tablo 10. $q=15$ Durumu için FIPS Test Sonucu

FIPS test	Tausworthe yöntemi	Beklenen değer
Koşu 0	10000	%1 2267 - 2733
	0	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	0	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Koşu 1	10001	%1 2267 - 2733
	0	%2 1079 - 1421
	0	%3 502 - 748
	0	%4 223 - 402
	0	%5 90 - 223
	0	%6 90 - 223
Uzun koşu 0	1	≤ 34
Uzun koşu 1	1	≤ 34
Monobit	10001	$9654 < X < 10346$
Poker	75000	$1.03 < X < 57.4$

Tablolar 8-10 da görüldüğü gibi Tausworthe yöntemini kullanan tek denklemliler LFSR yapısı Bölüm 4’e de belirtildiği gibi yeterli rastgeleliği sağlayamamıştır.

Oluşan bit dizilerinde rastgeleliği artırmak için eş kuvvetli iki farklı denklemi sağlayan kaydırmalı yazmaç yapıları eşzamanlı kullanılmıştır. Her bir denklemi sağlayan FSR yapılarının çıktısı XOR

kapısından geçirilerek bit dizisi elde edilmiş, bu dizinin rastgeleliği incelenmiştir. Kaydırmalı yazmaçlar Şekil 4,6,8'deki gibi doğrusal geri besleme ve Şekil 5,7,9'daki gibi çapraz geri besleme ile ayrı ayrı beslenmiş, bu şekilde her bir yapının çıktısı XOR kapısından geçirilerek bit dizisi üretilmiştir. Devrelerden elde edilen değerler aşağıdaki Tablolarda gösterilmiştir.

$X^7 + X^5 + 1$ ve $X^7 + X^4 + 1$ denklemi için çapraz ve doğrusal geri beslemeli yapılardan elde edilen bit dizilerinin FIPS test sonucu Tablo 11'deki gibidir. Çapraz geri beslemeli yapıdan elde edilen bitler FIPS testlerinin hepsinden geçerken doğrusal geri beslemeli yapıdan elde edilen bitlerin poker testinden geçemediği gözlemlenmiştir.

Tablo 11. q=7 Durumu için FIPS Test Sonucu

FIPS test	Doğrusal geri besleme	Çapraz geri besleme	Beklenen değer
Koşu 0	2537	2541	% 1 2267 - 2733
	1247	1243	% 2 1079 - 1421
	602	614	% 3 502 - 748
	302	318	% 4 223 - 402
	172	165	% 5 90 - 223
	172	160	% 6 90 - 223
Koşu 1	2496	2517	% 1 2267 - 2733
	1290	1262	% 2 1079 - 1421
	645	636	% 3 502 - 748
	301	305	% 4 223 - 402
	129	154	% 5 90 - 223
	172	163	% 6 90 - 223
Uzun koşu 0	8	12	≤ 34
Uzun koşu 1	9	13	≤ 34
Monobit	9978	9996	$9654 < X < 10346$
Poker	<u>0.30</u>	5.13	$1.03 < X < 57.4$

Tablo 11'deki sonucu veren Verilog kodu Şekil 10 da verilmiştir.

<pre> .B1(b1), .B2(b2), .B3(b3), .A1(a1), .A2(a2), .A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; for(n=7; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-7]; b2=b[n-3]; b3=b[n-1]; a1=a[n-7]; a2=a[n-4]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out2; a[n]=out1; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>	<pre> .B1(b1), .B2(b2), .B3(b3), .A1(a1), .A2(a2), .A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; for(n=7; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-7]; b2=b[n-3]; b3=b[n-1]; a1=a[n-7]; a2=a[n-4]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out1; a[n]=out2; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>
--	--

(a)

(b)

Şekil 10: Çapraz (a) ve Doğrusal (b) LFSR Verilog Sentezleme Programı

$X^9 + X^6 + 1$ ve $X^9 + X^3 + 1$ denklemleri için çapraz ve doğrusal geri beslemeli yapılardan elde edilen bit dizelerinin FIPS test sonucu Tablo 12'deki gibidir. Çapraz geri beslemeli yapıdan elde edilen bitler FIPS testlerinin hepsinden geçerken doğrusal geri beslemeli yapıdan elde edilen bitlerin koşu testinin 6. kademesinden geçemediği gözlemlenmiştir.

Tablo 12. q=9 Durumu İçin FIPS Test Sonucu

FIPS test	Doğrusal geri besleme	Çapraz geri besleme	Beklenen değer
Koşu 0	2383	2501	%1 2267 - 2733
	1034	1322	%2 1079 - 1421
	953	578	%3 502 - 748
	239	340	%4 223 - 402
	316	155	%5 90 - 223
	79	152	%6 90 - 223
Koşu 1	2702	2495	%1 2267 - 2733
	1350	1238	%2 1079 - 1421
	477	675	%3 502 - 748
	238	294	%4 223 - 402
	158	185	%5 90 - 223
	158	141	%6 90 - 223
Uzun koşu 0	7	12	≤ 34
Uzun koşu 1	8	9	≤ 34
Monobit	9602	10004	$9654 < X < 10346$
Poker	1.15	6.43	$1.03 < X < 57.4$

Tablo 12'deki sonucu veren Verilog kodu Şekil 11 de verilmiştir.

<pre> .B1(b1), .B2(b2), .B3(b3), .A1(a1), .A2(a2), .A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; b[7]=1; b[8]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; a[7]=0; a[8]=1; for(n=9; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-9]; b2=b[n-4]; b3=b[n-1]; a1=a[n-9]; a2=a[n-7]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out2; a[n]=out1; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>	<pre> .B1(b1), .B2(b2), .B3(b3), .A1(a1), .A2(a2), .A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; b[7]=1; b[8]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; a[7]=0; a[8]=1; for(n=9; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-9]; b2=b[n-4]; b3=b[n-1]; a1=a[n-9]; a2=a[n-7]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out1; a[n]=out2; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>
(a)	(b)

Şekil 11: Çapraz (a) ve Doğrusal (b) LFSR Verilog Sentezleme Programı

$X^{15} + X^8 + 1$ ve $X^{15} + X^7 + 1$ denklemleri için çapraz ve doğrusal geri beslemeli yapılardan elde edilen bit dizelerinin FIPS test sonucu Tablo 13'deki gibidir. Çapraz ve doğrusal geri beslemeli yapılardan elde edilen bitler FIPS testlerinin hepsinden başarıyla geçmiştir.

Tablo 13. q=15 Durumu İçin FIPS Test Sonucu

FIPS test	Doğrusal geri besleme	Çapraz geri besleme	Beklenen değer
Koşu 0	2593	2535	%1 2267 - 2733
	1253	1226	%2 1079 - 1421
	637	630	%3 502 - 748
	296	327	%4 223 - 402
	147	143	%5 90 - 223
	155	159	%6 90 - 223
Koşu 1	2563	2482	%1 2267 - 2733
	1243	1242	%2 1079 - 1421
	643	634	%3 502 - 748
	308	330	%4 223 - 402
	174	159	%5 90 - 223
	152	165	%6 90 - 223
Uzun koşu 0	13	18	≤ 34
Uzun koşu 1	17	16	≤ 34
Monobit	10071	10058	$9654 < X < 10346$
Poker	16.73	8.53	$1.03 < X < 57.4$

Tablo 13'deki sonucu veren Verilog kodu Şekil 12 de verilmiştir.

<pre> B1(b1), B2(b2), B3(b3), A1(a1), A2(a2), A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; b[7]=1; b[8]=1; b[9]=0; b[10]=1; b[11]=0; b[12]=0; b[13]=0; b[14]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; a[7]=0; a[8]=1; a[9]=1; a[10]=1; a[11]=0; a[12]=1; a[13]=1; a[14]=1; for(n=15; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-15]; b2=b[n-8]; b3=b[n-1]; a1=a[n-15]; a2=a[n-9]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out2; a[n]=out1; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>	<pre> B1(b1), B2(b2), B3(b3), A1(a1), A2(a2), A3(a3), .Out3(out3), .Out2(out2), .Out1(out1)); initial begin b[0]=1; b[1]=1; b[2]=1; b[3]=0; b[4]=1; b[5]=0; b[6]=1; b[7]=1; b[8]=1; b[9]=0; b[10]=1; b[11]=0; b[12]=0; b[13]=0; b[14]=1; a[0]=1; a[1]=1; a[2]=1; a[3]=0; a[4]=1; a[5]=1; a[6]=1; a[7]=0; a[8]=1; a[9]=1; a[10]=1; a[11]=0; a[12]=1; a[13]=1; a[14]=1; for(n=15; n<=20020; n=n+1) begin b1=b[n-15]; b2=b[n-8]; b3=b[n-1]; a1=a[n-15]; a2=a[n-9]; a3=a[n-1]; #2; b[n]=out1; a[n]=out2; #2; Rand[n-15]=out3; end </pre>
---	---

(a)

(b)

Şekil 12: Çapraz (a) ve Doğrusal (b) LFSR Verilog Sentezleme Programı

Tablolar 11-13'te iki denklemlilik doğrusal ve çapraz FSR sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu Tablolardan da görüleceği gibi iki denklemlilik doğrusal FSR yapısı tek denklemlilik yapıya göre rastgeleliliği artırsa da yeterli rastgeleliliği vermemektedir. Literatürde LFSR yapısını kullanan RSÜ yapılarında denklemin derecesini artırmanın yanında Tausworthe tanımına aykırı olarak ikiden fazla parametrenin katsayısını 1 seçme, denklem kuvvetini artırma gibi yöntemler kullanılarak rastgelelilik sağlanmaktadır (Zhang, 2005).

Tablolar 11-13'ten görüleceği gibi çapraz LFSR yapısı Tausworthe tanımına uygun olarak sadece iki parametrenin katsayısını 1 tutarak, denklem derecesini $q=7$ ye kadar düşürülmesi rağmen yeterli rastgelelilik vermiştir.

Doğrusal geri besleme ile aynı yapının çıktısını sisteme geri vermek, iki denklem kullanılsa bile Tausworthe denkleminin tekrarlama özelliğini yeterli miktarda kaldıramamaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada Tausworthe tanımına dayanan yeni bir rastgele sayı üretici tasarımı ve Verilog ile gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Tausworthe denklemleri XOR lojik kapısı ve kaydırmalı yazmaçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bit üretiminde sürekliliği sağlamak için ilgili yazmaçlardaki veriler XOR kapısından geçirilerek çıktısı devrelere geri verilmiştir. Tausworthe denkleminde aynı denklemin çıkışı giriş veri olarak verildiğinde sistem denklem kuvveti ile ters orantılı bir bellek barındırmaktadır. Dolayısıyla Tausworthe tanımı gereği çıkış verisinde tekrarlama barındırmaktadır ve tek denklemlilik yapı yeterli rastgeleliliği sağlayamamaktadır. Bu özelliği Verilog kodu ile de gösterilmiştir.

Yeterli rastgeleliği sağlamak için iki ayrı Tausworthe denklemini gerçekleyen devre eşzamanlı olarak kullanılmış, her bir devrenin çıkışı XOR kapısından geçirilerek çıkış bit dizisi elde edilmiştir. Eşzamanlı çalışan devrelerde doğrusal ve çapraz geri besleme kullanılmıştır. Bu devrelerden yirmi bin bit üretilmiş ve elde edilen sayıların rastgeleliğini test etmek için FIPS testleri kullanılmıştır. Kullanılan denklemlerin derecesi $q=7$ 'ye kadar düşürülmüş ve çapraz geri beslemeli yazmaç yapısının çıktısının FIPS testlerinin hepsinden başarıyla geçtiği fakat eşzamanlı LFSR devresinin çıktısının bazı testlerden geçemediği gözlemlenmiştir.

LFSR sistemi yapısal olarak bellekli bir yapı olmasından dolayı iki denklem kullanılsa bile bu bellek özelliği az da olsa çıktılarda gözlenmiş, dolayısıyla denklem derecesi düştükçe rastgelelik sağlanamamıştır. Literatürde de LFSR yapılarında rastgeleliği artırmak için Tausworthe tanımı dışına çıkıp birden fazla parametrenin katsayısının 1 yapılması, denklem derecesinin artırılması, ikiden fazla denklem kullanılması gibi çözümler mevcuttur.

Sonuç olarak çapraz geribeslemeli yapı başarılı sonuçlar alınmış olması çapraz geri beslemenin Tausworthe'nin yapısındaki bellekli yapısının kırıldığı düşünmektedir. Çapraz geribeslemeli yapı ile daha az kaydırmalı yazmaç kullanılarak doğrusal geri beslemeli yapıdan daha etkin bir rastgelelik elde edilebilmektedir. Daha az kaydırmalı yazmaç kullanımı, FPGA uygulamalarında kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada Minare HASANBEYLİ fikir, araştırma, veri toplama, analiz, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkı sağlamıştır. Vedat TAVAS fikir, eleştiri, yorum ve makalenin yazımı konusunda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Akkaya, S., (2016), “Yeni Bir Kaos Tabanlı Rastgele Sayı Üretici Kullanan Banka Şifrematik Cihazı Tasarımı ve Uygulaması”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93, Sakarya.

Büyüksaraçoğlu, F., Buluş E., (2021), “Sözde Rassal Sayı Üretiminin Kriptografik Açından İncelenmesi”, 30.04.2021, https://www.emo.org.tr/ekler/3e6f423ffcbf723_ek.pdf.

Dereli, S., (2020), “Yüksek Hızlı FPGA ile Yeni Bir LFSR Tabanlı 32-Bit Kayan Noktalı Rastgele Sayı Üretici Tasarımı”, International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(3), 219–228.

Elbaşı, E., Eskiçioğlu, A.M., (2006), “PRN Based Watermarking Scheme for Color Images”, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5(10), 119-131.

Huang, D., Zeng, D.Z., Long, T., Yu, J.Y., (2010), “Design of A Correlated Lognormal Distributed Sequence Generator Based on Virtex-IV Series FPGA”, International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), 22-24 October 2010, China.

ICYSCIENCE, (2021), Rastgele sayı nedir? - Techopedia nedir?, 02.05.2021, <https://tr.icyscience.com/random-number#menu-1>.

İçer, Y., (2016), “Temel Kenar Algılama Algoritmalarının FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi”, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77, Elazığ.

Koçdoğan, A., (2015), “FPGA Üzerinde Hafızalı Hücreli Otomat Yapısı ile Rastgele Sayı Üretici Tasarımı”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81, İstanbul.

L'ecuyer, P., (1999), “Tables of Maximally- Equidistributed Combined LFSR Generators”, 1999 American Mathematics of Computation, 68(1999), 261-269.

L'ecuyer, P., (2017), “History of Uniform Random Number Generation”, 2017 IEEE Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference, 3-6 December 2017, Montreal, Kanada.

Math, (2021), Düzgün Dağıtılmış Rastgele Sayı Üretimi. Erişim Tarihi: 29.04.2021, https://www.math.pku.edu.cn/teachers/lidf/docs/statcomp/html/_statcompbook/rng-uniform.html.

Nair, A.B., Mondal, A., Garani, S.S., (2018), “A Low-Complexity Hardware AWGN Channel Emulator on FPGA Using Central Limit Theorem”, 2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 5-8 August 2018, Windsor, ON, Kanada, 428-431.

Özkaynak, F., Özdemir, H.İ., Özer, A.B., (2015), Cryptographic Random Number Generator for Mobile Devices, 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 16-19 May 2015, Turkey, 24-29.

Robinson, S.O., Dessart, D.J., (1998), Yearbook-National Council of Teachers of Mathematics, 243-250, NCTM, USA.

Sass, R., Schmidt, A.W.G., (2010), Embedded Systems Design with Platform FPGAs: Principles and Practices, Morgan Kaufmann, Amsterdam, Hollanda.

Savran, İ., (2017), Donanım Tanımlama Dili VHDL ve FPGA Uygulamaları, Papatya Bilim, 320, İstanbul.

Schoukens, J., Pintelon, R., Van Der Ouderaa, E., Renneboog, J., (1988), “Survey of Excitation Signals for FFT Based Signal Analyzers”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. 37(3), 342-352.

Tausworthe, R.C., (1965), “Random Numbers Generated by Linear Recurrence Modulo Two”, Mathematics of Computation, 19(90), 201–209.

Tuncer, S.A, Genç, Y., (2019), “İnsan Hareketleri Tabanlı Gerçek Rastgele Sayı Üretimi” Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 261 – 269.

Zhang, G., Leong, P.H.W., Lee, D.U., Villasenor, J.D., Cheung, R.C.C., Luk W., (2005), Ziggurat-Based Hardware Gaussian Random Number Generator, International Conference on Field Programmable Logic and Applications, 24-26 August 2005, Tampere, Finland, 275-280.



Araştırma Makalesi / Research Article

**İTFAİYE İSTASYONLARINDAKİ TEHLİKELERİN ÇOK KRİTERLİ
KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE ÖLÇÜLMESİ***

**MEASURING THE HAZARDS IN FIRE STATIONS WITH MULTI-CRITERIA DECISION
MAKING METHODS**

Muhammed Ali GÜLEÇ¹

Berk AYVAZ²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
m.aligulec60@gmail.com

Geliş Tarihi / Received
10.05.2021

Kabul Tarihi / Accepted
26.05.2021

Öz

İtfaiyelerde ki tehlikeleri değerlendirme süreci karmaşık bir yapıda olup problemleri ortaya çıkararak çözüm yöntemleri üretmek zorunlu hale gelmiştir. Tehlikelerin bertaraf edilmesi açısından İtfaiye istasyonlarının belirli ölçütlere göre değerlendirilmesi itfaiyeler için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle itfaiye istasyonlarındaki tehlikelerin belirlenerek, çalışanların korunması sağlanması için bu sistemin doğru ve sistematik bir şekilde planlanması gerekir. Bu çalışma, İtfaiye istasyonlarındaki tehlikelerin değerlendirilmesi problemi üzerinde odaklanmıştır. Bu çalışmadaki amaç, İtfaiye istasyonlarındaki tehlikelerin kriterler doğrultusunda değerlendirme ölçütleri belirlemek, bu ölçütlere dayanarak tehlikelerin ortadan kaldırılmasını sağlamaktır. Bu amaçla çok kriterli karar verme tekniklerinden AHP yöntemi ile kriterler ağırlıkları belirlenmiş ve TOPSIS yöntemi ile de belirlenen alternatiflerin sıralaması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AHP yöntemi, çok kriterli karar verme yöntemleri, itfaiye, iş sağlığı ve güvenliği, TOPSIS yöntemi.

Abstract

The process of evaluating the dangers in fire brigades is a complex structure and it has become necessary to produce solutions by revealing the problems. It is of great importance for firefighters to evaluate fire stations according to certain criteria in terms of eliminating hazards. For this reason, this system should be planned in a correct and systematic way in order to protect the employees by determining the dangers in the fire stations. This study focused on the problem of assessment of hazards in fire stations. The purpose of this study is to determine the evaluation criteria of the hazards in the fire stations in line with the criteria and to eliminate the dangers based on these criteria. For this purpose, criteria weights were determined with the AHP method, one of the multi-criteria decision making techniques, and the ranking of the alternatives determined by the TOPSIS method was performed.

Keywords: AHP method, fire department, multi criteria decision making method, occupational health and safety, TOPSIS method.

*Bu yayın Muhammed Ali GÜLEÇ isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. m.aligulec@gmail.com, [Orcid.org/0000-0002-5143-7996](https://orcid.org/0000-0002-5143-7996).

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. bayvaz@ticaret.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-8098-3611](https://orcid.org/0000-0002-8098-3611).

1. GİRİŞ

Günümüzde yangın, deprem sel vb. gibi olaylara müdahalede en önemli acil müdahale ekiplerinden biri olarak gösterilen itfaiyeler, buldukları ortam ve istasyonlarda daha az tehlikelerle çalışabilmek için İş sağlığı ve güvenliği sektöründen büyük katkılar beklemektedir. İtfaiyecilik alanında hem başarılı bir şekilde yangınlara müdahale edebilmek, hem de tehlikesiz bir ortamda çalışmak amacıyla; riskleri azaltacak çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda itfaiye istasyonlarının bu iş sağlığı ve güvenliği açısından performans seviyelerinin net bir biçimde görülebilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu şekilde istasyonlarda alınması gereken tedbirler daha net anlaşılıp ve gerekli düzenlemeler yapılabilecektir.

İş sağlığı ve güvenliği disiplinler arası bir çalışma alanıdır. İnsan davranışları ile doğrudan etkileşim içinde olduğundan dolayı insan kaynaklı kazaların, iş kazaları sınıflandırmasında ve azalmasında yardımcı olması en büyük hedef olmalıdır. Kanunlar, tüzükler, yönetmeliklerle çalışma hayatının düzenlenmesi hukukun temel unsurları sayesinde yerine getirilmeye çalışılmalıdır. İstanbul İtfaiye Teşkilatı, İstanbul Büyükşehir Belediyesine bağlı olarak İtfaiye Daire Başkanlığı adı altında acil durumlara müdahale ve yangın söndürme görevini ifa eden kamu kuruluşudur. Teşkilat görevi gereği 24 saat esasına göre vardiya usulü çalışılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, itfaiyelerde tehlike etmenlerini belirleyerek riskleri ortaya çıkarmak ve çalışanların nasıl bir tehlike ve risk yapısı içinde olduklarını ölçmeye yardımcı olacak bir yöntem ortaya koyabilmektir. Böylelikle, tehlikeler ortaya çıkarıldıkça iş kazaları azalacak ve çözüm yollarının iş sağlığı ve güvenliği çerçevesinde incelenmesi mümkün olacaktır. Kaliteli hizmet sunumunun önemli şartlarından birisi olan ve kamu hizmetlerinin gerçekleştirilmesinde nihai bir amaç olarak kabul edilen itfaiye hizmetleri olaya anında müdahale ve yangın söndürme gibi çalışmalar yer almakta olup 6331 sayılı İş sağlığı ve güvenliği Kanununda ki konular bu kapsam içinde yer almadığından dolayı sadece kanun kapsamında yer alan işyeri sınırları içinde değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada itfaiye istasyonlarında risk ölçümü yapmak için AHP ve TOPSIS metotlarından oluşan hybrid bir model geliştirilmiştir. Modelin ilk aşamasında AHP kullanılarak risk ölçüm kriterleri ağırlıklandırılmış, ikinci aşamada ise TOPSIS yöntemi kullanılarak istasyonlar için risk skorları hesaplanmıştır. Önerilen ölçüm metodunun, İstanbul itfaiyesi bünyesinde yer alan Bağcılar, Beşiktaş ve Sarıyer itfaiye istasyonlarında uygulaması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile birlikte; itfaiye istasyonlarında iş sağlığı ve güvenliği kapsamında risk ölçümü hususunda literatürdeki önemli bir boşluk doldurulacaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde iş sağlığı ve güvenliği alanında risk ölçümü ile ilgili yapılmış çalışmalardan bazısına yer verilerek literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen risk ölçüm modelinin yapısı ve uygulamasına yer verilmiştir. Son olarak da, çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde itfaiyelerde iş sağlığı ve güvenliği, tehlikeler ve risk değerlendirmeleri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalarda uygulanan çözüm yöntemleri AHP ve TOPSIS yöntemleri ile analiz edilmeye çalışılmıştır.

Fera ve Macchiaroli (2010), tünellerde yangın güvenliğini değerlendirmek için karbon monoksit, oksijen, sıcaklık ve görünürlük kriterlerini dikkate alarak AHP ve yangın dinamiği simülatörünü kullanmıştır.

Ayanoğlu ve Biberici (2015) İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünü oluşturmada önemli olması beklenen üretim güvenliği, çalışma ortamı, çalışanların korunması ve iş kazası için gerekli olan önleyici tedbirler ve iş kazaları risklerini belirleme amacı ile AHS kullanılmış olup iş sağlığı ve güvenliği kültürünü etkileyen görece önemli faktörler belirlenmiştir.

Heller (2006), hazırladığı çalışmada, bir fabrikanın yerleşiminin yapılacağı üç bölge için mevcut riskleri AHP yöntemi ile değerlendirmiştir. Önce alt ölçütler oluşturulup daha sonra bunlar insan, çevre ve teknoloji başlıkları altında incelenmiştir.

Fouladgar vd., (2012), bir tünel projesine ait riskleri değerlendirmek için TOPSIS yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin geçerliliğini göstermek için su iletim tüneline ait vaka çalışması yapılmış, tünelin çöküşünün projedeki en riskli faktör olduğunu belirlemişlerdir.

Kısa, Yunus., (2014), Bu çalışmada uygulama yapılan firmanın iş güvenliği profesyonelleri ile birlikte çalışma koşullarını olumsuz etkileyebilecek faktörler 4 ana kriter altında 18 alt kriter belirlenmiştir. Belirlenen bu döküm atölyelerindeki çalışma koşullarına olan etkisi AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmış, uygulama yapılan firmanın ortam ölçümleri alınmıştır. Ölçüm verileri atölyelerin çalışma koşullarının İş Sağlığı ve Güvenliği açısından TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır.

Barlas (2012), Türkiye'deki tesislerde meydana gelen ölümcül iş kazalarını AHP tekniğinden faydalanarak araştırmış ve uygulama alanı olarak İstanbul Tuzla bölgesindeki tesisleri seçmiştir. Öncelikli nedenleri belirlemek için anket uygulaması yapmış ve belirlediği temel ölümcül iş kazalarının nedenlerini sınıflandırırken de AHP tekniğinden yararlanmışır.

Acuner ve Çebi (2013), tersanelerde yaşanan kazaların önlenmesine yönelik risklerin belirlenmesinde Analitik Hiyerarşi Süreci tekniğine dayalı bir bulanık model önermişlerdir.

Liu vd. (2013), yaptıkları çalışmada, bilimsel sondaj projesi, risk değerlendirmesi için bir bulanık sentetik değerlendirme yaklaşımı önermişlerdir. Olasılık, şiddet, tespit edilememe ve kötüleşme faktörleri bireysel ve genel risklerin kapsamlı değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Kriter ağırlıklarını belirlemek için analitik hiyerarşi süreci (AHP) / analitik ağ süreci (ANP) kullanılmıştır.

Ali ve Maryam (2013), hazırladıkları çalışmada, İran'daki Polrood barajının yapımı sırasındaki çevresel riskleri belirlenmiş, sıralanmış ve değerlendirilmiştir. İlk olarak Delphi Tekniği kullanılarak risk faktörleri belirlenmiş ve TOPSIS yöntemi ile bu faktörler derecelendirilmiştir. İkinci olarak AHP yöntemi ile risk faktörleri dört ana gruba ayırmış ve risk faktörlerine karşılık gelen ağırlıklar belirlenmiştir.

Jozi vd. (2015), Balarood barajının yapısal olarak yarattığı çevresel ve sağlık risklerini belirlemek amacıyla Delphi yöntemini kullanarak en önemli risk faktörlerini belirlemişler ve belirlenen risk faktörlerinin önem ağırlıklarını ise Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca, TOPSIS yöntemini uygulayarak risk türlerini önceliklendirmişlerdir.

Zeng vd. (2007), karmaşık inşaat süreçlerindeki riskleri önceliklendirme de AHP kullanmış ve bulanık esaslı karar verme yöntemi ile yeni bir risk değerlendirme yaklaşımı önermiştir.

Güneri vd (2015), küçük ve orta ölçekli işletmeler için iş güvenliği operasyonlarında en iyi risk değerlendirme yöntemini seçmek için kapsam, pratiklik, maliyet ve hassasiyet kriterlerini dikkate alarak bulanık AHP'yi kullanmıştır.

Can vd. (2017), yapılan çalışmada ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile bir ÇKKV yöntemi olan AHP'yi birlikte kullanılmışlardır.

Kasap ve Subaşı (2011), tarafından yapılan çalışmada açık işletme madenlerinde farklı meslek gruplarında çalışanların hangi tür tehlikelere daha fazla maruz kaldıklarının belirlenmesi ile tehlikeler karşısında iş kazası geçirme veya meslek hastalığına yakalanma risklerinin denetim altına alınmasında AHP yöntemini kullanarak Türkiye Kömür İşletmelerine bağlı bir kurumdan alınan veriler ile uygulamalı olarak yapmıştır.

Mokhtari vd. Liman (2012), hizmetlerinde yürüttükleri risk analizi çalışmasında risk kaynaklarını güvenlik, kirlilik, yasal yükümlülükler, insan faktörleri ve teknik olmak üzere beş ana başlıkta sınıflandırmış, çalışma sahalarında tespit ettikleri riskleri Kanıtsal Muhakeme (ER) yöntemi ile değerlendirmiş ve AHP ile önceliklendirmiştir.

Braglia vd.(2003), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) yöntemi kapsamında öklit uzaklığını kullanarak tehlike türlerini sıralamışlardır.

Literatürde itfaiyelerdeki tehlikeler ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. İş sağlığı ve güvenliğine yönelik araştırmalar ele alındığında ise, çok kriterli karar verme yöntemlerinin daha çok kullanıldığı görülmektedir.

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

3.1. Analitik Hiyerarşik Prosesi

Analitik Hiyerarşi Prosesi 1970'li yılların ortasında Pensilvanya Üniversitesinden Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen ölçme ve karar verme için kullanılan bir matematiksel teodir. (Saaty ve Niemira, 2006:1). AHP literatürde yaygın olarak çalışılmıştır ve son 20 yılda çok kriterli karar verme ile ilgili birçok uygulamada kullanılmıştır (Ho, 2008: 211). Bunun nedeni, karar vericiler tarafından kolay anlaşılabilir olmasıdır.

AHP yönteminin uygulama adımları şu şekildedir:

1. Adım: Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Karar amacı ile tepeden başlayarak karar hiyerarşisi oluşturulur. Orta seviyede kriterler ve en düşük seviyede ise alternatifler bulunur (Saaty, 2008: 85).

2.Adım: İkili Karşılaştırma Matrisleri (A) ve Üstünlüklerin Belirlenmesi: Amaç, kriterler ve alt kriterler belirlendikten sonra kriterlerin ve alt kriterlerin kendi aralarında önem derecelerinin belirlenmesi için 1 numaralı ifadede gösterilen (nxn) ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur (Saaty, 1990: 12). Karar verici kriter matrisi veya alternatif matrisi için kriterleri veya alternatifleri ikili olarak karşılaştırır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{21} & a_{31} & \dots & a_{n1} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{32} & \dots & a_{n2} \\ 1/a_{31} & 1/a_{32} & 1 & \dots & a_{n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & 1/a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tablo 1’de verilen önem ölçeği kullanılmalıdır (Saaty, 1990: 15).

Tablo 1. AHP Önem Ölçeği (Saaty, 1990: 15)

Sayısal Değer	Tanım
1	Öğeler eşit önemde veya aralarında kayıtsız kalınıyor.
3	1. öğe 2.’ye göre biraz daha önemli veya biraz daha tercih ediliyor.
5	1. öğe 2.’ye göre fazla önemli veya fazla tercih ediliyor.
7	1. öğe 2.’ye göre çok fazla önemli veya çok fazla tercih ediliyor.
9	1. öğe 2.’ye göre aşırı derecede önemli veya aşırı derecede tercih ediliyor.
	2,4,6,8Ara değerler

1. Adım: Özvektörün (Görelî Önem Vektörünün) Belirlenmesi: İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasından sonraki adım, ilgili matristeki her bir öğenin diğer öğelere göre önemini gösteren özvektörün hesaplanmasıdır (Sipahioğlu, 2008: 5). Matrisin $n \times n$ boyutunda özvektörü şu şekilde belirlenmektedir:

$i=1,2,3,\dots,n$ ve $j=1,2,3,\dots,n$ olmak üzere;

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (2)$$

Kriterlerin yüzde önem dağılımlarını belirlemek için $W = [w_i]_{n \times 1}$ şeklindeki sütun vektörlerinin hesaplanması gerekmektedir. W sütun vektörü, 2 numaralı eşitlikte belirtilen b_{ij} değerlerinin meydana getirdiği matrisin satır elemanlarının aritmetik ortalamasından elde edilir.

Adım: Özvektörün Tutarlılığının Hesaplanması: Her ikili karşılaştırma matrisi için tutarlılık oranı (CR) hesaplanır ve bu oran için üst limitin 0,10 olması istenir. Oranın 0,10’un üstünde olması, karar vericinin yargılarında tutarsızlık olduğunu ifade eder. Bu durumda, yargıların iyileştirilmesi gerekmektedir. CR değerine ulaşmak için öncelikle A matrisinin en büyük özvektörünü (λ_{max}) hesaplamak gerekmektedir (eşitlik4).

$i=1,2,3,\dots,n$ ve $j=1,2,3,\dots,n$ olmak üzere,

$$D = [a_{ij}]_{n \times n} \times [w_i]_{n \times 1} = [d_i]_{n \times 1} \quad (3)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4)$$

Tutarlılık oranının hesaplanmasında ihtiyaç duyulan bir başka değer ise rassallık endeksi (RI)’dir. Sabit sayılardan meydana gelen ve n değerine göre belirlenen RI değerlerinin yer aldığı veriler Tablo 1’de verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda CR değerinin hesaplanması 5 numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n-1).RI} \quad (5)$$

Tablo 2. Rassallık Endeksi Verileri (Güner, 2005: 42)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

2. Adım: Hiyerarşik Yapının Genel Sonucunun Elde Edilmesi: Önceki dört aşama, hiyerarşik yapının tamamı için hesaplanır. Bu aşamada hiyerarşik yapıdaki n tane ölçütün her birinin meydana getirdiği mx1 boyutundaki üstünlük sütun vektörleri bir araya getirilerek mxn boyutundaki DW karar matrisi oluşturulur. Elde edilen matrisin ölçütler arası W üstünlük vektörü ile çarpımı sonucunda R sonuç vektörüne ulaşılır (eşitlik 7).

$i=1,2,3,\dots, m$ ve $j=1,2,3,\dots,n$ olmak üzere,

$$DW = [w_{ij}]_{m \times n} \quad (6)$$

$$R = DW \times W \quad (7)$$

3.2. TOPSIS Yöntemi

Çok kriterli karar verme metodlarından biri olan sık kullanılan TOPSIS yöntemi ilk olarak Hwang ve Yoon tarafından ortaya atılmıştır (Kılıç vd. 2014) Değerlendirme kriterlerinin en iyi değerlerinin birleşiminden oluşan pozitif ideal çözüm ile en kötü değerlerinin bileşiminden oluşan negatif ideal çözümlerin söz konusu olduğu çok kriterli bir karar verme yöntemidir. Burada ele alınan problemin çözümünde alternatif itfaiye istasyonlarındaki risklerin pozitif ideal çözümden en kısa mesafede ve negatif ideal çözümden en uzak mesafede olması prensibine dayanmaktadır. (Özdağoğlu, 2011) TOPSIS yönteminin adımları şu şekildedir (Yang ve Hung,2007).

Adım1: Her bir değerlendirme kriterinin değeri olmak üzere normalize edilmiş mxn boyutunda karar matrisi r_{ij} oluşturulur.

$$\text{En küçükleme problemleri için; } r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1,2,3,\dots,m; j = 1,2,3,\dots,n \quad (8)$$

$$\text{En büyükleme problemleri için; } r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1,2,3,\dots,m; j = 1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

Adım 2: Normalize karar matrisi aşağıdaki formüller kullanılarak ağırlıklandırılır. Bu formüldeki kriter ağırlıkları uzmanların görüşleri ile belirlenmektedir.

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_j, i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n \quad (10)$$

Adım 3: Pozitif ideal çözüm (A^*) ve negatif ideal çözüm (A^-) aşağıdaki şekilde bulunur.

$A^* = \{v^*, \dots, v^*\}$ maksimum değer

$A^- = \{v^-, \dots, v^-\}$ minimum değer

Adım 4: Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklığı bulunur.

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad (12)$$

Adım 5: Her bir alternatifin ideal çözüme göreli yakınlığı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*}, i = 1, \dots, m \quad (13)$$

Adım 6: En büyük CC_i değerine sahip olan alternatif seçilir.

3.3. Problem Çözümü Adımları

Yapılan uygulamada izlenen adımlar aşağıda bulunan Tablo 3’de ifade edilmiştir.

Tablo 3. İtfaiye İstasyonlarındaki Tehlikeler Uygulama Adımları

AHP ile Gerçekleştirilen Çözüm Adımları
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. 2. Kriterlerin birbiri ile karşılaştırılarak ağırlıkları hesaplanır. Karşılaştırma işleminde temel ölçek olan "1 - 9 ölçeği" kullanılmıştır. 3. Karşılaştırma matrisinde, söz konusu kriterler için satırlar sütunlarla karşılaştırılarak önem sırası sorusunun cevabı verilerek, ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. 4. Normalleştirme işlemi yapılarak elde edilen yeni matrisin ortalamaları hesaplanmış ve bulunan aritmetik ortalama değerleri yeni matrisin göreli önem ağırlığı oluşturularak kendi aralarındaki önem dereceleri ortaya çıkmıştır. 5. İkili karşılaştırmalar yapılarak ortaya çıkan önceliklerin birbirleri ile olan ilişkisi ile verilen kararların güvenilirliği yapılan değerlendirmelerin tutarlılığı ölçülmüştür. 6. Alternatiflerle ilgili sıralamanın belirlenmiş olup işlemlerden elde edilen hesaplamalardan önceliklerine bakarak en iyi alternatif belirlenmiştir.
TOPSIS ile Gerçekleştirilen Çözüm Adımları
<ol style="list-style-type: none"> 1. Karşılaştırmak istenen alternatifler değerlendirilmiştir. 2. Matriste yer alan alternatifler normalize edilmiş olup karar Matrisi oluşturulmuştur. 3. Değerlendirme kriterlerine ilişkin ağırlık değerleri belirlenmiş olup daha sonra R matrisinin her bir sütunundaki elemanlar ilgili w_i değeri ile çarpılarak V matrisi oluşturulmuştur. 4. İdeal çözüm setinin oluşturulması için, V matrisinin sütun değerlerinin, eğer ilgili değerlendirme kriteri maksimizasyon yönlü ise en büyüğü, minimizasyon yönlü ise en küçüğü seçilmiş ve daha sonra ideal çözüm seti bulunmuştur. 5. Alternatiflerin birbirlerine göre uzaklıkları uzaklık yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. 6. Alternatiflerin ideal çözüme göreli yakınlık değeri hesaplanmıştır.

4. UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde, itfaiyelerde belirlenen tehlikeler değerlendirme kriterleri ile işbirliği yapılabilecek en uygun kriterlerin analiz edilmesi amacıyla iki aşamalı bir çözüm önerisi oluşturulmuştur. İlk olarak, değerlendirme kriterleri belirlenerek, kriter ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemi (AHP) ile hesaplanmaktadır. Belirlenen riskler üç ayrı uzman değerlendirmesi de AHP yöntemi ile tek bir matriste toplanmıştır. İkinci aşamada, Topsis Yöntemi kullanılarak 3 itfaiye istasyonunun tehlike sıralamaları yapılmıştır.

Problem kapsamında 14 kriter belirlenmiştir. Bunlar;

- Gürültü(G1)
- Titreşim(G2)(Erkan, Necmettin.,1997)
- Termal Konfor(G3)
- Basınç(G4)
- Aydınlatma(G5)(Güler,Ç.1997)
- Elektrik(G6)
- İş kazaları ve Meslek Hastalıkları(G7)(Karadeniz, Oğuz, 2012)
- Radyasyon(G8)(UNSCEAR,2008)
- Fiziksel(K1)
- Çevresel(K2)
- Psikososyal(K3)(Kıraç, Y,2005)
- Kimyasal Maddeler(M1)
- Etiketleme(M2)
- MSDS(M3)
- Alternatifler ise;
- Bağcılar İstasyonu
- Beşiktaş İstasyonu
- Sarıyer İstasyonu şeklindedir.

Kriter açıklamaları aşağıdaki gibidir:

Gürültü(G1): İtfaiye istasyonlarında ki normal çalışma ortamları ve gürültü oluşturabilecek itfaiye araçları, elektrikli ekipmanlar vb. malzemelerin bulunduğu çalışma ortamlarını kapsamaktadır.

Titreşim(G2): Titreşimin insan sağlığına yönelik zararlı etkilerinden korunabilmek için özellikle elle kullanılan araçların tutma yerlerinin kauçuk ve plastik gibi izalasyon maddeleriyle kaplanması, çalışanlara özel koruyucu eldivenler kullanılması ve makinelerle ilgili olarak da motor devir sayısının azaltılması ve amortisör kullanılması gerekmektedir. (Erkan, 1997)

Termal Konfor(G3): İstasyonlardaki çalışma ortamlarında ısı seviyeleri çalışma düzeyini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Özellikle fazla sayıda çalışanın çalıştığı itfaiye ortamlarında gerekli hava miktarının sağlanması ve temiz hava akışının düzeninin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Basınç(G4): İtfaiyelerde kullanılan basınçlı ekipmanlar arasında temiz hava solunum cihazları itfaiyecileri en çok kullandığı ekipmanlar arasında yer almaktadır. Bu sistem 300 bar basınçla, şişe içerisine sıkıştırılmış havayı, üzerinde bulunan sistemler vasıtasıyla yaklaşık 1 atmosfer basınçla, belirli bir süre solumayı sağlamaktadır.

Aydınlatma(G5): Çalışma ortamlarında iş görenler, yaptıkları işlere, buldukları ortama ve genel çevrelerine veya iş alanı içindeki çeşitli noktalara bakmak durumundadırlar. Bu durumda ortaya çıkan sonuç iş görenin çalıştığı alanın kendisi için en iyi aydınlatılmış alan olmasıdır. Aydınlık düzeyi kullandığı araç gereçleri ve çalıştığı ortamdaki gerekli detayları algılayabilmesi için yetersiz ise, çalışanın konforlu olduğu düzeyi sağlamak gerekmektedir. (Güler, 1997)

Elektrik(G6): İtfaiyelerde çalışma ortamlarında elektrik ihtiyaç bakımından en ön sıralarda yer alır.

Elektrik kaynaklı tehlikeler için yeterli önlemler alınmaması durumunda çalışanların hayatlarını tehdit edebilmektedir. Çalışanları tehlikelerden uzak tutabilmek için toplu ya da bireysel önlemler mutlaka alınmalıdır.

İş kazaları ve Meslek Hastalıkları(G7): İş kazası ve meslek hastalığı ile ilgili sosyal koruma iki aşamada sağlanmaktadır. Bunlardan birincisi risk meydana gelmeden riskin önlenmesini içeren iş sağlığı ve güvenliği sisteminin kurulması ve uygulanmasıdır. İkincisi ise risk meydana geldikten sonra iş kazası ve meslek hastalığı sonucu çalışanın ve bağımlılarının gelir azalışı ve gider artışını tazmin eden sosyal güvenlik programlarıdır. 6331 sayılı yeni İş Sağlığı ve Güvenliği Yasası, iş sağlığı ve güvenliğinin koruma ağını genişletmektedir. (Karadeniz, 2012)

Radyasyon(G8): Radyasyon, yüksek hızda parçacıkların ve elektromanyetik dalgaların enerjisi olarak tanımlanır. Tüm canlılar doğal kaynaklardan iyonize radyasyona maruz kalırlar ve bu durum doğal yaşamın vazgeçilmez bir özelliğidir. Doğal radyasyon, karasal ve kozmik radyasyonları içeren dış radyasyon ile iç radyasyonları içermektedir. (Unsear, 2008)

Fiziksel(K1): İstasyonlarda fizyolojik açıdan çalışma yeri düzenlemenin amacı, çalışma yöntem ve koşullarının çalışanlara uygun hale getirilmesi ve insan çalışmasının daha iyi hale getirilmesine yönelik olmalıdır. Bu amaca ulaşabilmek için çalışanın etkilenmesi en aza indirilmeli, performansın sürekli sürdürülebilmesi için, hareket hızı ile dinlenme aralarının uyumu iyi ayarlanmalıdır.

Çevresel(K2): İtfaiyelerde yapılan çevresel risk değerlendirmelerinde sistematik metotlarla var olan tehlikeler belirlenmeli, riskler ortaya çıkarılmalı, riskleri ortaya çıkarmak için nitel ve nicel yöntemler kullanılmalıdır. Yapılan bu değerlendirmelerden sonra ortaya çıkan riskleri yok etmek ve kontrol altında tutmak için düzenleyici önleyici raporlar tutularak acilen bu durumların giderilmesi gerekmektedir.

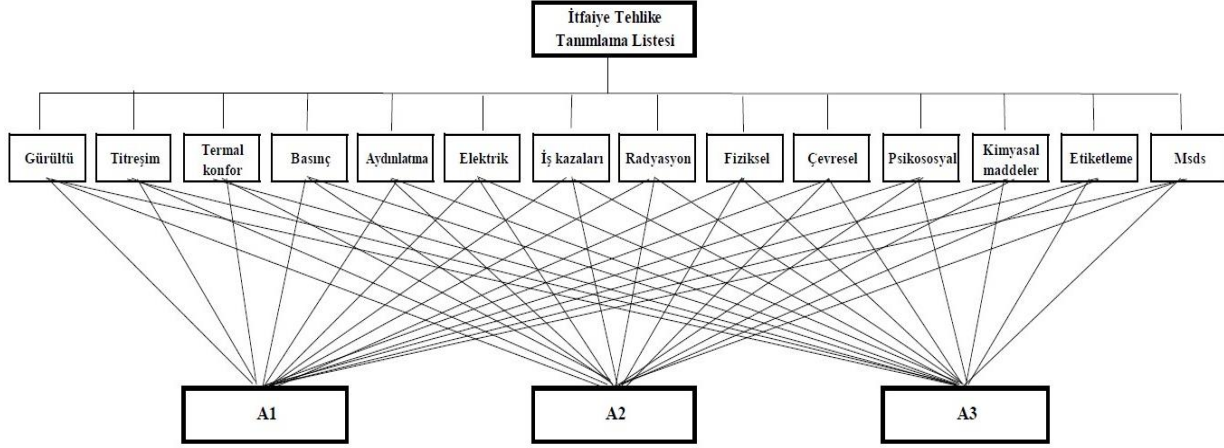
Psikososyal(K3): Çalışma ortamında renk, şekil, düzen gibi psikolojik yönden rahatlık sağlayıcı düzenlemeler yoluyla çalışana uygun bir ortam oluşturulması amaçlanmalıdır. Ayrıca algı, odaklanma ve iş öğrenimi gibi konularla birlikte deneysel psikoloji çalışmalarıyla ergonomiye katkı sağlamaktadır. Ergonomi psikolojiden bazı yöntemleri alır ve kullanır. Sonuç olarak psikoloji ile ergonomi arasındaki ilişkilerin çok derin ve önemli olduğu yargısına varmak mümkündür.(Kıraç, 2005)

Kimyasal Maddeler(M1): İstasyonlarda kimyasal maddelerin tehlikeli reaksiyon vermeyecek şekilde sınıflandırılması ve bu sınıflara uygun olarak depolanması çok büyük önem taşımaktadır. Kimyasal maddelerin depolandığı ortamlar yangın ve patlama riski taşıdığından dolayı kimyasal madde üreten ve/veya kimyasal madde kullanan işyerleri, kimyasalların güvenli bir şekilde depolanması için gerekli tedbirleri almış olmaları gerekmektedir.

Etiketleme(M2): Kimyasalların etiketinde bulunan tehlike sembolleri, güvenlik ibareleri ve risk ibareleri ifadeler kullanıcılar ve çalışanlar için bir uyarı niteliği taşımaktadır. Ayrıca kimyasalların

envanteri, kimyasallar ve tehlikeleri hakkında yeterli bilgiye sahip olan teknik bir personel tarafından titiz bir şekilde hazırlanması gerekmektedir.

Msd(M3): İstasyonlarda doğru ve nitelikli olarak hazırlanmış malzeme güvenlik bilgi formları, kimyasallar kaynaklı iş kazalarının önlenmesi için işyerlerinde güvenilir kaynaklar olarak her zaman ulaşılabilir şekilde hazır halde bulundurulmalıdır.



Şekil 1. Hiyerarşik Yapı

Analitik Hiyerarşi Süreci prosedürlerine göre elde edilen bulgular Microsoft Excel veri işleme yazılımı ile hesaplanarak tablolar yardımıyla açıklanmaktadır.

Tablo 4. Ana Kriterlere Göre İkili Karşılaştırma Matrisi

	A1	A2	A3
A1	1	1,650963624	3
A2	0,60570686	1	2,28942849
A3	0,33333333	0,436790232	1
TOPLAM	2,09986842	3,335970136	6,3163596

Tablo 4’de hiyerarşinin birinci seviyesinde olan ana kriterler için katılımcılardan elde edilen veriler sonucunda oluşturulan karşılaştırma matrisi hazırlanmıştır. Bu tablodan hareketle yapılan hesaplamalar sonucunda her bir hücrenin kendi sütun toplamına bölünmesiyle aşağıdaki tablo elde edilmiştir.

Tablo 5. Ana Kriterlere Göre Ağırlıkların Belirlenmesi

	A1	A2	A3	ÖNCELİK VEKTÖRÜ
A1	0,47622032	0,494897603	0,47495713	0,482025
A2	0,28844991	0,299762875	0,36246012	0,316891
A3	0,15874011	0,130933496	0,15831904	0,149331

Önem düzeyi sütunundaki değerler ise karşılık gelen fiziksel, ergonomik, kimyasal maddeler sütunlarındaki değerlerin ortalaması $CI=0,002974$ ’dür. CR 0,002974 değeri 0,10 değerinden küçük olduğu için Tablo 6’daki ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Fiziksel Risk Kriterine Göre İkili Karşılaştırma Matrisi

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
G1	1	2,620741394	2,62074139	3,301927	2,620741	3	0,255436	1,817121
G2	0,38157141	1	0,29876032	0,693361	2,620741	1,259921	0,195743	1,817121
G3	0,38157141	1,44224957	1	0,736806	1,44225	0,763143	0,282311	1,817121
G4	0,30285343	1,44224957	1,14471424	1	1,44225	0,531329	0,320753	0,87358
G5	0,38157141	0,381571414	0,60570686	0,693361	1	0,762506	0,195743	2,289428
G6	0,33333333	0,793700526	1,3103707	1,882072	1,311464	1	0,419974	1,817121
G7	3,91486764	5,108729549	3,54219523	3,11766	5,10873	2,080084	1	2,289428
G8	0,55032121	0,550321208	0,55032121	1,144714	0,43679	0,550321	0,43679	1
TOPLAM	7,56001235	15,0266194	13,2132481	13,99052	17,57376	11,05568	3,258418	13,99773

Tablo 7’de fiziksel risk ana kriterinin alt kriterleri için kıyaslama yapılmıştır. Bu tabloya göre oluşturulan matris ve tutarlılık değerleri ile ilgili bulgular Tablo 6’da gösterilmektedir.

Tablo 7. Fiziksel Risk Kriterine Göre Ağırlıkların Belirlenmesi

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	W ÖNCELİK VEKTÖRÜ
G1	0,13227492	0,174406586	0,19834195	0,236012	0,149128	0,271354	0,078393	0,129815	0,171216
G2	0,05047233	0,066548568	0,02261066	0,049559	0,149128	0,113961	0,060073	0,129815	0,080271
G3	0,05047233	0,095979643	0,07568162	0,052665	0,082068	0,069027	0,08664	0,129815	0,080294
G4	0,04005991	0,095979643	0,08663383	0,071477	0,082068	0,048059	0,098438	0,062409	0,073141
G5	0,05047233	0,025393031	0,04584088	0,049559	0,056903	0,06897	0,060073	0,163557	0,065096
G6	0,04409164	0,052819633	0,09917098	0,134525	0,074626	0,090451	0,128889	0,129815	0,094299
G7	0,51783879	0,339978635	0,26807907	0,222841	0,290702	0,188146	0,306897	0,163557	0,287255
G8	0,07279369	0,036623088	0,0416492	0,081821	0,024855	0,049777	0,13405	0,07144	0,064126

Tablo 7’de bulunan gürültü, titreşim, termal konfor, basınç, aydınlatma, elektrik, iş kazaları, radyasyon sütunlarındaki değerler Tablo 6’da her hücrenin kendi sütun toplamına bölünmesi işlemi ile elde edilmiştir. Önem düzeyi olarak belirtilen sütunda yer alan değerler ise gürültü, titreşim, termal konfor, basınç, aydınlatma, elektrik, iş kazaları, radyasyon sütunlarının ortalama değerleri $CI=0,069352$ ’dir. CR değeri olan $0,049186$ değeri $0,10$ dan küçük olduğu için tutarlıdır.

Tablo 8. Ergonomik Risk Kriterine Göre İkili Karşılaştırma Matrisi

	K1	K2	K3
K1	1	2,620741394	1,3103707
K2	0,38157141	1	1,06265857
K3	0,76314283	0,793700526	1
TOPLAM	2,75323566	4,890973247	4,17742995

Tablo 9. Ergonomik Risk Kriterinin Alt Kriterleri İçin Kıyaslaması

	K1	K2	K3	W ÖNCELİK VEKTÖRÜ
K1	0,36320901	0,53583229	0,31367868	0,40424
K2	0,13859018	0,20445825	0,25438094	0,199143
K3	0,27718035	0,16227868	0,23938163	0,22628

Tablo 9’da bulunan fiziksel, çevresel, psikososyal risk değerleri ise Tablo 8’de yer alan değerlerin sütun toplamları alındıktan sonra her hücrenin kendi sütun toplamına bölünmesi sonucunda elde edilmiştir. Önem düzeyi sütununda yer alan fiziksel, çevresel, psikososyal risk değerlerinin ortalaması $CI=0,011405$ ’dir. Tabloda yer alan $CR=0,019663$ değeri ise 0,10 dan küçük olduğu için matris tutarlıdır. Önem düzeyi sütununda yer alan unsurlardan en önemlisi ise 0,40424 değeri ile Fizikseldir.

Tablo 10. Kimyasal Risk Kriterine Göre İkili Karşılaştırma Matrisi

	M1	M2	M3
M1	1	3,914867641	2,62074139
M2	0,25543648	1	0,94103603
M3	0,38157141	1,062658569	1
TOPLAM	1,64926335	6,269220829	4,82982967

Tablo 10’da Kimyasal risk ana kriterinin alt kriterleri için karşılaştırma yapılmıştır. Bu tabloya istinaden hazırlanan aşağıdaki tabloya göre kimyasal risk ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin önem düzeyleri gösterilmektedir.

Tablo 11. Kimyasal Risk Kriterine Göre Ağırlıkların Belirlenmesi

	M1	M2	M3	W ÖNCELİK VEKTÖRÜ
M1	0,6063313	0,624458405	0,5426157	0,591135
M2	0,15487913	0,159509455	0,19483835	0,169742
M3	0,23135869	0,16950409	0,20704664	0,202636

Topsis yöntemine ilişkin bulgular olarak;

Çalışmanın önceki başlıklarında verilen hesaplama adımları takip edilerek elde edilen veriler TOPSIS prosedürüne göre işlenmiş ve aşağıdaki maddeler halinde sunulmuştur.

Katılımcılardan öncelik kriterlerini göz önüne alarak alternatiflere puan vermeleri istenir ve elde edilen bu verilerden karar matrisi oluşturulur. Aşağıdaki tabloda katılımcılardan elde edilen ham verilerle oluşturulmuş karar matrisi gösterilmektedir.

Tablo 12. TOPSIS Karar Matrisi

	Bağcılar istasyon	Beşiktaş istasyon	Sarıyer istasyon
G1	1,666666667	3,666666667	2,666666667
G2	2	3,333333333	2,333333333
G3	2,333333333	4	2,666666667
G4	2,333333333	3,333333333	2
G5	3,666666667	4,666666667	1,666666667
G6	3	4,666666667	2,333333333
G7	2,666666667	3,666666667	3,333333333
G8	3,333333333	3	1,666666667
K1	3,333333333	4,333333333	2,666666667
K2	3	4,333333333	2,666666667
K3	3	4	2,666666667
M1	3	4	2,333333333
M2	2	3	1,666666667
M3	2,333333333	3,666666667	3

Normalize edilmiş karar matrisini elde etmek için her bir alternatife karşılık gelen kriter değerlerinin kareleri alındıktan sonra her sütuna ait değerler toplanır daha sonra karekökleri alınarak Tablo 13 elde edilir (Özdemir, 2015:140).

Tablo 13. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

	Bağcılar istasyon	Beşiktaş istasyon	Sarıyer istasyon
G1	0,34503278	0,759072115	0,552052447
G2	0,441128773	0,735214622	0,514650235
G3	0,436648003	0,748539434	0,499026289
G4	0,514650235	0,735214622	0,441128773
G5	0,594811877	0,757033299	0,270369035
G6	0,498463898	0,775388286	0,387694143
G7	0,473879102	0,651583766	0,592348878
G8	0,696733014	0,627059713	0,348366507
K1	0,547996624	0,712395612	0,438397299
K2	0,507899383	0,733632442	0,451466118
K3	0,529411765	0,705882353	0,470588235
M1	0,543709884	0,724946512	0,422885465
M2	0,503508815	0,755263222	0,419590679
M3	0,441836082	0,694313843	0,568074963

Ağırlıklı karar matrisini elde etmek için AHP yönteminde elde edilen ağırlıklar ile normalize karar matrisi çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilir.

Tablo 14. AHP ile Elde Edilen Kriter Ağırlıkları

Kriter	Ağırlıklar
G1	0,17121565
G2	0,08027112
G3	0,08029371
G4	0,07314065
G5	0,06509606
G6	0,0942986
G7	0,28725502
G8	0,06412607
K1	0,404239992
K2	0,199143134
K3	0,226280211
M1	0,59113514
M2	0,16974231
M3	0,20263647

Tablo 14’de AHP yöntemi ile elde edilen ağırlıklar gösterilmektedir. Bu ağırlıklar, her bir kriterin öncelik değerlerine göre TOPSIS çözümüne katılmasını sağlamaktadır.

Tablo 15. Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi

Kriter	Bağcılar istasyon	Beşiktaş istasyon	Sarıyer istasyon
G1	0,033246042	0,073141293	0,053193668
G2	0,019534914	0,03255819	0,022790733
G3	0,019451212	0,033344935	0,022229957
G4	0,021073685	0,030105264	0,018063159
G5	0,021206517	0,026990112	0,009639326
G6	0,02613237	0,040650354	0,020325177
G7	0,075656795	0,104028093	0,094570993
G8	0,02456924	0,022112316	0,01228462
K1	0,088214017	0,114678222	0,070571213
K2	0,040613044	0,058663286	0,036100483
K3	0,04895859	0,06527812	0,043518746
M1	0,052515668	0,070020891	0,04084552
M2	0,01399598	0,02099397	0,011663317
M3	0,014611303	0,022960619	0,018785961

Ağırlıklandırılmış karar matrisi elde edildikten sonra pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm setleri oluşturulur. Pozitif ideal çözüm seti ağırlıklandırılmış karar matrisi sütunlarında bulunan en büyük değeri, negatif ideal çözüm seti ise en küçük değeri temsil etmektedir.

Tablo 16. Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Seti

	Pozitif İdeal Çözüm Seti	Negatif İdeal Çözüm Seti
G1	0,073141293	0,033246042
G2	0,03255819	0,019534914
G3	0,033344935	0,019451212
G4	0,030105264	0,018063159
G5	0,026990112	0,009639326
G6	0,040650354	0,020325177
G7	0,104028093	0,075656795
G8	0,02456924	0,01228462
K1	0,114678222	0,070571213
K2	0,058663286	0,036100483
K3	0,06527812	0,043518746
M1	0,070020891	0,04084552
M2	0,02099397	0,011663317
M3	0,022960619	0,014611303

Aşağıdaki tabloda TOPSIS yöntemine göre her bir alternatifin kriterlerden aldıkları puanlara göre hesaplanmış ideal çözüme yakınlık dereceleri hesaplanmıştır.

Tablo 17. İdeal Çözüme Göreceli Yakınlık Değerleri ve Sıralaması

	Pozitif İdeal Çözüme Uzaklık	Negatif İdeal Çözümü Uzaklık	İdeal Çözüme Göreceli Yakınlık Değerleri	Sıralama
Bağcılar istasyon	0,069300810	0,028815896	0,293690004	2
Beşiktaş istasyon	0,002456924	0,087469505	0,972678511	1
Sarıyer istasyon	0,074833461	0,028131907	0,273217177	3

Uzmanların, çalışmadaki alternatif itfaiyedeki tehlike ve risk kriterlerini göz önüne alarak değerlendirdiklerinde bir sıralama ortaya çıkmaktadır. Buna göre, *Alternatif 2*, *Alternatif 1* ve *Alternatif 3* sırasıyla çözüme en yakın ilk üç alternatif olarak bulunmuştur.

5. SONUÇ

Yapılan çalışma ilgili kanunlar ve kanunlara bağlı olarak yayınlanan yönetmelik ve mevzuatlar doğrultusunda, işyerlerindeki tehlike ve risk faktörleri değerlendirilerek yapılmıştır. İş sağlığı ve güvenliği konusunda daha kapsamlı bir çalışma yapılabilmesi için tüm İstanbul itfaiyesindeki istasyonların risk etmenlerinin değerlendirilmesi daha isabetli ve kararlı sonuçlar verecektir.

Nace kodu olarak adlandırılan kod ile itfaiye istasyonunun taşıdığı risk potansiyeli dikkate alındığında, itfaiye istasyonları belirlenen cetvele göre çok tehlikeli kapsamında yer almaktadır. Bu nedenle risk değerlendirmelerinin en geç 2 yılda 1 yapılması gerekmektedir. Ayrıca iş sağlığı güvenliği kurul toplantılarının da her ay mutlaka yapılması gerekmektedir. Kurul kararları itfaiye istasyonlarında ki olası risklerin minimuma indirilmesi ile ilgili kararları kapsar ve kararlar iş güvenliği uzmanı ile iş yeri hekimi tarafından kurulun onayına sunulur ve işveren vekiline tebliğ edilir. İşveren veya işveren vekili de 6331 sayılı kanun gereği alınmış olan bu kararları en kısa sürede düzeltmekle ve yerine getirmekle yükümlüdür.

Bu araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesinde, İş sağlığı ve güvenliği ve itfaiyelerdeki tehlike ve risklere yer verilmeye çalışılmıştır. Araştırma kapsamında, bu noktaya kadar yapılan tespitler ve neticeler sonucunda itfaiyelerdeki tehlike ve riskler ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu şekilde iş sağlığı ve güvenliğine verilen önemle kurumların işlerini daha güvenli ve başarılı bir şekilde yapabilmesi mümkün olabilir.

Acil durum hizmetlerinin etkinliği, bu durumlara zamanında, güvenli şekilde, uygun personelle ve araçlarla yapılıp yapılmaması ile ilgilidir. Bu noktada itfaiye hizmetleri, kamu yönetimi içerisinde ayrı bir ilgi ve önemle ele alınmalı, itfaiye hizmetlerinin özel nitelikleri göz önünde bulundurularak yerel yönetimler tarafından bir takım uygulama ve çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

İtfaiye hizmetlerinin sunumu, hizmetten yararlananların sağlık ve güvenliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle itfaiye hizmetlerinde kalitesinin artırılması, tehlikelerin bertaraf edilmesi çalışanların yaşam kalitesini de artırmaktadır.

Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması için AHP yönteminden yararlanılmıştır. TOPSIS yöntemi ile de belirlenen İtfaiye istasyonlarının sıralaması gerçekleştirilmiştir.

Yapılan uygulama sonucunda, İtfaiye istasyonlarının pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri tespit edilmiş ve bulunan yakınlık katsayılarına göre sıralama yapılmıştır. 0,972 yakınlık katsayısı ile ilk sırada yer alan Beşiktaş İtfaiye istasyonu yer almaktadır. Beşiktaş İtfaiye istasyonunu takiben 0,293 ile Bağcılar İtfaiye istasyonu ve 0,273 ile Sarıyer İtfaiye istasyonu gelmektedir.

Bu çalışmada yapılan ÇKKV teknikleri ile çözüm sonucunda oluşan sıralama ise Fiziksel, Ergonomik ve kimyasal maddelerdir. Çalışma kapsamında yapılan kriter ve alternatif değerlendirmeleri, Kamuda halen görev yapmakta olan 3 iş güvenliği uzmanı tarafından değerlendirilmiştir.

Sonraki yapılacak çalışmalarda, yeni ana kriterlerin ve bu kriterlere bağlı alt kriterlerin çok daha fazla sayıda uzman ile birlikte oluşturulması ve değerlendirilmesi, seçilen alternatiflerin tehlike ve risklerin genişletilmesi ve yeni yöntemlerin kullanılması da literatüre katkı sağlayacak olup itfaiye hizmetlerinde daha güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasına da katkı sağlayacaktır.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada Berk AYVAZ fikir, eleştiri, bilgisayar ortamının sağlanması konusunda katkıda bulunmuştur. Muhammed Ali GÜLEÇ araştırma, veri toplama, analiz, yorum, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkı sağlamıştır. Yazarların makaleye olan katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Yazarlar çalışma sırasında çalışma konusu olan itfaiyelerle ilgili çalışmalarında desteklerini esirgemeyen İstanbul İtfaiyesine ve yöneticilerine teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Acuner, Ö., Çebi, S., (2013), İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Risk Değerlendirme için Bulanık Tabanlı Bir Model Önerisi, 19. Ulusal Ergonomi Kongresi, 27-29 Eylül 2013, Nevşehir.

Ali, J., Maryam, M., (2013), “Environmental Risk Assessment of Dams by Using Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study of the Polrood Dam”, Guilan Province, Iran, An International Journal, 20, 69-85.

Ayanoğlu, S., Biberci, M.A., (2015), Ormancılık Üretim İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünün AHS (Analitik Hiyerarşi Süreci) ile Risk Değerlendirmesi, Üretim İşlerinde Hassas Ormancılık Sempozyumu, 4-6 Haziran 2015, Kastamonu.

Barlas, B., (2012), “Occupational Fatalities in Shipyards: an Analysis in Turkey”, Brodogradnja, 63(1), 35-41.

Braglia, M., Frosolini, M., Montanari, R., (2003), “Fuzzy Criticality Assessment Model for Failure Modes and Effects Analysis”, International Journal of Quality & Reliability Management. 20(4), 503-524.

Can, G.F., Delice, E.K., Özçakmak, B.C., (2017). “Selection of Seating Arrangement by Using Multi Criteria Decision Making Approach”, Journal of Engineering Sciences and Design, 5, 213-225.

Erkan, N., (1997), Ergonomi, M.P.M Yayınları, 373, Ankara.

Fera, M., Macchiaroli, R., (2010), “Use of Analytic Hierarchy Process and Fire Dynamics Simulator to Assess The Fire Protection Systems in a Tunnel on Fire”, International Journal of Project Management, 14(6), 504-529.

Fouladgara, M.M., Yazdani-Chamzina, A., Zavadskas, E.K., (2012), “Risk Evaluation of Tunneling Projects”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12, 1-2.

Güler, Ç., (1997), Ergonomiye Giriş, T.C. Sağlık Bakanlığı, 61, Ankara.

Güner, H., (2005), Bulanık AHP ve Bir İşletme için Tedarikçi Seçimi Problemine Uygulanması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 133, Pamukkale.

Güneri, A.F., Gül, M., Özgürler, S., (2015), “A Fuzzy AHP Methodology for Selection of Risk Assessment Methods in Occupational Safety”, International Journal of Risk Assessment Management, 3-4(18), 319-335.

Hayta, A.B., (2007), “Çalışma Ortamı Koşullarının İşletme Verimliliği Üzerine Etkisi”, Journal of Commerce, 1, 21-41.

Heller, S., (2006), Managing Industrial Risk Having A Tested and Proven System to Prevent and Assess Risk, Journal of Hazardous Materials, 130, 58–63.

Ho, W., (2008), “Integrated Analytic Hierarchy Process and its Applications-A Literature Review”, European Journal of Operational Research, 211-228.

Jozi, S.A., Shoshtry, M.T., Zadeh A.R.K., (2015), “Environmental Risk Assessment of Dams in Construction Phase Using A Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Method”, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(1), 1-16.

Karadeniz, O., (2012), “Dünya’da ve Türkiye’de İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları ve Sosyal Koruma Yetersizliği”, *Çalışma ve Toplum*, 2012/3, 17.

Kasap, Y., Subaşı, E., (2011), Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Açık İşletme Madenciliğinde Risk Denetimi, Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, 24-25 Kasım 2011, Zonguldak.

Kılıç, H.S., Zaim, S., Delen, D., (2014), Development of a Hbrid Methodology for ERP System Selection:The Case of Turkish Airlines. *Decision Support Systems*, 82-92.

Kıraç, Y., (2005), Büro Yönetiminde Ergonomi ve Ergonominin Verimliliğe Etkisi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90, Ankara.

Kısa, Y., (2014), Döküm Atölyelerindeki İş sağlığı ve Güvenliği Koşullarının Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle Değerlendirilmesi. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, 87, Ankara.

Liu, J., Li, Q., Wang, Y., (2013), “Risk Analysis in Ultra Deep Scientific Drilling Project A Fuzzy Synthetic Evaluation Approach”, *International Journal of Project Management*, 31, 449–458.

Mokhtari, K., Ren, J., Roberts, C., Wang, J., (2012), “Decision Support Framework for Risk Management on Sea Ports and Terminals Using Fuzzy Set Theory and Evidential Reasoning Approach”, *Expert Systems with Applications*, 39, 5087-5103.

Onat, O.K., Akın, O., Eser, E.D., (2014), “İşletmelerde Risk Kavramı Farkındalığı: Organize Sanayi Bölgesinde Bir Araştırma”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 5, (11), 21–39.

Özdağoğlu, A., (2011), Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ve Uygulama Örnekleri. 1.Baskı, MMO, 300, İzmir.

Özdemir, M., (2015), Yıldırım, B.F., Önder, E., (edt.) Operasyonel, Yönetmel ve Stratejik Problemlerin Çözümlerinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Dora Basım Yayın, 338, Türkiye.

Özfiat, M.K., Özfiat P.M., (2021), “Yangın Safhalarının HTEA Risk Analizi ile İncelenmesi”, *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5(1), 37-44.

Saaty, T.L., (2008), “Decision Making with The Analytic Hierarchy Process”, *International Journal of Services Sciences*, .83-98.

Saaty, T.L., Niemira, M.P., (2006), “A Framework for Making” A Better Decision”, *Research Review*, 13(1).

Saaty, T.L., (1990), “How to Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process”, *European Journal of Operational Research*, 9-26.

Sipahioğlu, A., (2008), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Ders Notları, Osman Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.

Tüzün, S., (2012), A Multi-Criteria Decision Model for The Evaluation of Emergency Department Performance. Yüksek Lisans Tezi, Department of Industrial Engineering Industrial Engineering Programme Istanbul Technical University, Istanbul.

Unsear, (2008), United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York.

Yang, T., Hung, C.C., (2007), “Multiple-Attribute Decision Making Methods for Plant Layout Design Problem”. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 126-137.

Yurdakul, M., Gökpınar, E., İç, Y.T., (2019), “Resmi Bir Kurumda Risk Analizi Uygulaması”, Mühendis ve Makina, 60(696), 221 - 230.

Zeng, J., An, M., Smith, N.J., (2007), “Application of a Fuzzy Based Decision Making Methodology to Construction Project Risk Assessment”, International Journal of Project Management, 25(6), 589-600.



Tarama Makalesi / Review Article

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE PİGMENTLERİN KULLANIMI VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

THE USAGE OF PIGMENTS IN TEXTILE INDUSTRY AND INVESTIGATION
OF THEIR EFFECTS ON HUMAN HEALTH

Ashhan KORUYUCU¹

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
adelituna@nku.com

Geliş Tarihi / Received
02.05.2021

Kabul Tarihi / Accepted
23.06.2021

Öz

Pigmentler; organik ve inorganik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Organik ve inorganik pigmentler arasında; parlaklık, kimyasal stabilite, renk, maliyet, dağılım, ışık emme, boyut ve yüzey alanında farklar bulunmaktadır. Pigmentler tekstil endüstrisinde; dolgu maddesi, materyallerin renklendirilmesinde, farklı fonksiyonel özelliklerin (güç tutuşur, antibakteriyel, antimikrobiyal, su itici, UV ışınım koruma özellikleri, optik özellikleri, ses ve ısı yalıtım özelliklerinin) geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle kaplama malzemesinde; ağır metaller içeren inorganik pigmentler kullanılmamalıdır. Çünkü bu pigmentler, insan sağlığına zararlı olarak bilinmektedir. Bu çalışmada pigmentler hakkında genel bilgi verilip, tekstil materyallerinin renklendirilmesi (boyama, baskı ve kaplama yöntemleri ile) işlemi ile elde edilen farklı fonksiyonel özellikler üzerine yapılmış bazı çalışmalar anlatılmıştır. Bunun yanı sıra; pigmentlerin vücuttaki etkileri de kısaca özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnorganik pigmentler, insan sağlığı, organik pigmentler, tekstil.

Abstract

Pigments are divided into organic and inorganic ones. There are differences between them in brightness, chemical stability, color, cost, distribution properties, light absorption, dimension and surface area. Pigments are used as filling besides in coloration of materials, in the improvement of new materials with different functional properties (such as, flammable proof, antibacterial, antimicrobial, water-repellent, UV radiation saving features, optical properties, thermo and acoustic insulation properties). Especially, inorganic pigments which contain heavy metals should not be used as coating materials. Because these pigments are known to be harmful to human health. In this research general knowledge about pigments were given then studies about their usage in textile material colouration (dyeing, printing and coating techniques) and the different functional properties being achieved by their usage were presented. Besides, the effects of pigments on human health were also briefly summarized.

Keywords: Human health, inorganic pigments, organic pigments, textile.

¹Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye.
adelituna@nku.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8443-5188.

1. GİRİŞ

Pigmentler, bir ortamın görünümünü iyileştiren ya da ona renk veren çözünmeyen katı maddelerdir. Çözünmez olduklarından, ortama ince toz halinde öğütülerek ve çözeltiliye karıştırılarak eklenmektedirler. Pigmentler, ışığın belirli dalga boylarını emerek ışığın yüzeyden geçme ya da yansıma şeklini değiştirmektedir. Organik ve inorganik olmak üzere iki ana pigment türü bulunmaktadır.

İnorganik pigmentler karbon zincirlerine ve halkalarına dayanmamaktadır. Bu güçlü karbon zincirleri ayrıca onları oldukça stabil hale getirmektedir. Kuru öğütülmüş minerallerden genellikle metallere ve metalik tuzlardan oluşmaktadır. Bileşimleri nedeniyle, inorganik pigmentler genellikle organik pigmentlerden daha opak ve daha çözünmezdir. Genel olarak, inorganik pigmentler, ışık haslığı ve düşük maliyeti nedeni ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. İnorganik pigmentlerin üretimi, özellikle endüstriyel uygulamalarda daha uygun olmaktadır. Bunun yanı sıra; organik pigmentler karbon zincirlerine ve halkalarına dayanmaktadır. Bazıları stabilizatör olarak inorganik elementler içermektedir. Bu güçlü karbon zincirleri ayrıca onları oldukça stabil hale getirmektedir. Organik pigmentlere örnek olarak; alizarin, azo pigmentleri, bakır ftalosiyaninler, quinacridone verilebilir.

Organik ve inorganik pigmentler arasında parlaklık, kimyasal stabilite, renk, maliyet, dağılım, ışık emme, boyut ve yüzey alanı bakımından farklar bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı; inorganik ve organik pigmentlerin geçmişten günümüze tekstil kaplama endüstrisinde hangi amaçlarla kullanıldığını ve insan sağlığına etkilerini ortaya koymaktır.

2. İNORGANİK VE ORGANİK PİGMENTLERİN ÖZELLİKLERİ

Pigmentler radikal oluşumunu hızlandıran metal iyonları içerebilmektedir. Pigmentler kullanıldıkları ortamda çözünmemektedir. Ortam içinde ayrı parçacıklar halinde mevcut olarak renk üretmekte, seçici olarak belirli ışığı emmekte ve yansıtmaktadır. Çözünmemeleri ve polar yapıları nedeniyle sıklıkla aglomeratlar oluşturmaktadırlar. Pigmentler organik ve inorganik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tablo 1’de pigmentlerin özellikleri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 1. Pigmentlerin özellikleri (Parys,1994)

	İnorganikler	Organikler
Renk canlılığı	Açık, genellikle mat	Çok açık, çok parlak
Kaplama gücü	Zayıf-orta	Orta-çok iyi
Saydamlık	Opak	Yarı opak
Isı stabilitesi	İyi	Zayıf-iyi
Migrasyon özellikleri	Migrasyon olmaz	Değişken
Işık haslığı	İyi	Orta-iyi
Dispersiyon özelliği	Dispersiyon özelliği zor	Dispersiyon özelliği kolay
Toksik özelliği	Toksik ağır metaller içermektedir	Genellikle toksik değil
Fiyatı	Genellikle ucuzdur, organiklerden daha ucuzdur	Orta-çok pahalı

İnorganik pigmentler boyut olarak daha büyüktür. Yüzey alanı daha düşüktür ve organik pigmentlerden daha yoğunlardır. Bunlar esas olarak parçacık büyüklüğü ve şekli nedeniyle ışığın saçılmasıyla işlev görmektedir.

İnorganik pigmentler; genellikle, bir kristal matris oluşturmak için, çeşitli miktarlarda metal oksit (MeOx) karışımının yüksek sıcaklıkta kalsinasyonu ile üretilmektedir. İnorganik etki pigmentinde, organik yapı bulunmamaktadır (Parys,1994).

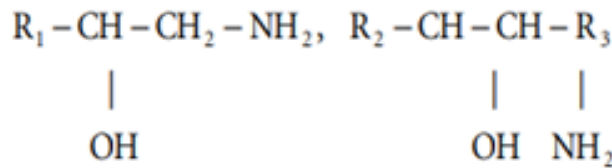
İnorganik pigmentler genellikle metal oksitler ve sentetik kimyasallardır. Bileşimleri basittir. İnorganik pigmentlere örnek olarak: kurşun oksit, kobalt mavisi, kadmiyum sarısı ve titanyum sarısı verilebilmektedir. Yeni çevre yasaları toksisite konusunda çok katı olduğundan, metal oksitler ve sentetik kimyasalların birkaçı artık kullanılmamaktadır (Parys,1994).

İnorganik pigment partikülleri; renklendirdikleri substratta çözünen boyaların aksine, fiziksel formlarını korumaktadır. Bu parçacıklar tipik olarak farklı uygulamalarda organik pigmentlere göre daha büyük, dağılması daha kolay ve renk bakımından daha kararlıdır. Bununla birlikte, organik pigmentler daha yüksek mukavemete sahip olma eğilimindedir ve genellikle daha canlı renkler sağlamaktadır (Parys,1994).

İnorganik pigmentlere örnek olarak; titanyum dioksit, beyazlığı geliştiren pigmentler, siyah pigmentler, demir-oksit toprak pigmentleri, krom pigmentleri, kadmiyum pigmentleri, metalik pigmentler verilebilmektedir. Ana pigment olan titanyum dioksit; rutil ya da anataz şeklinde iki ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Rutil pigmentler daha az foto aktiftirler ve yüksek opaklığa sahiptirler (kırılma indeksi anataz için 2,5). Anataz pigmentleri fotokimyasal olarak aktiftirler. Polimerlerin (özellikle poliamid) ve mevcut herhangi bir renkli pigmentin foto degradasyonunu hızlandırmaktadır. Bu problem, parçacıkların MnO₂ gibi diğer inorganik oksitlerle yüzey işlemleriyle aşılabilmektedir. Saf anataz beyazdır. Diğer beyaz pigmentler; çinko sülfür ve baryum sülfattır. Demire dayanan renkli pigmentler demirli ferrasiyanür (demir mavisi) ve demir oksitler olup, (olası tonlar kırmızılar, sarılar, kahverengiler, morlar) hidrasyon ve kristal yapı oksidasyon derecesine bağlı olmaktadır. Karbon siyahı pigmentleri ısıya dayanıklı ve ucuzdur.

Titanyum dioksit; yüksek spesifik alanına, küçük parçacık boyutuna ve çok yüksek reaktiviteye sahiptir. Titanyum dioksit özellikle anataz formunda UV ışık altında foto katalizör olarak davranmaktadır (Yazhini ve Prabus,2015).

Alüminyum kaplı titanyum dioksit, demir oksit kırmızısı, diğer inorganik pigmentler ve dolgu maddelerinin genel formülü Şekil 1'de gösterilmektedir:



Şekil 1. Alüminyum Kaplı Titanyum Dioksitin Genel Formülü

Burada; R₁, R₂, R₃ zincirde 1 ila 22 karbon atomu içeren alkil gruplarını göstermektedir (Linden vd.,1978).

İnorganik pigment olan ZnO (çinko oksit); beyaz bir tozdur. İnorganik pigmentler ışığa karşı etkileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır:

- Beyaz pigment,
- Renkli pigment,
- Siyah pigment ve
- Efekt pigmenti (Pfaff, 2008).

Efekt pigmentleri iki tiptir; metal etkili pigment ve inci cilası pigmentler. Efekt pigmentleri, kumaş üzerine uygulanmaktadır. Efekt pigmentleri; alüminyum, bakır, bakır-çinko alaşımları ve çinkodan oluşmaktadır (Sekar, 2013).

Efekt pigmentlerin tekstil yüzeylerine yapışmasını arttırmak için bağlayıcı madde gerekmektedir (Mahltig vd., 2016). Metal etkili pigmentler şeffaf değildir ve bu nedenle gelen tüm ışığı tek bir yönde yansıtmaktadır (Mahltig vd.,2016). Metal etkili pigmentlerin en önemlileri: demir (III) oksit, kalay dioksit, krom (III) oksittir (Maile vd., 2005; Pfaff vd., 2009).

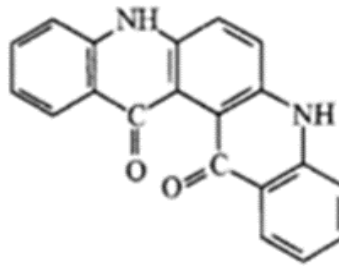
Organik pigmentler; küçük boyutlu (<0.1 mikron) olup, renk mukavemeti ve şeffaflık ile karakterize edilmektedir. Renklendirme özelliklerini yüksek emme katsayısı olan moleküler yapıya sahip bir ya da daha fazla kromoforun varlığına borçludurlar. Küçük parça boyutları nedeni ile ışığı verimli bir şekilde saçmamaktadır. Organik pigmentler iki ana gruba ayrılmaktadır:

- azo ve
- non-azo.

Azolar yaygın olarak kullanılmakta ve güçlü parlak, sarıdan kırmızıya kadar tüm renkleri sağlamakta ve ışık haslığı özellikleri ise; orta-iyi arasında değişmektedir. Azo pigmentleri bir ya da daha fazla azo kromofor içermektedir. Azo tonerler-kalsiyum tuzları ya da alüminyum hidroksit ile çöktürülerek çözünmeyen pigmentlere dönüştürülen karboksilik ya da sülfonik gruplar içeren azo bileşikleridir. Benziden ve türevlerine dayanan birleştirilmiş (sarı ila turuncu tonları) ve yoğunlaştırılmış bis azolara toksik özellikleri nedeni ile artık izin verilmemektedir. Çözünmezlik, genellikle amid grupları olmak üzere çok sayıda süstituent eklenerek, çözünmezlik elde edilmektedir.

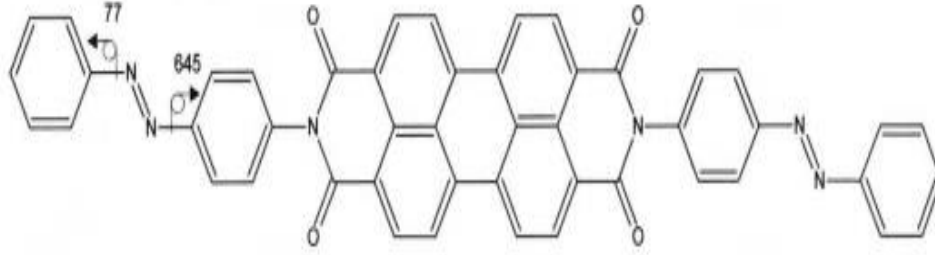
Non azo pigmentleri dörde ayrılmaktadır:

- Ftalosiyanın bakır (mavi tonları) veya klorlu bakır (yeşil mavi tonları). Ftalosiyanınlar; iyi ışık kararlılığı göstermektedir.
- Kinakridonlar pahalı olup, fiziksel forma bağlı olarak kırmızı ile mor tonlarını içermektedir. Kinakridonların yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir:



Şekil 2. Kinakridonların Yapısı (Kurbanova vd.,1998).

- İzöindolilonlar; sarı ve yeşil tonlarında olmaktadır.
- Perilenler; kırmızı tonlarında olmaktadır (Parys,1994). Perilenlerin yapısı Şekil 3'de gösterilmektedir:



Şekil 3. Perilen PR 178'in Yapısı (Wyplosz,2003).

Organik pigmentler; organik bileşiklerdir. Kısmen ya da tamamen kromofor oluşturmak için karbon, oksijen, nitrojen içeren maddelerdir. Bazı organik pigmentler çözünmez metal iyonlarını içermektedir. Organik pigment üretiminde çevresel nedenlerden dolayı kadmiyum ve krom gibi ağır metallerden kaçınılmaktadır (Herbst ve Hunger, 2004).

Organik pigmentler; azo boyalarına ve ftalosiyanın boyalarına dayanmaktadır. Azo pigmentlerle parlak renkler elde edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal kompleksli organik pigment olan ftalosiyanın boyaları; genellikle mavi ve yeşil renktedirler (Speight, 2017).

Endüstriyel olarak kullanılan sarı ve turuncu renklendiriciler; kromat pigmentlerinden oluşmaktadır. En önemli kromat pigmentleri; kurşun kromat (krom sarısı) ve kurşun molibdat pigmentlerini içermektedir.

2.1. Tekstil Kaplama Endüstrisinde Pigmentlerin Kullanımı

Pigmentler; kaplamalara hoş bir renk vermek, optik özellikler ile mekanik özellikleri değiştirmek için kullanılabilir. Ultraviyole ve görünür radyasyonu yansıtan ya da saçabilen pigmentler; kaplamaların iyi korunmasını sağlamaktadır. Pigmentlerin partikül boyutu; renk özelliklerini de önemli ölçüde etkilememektedir.

Renk pigmentleri hem doğal hem de organik ve inorganik sentetik materyalleri içermektedir. Renk pigmentleri:

- Doğal pigmentler,
- Sentetik inorganik pigmentler ya da
- Sentetik organik pigmentler olmak üzere 3'e ayrılmaktadır (Roberts, 1968).

En yaygın kullanılan sentetik inorganik pigmentler:

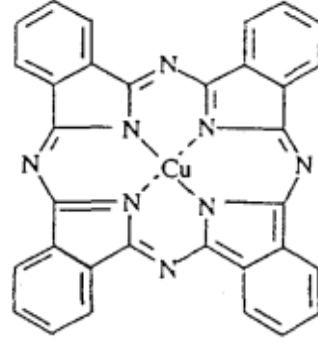
- Kromat pigmentleri,
- Krom yeşilleri ve krom sarıları,
- Krom oksitler ve hidratlar,
- Ultramin mavisi.

Kromat pigmentleri; özellikle krom sarıları ve krom yeşilleri kaplama alanında kullanılmaktadır. Krom yeşilleri ve krom sarıları özel bir demir mavisi karışımından oluşan kompozit pigmentlerdir. Krom oksitler ve hidratları başlıca ışığa, ısıya ve alkaliye karşı stabiliteyi yüksek kullanım alanına sahiptir.

Ultramin mavisinin örtme gücü ve renklendirme özelliği düşük olmasına karşın; iyi ısı stabilitesi ve dekoratif kaplamalarda renklendirme pigmenti olarak kullanılmaktadır.

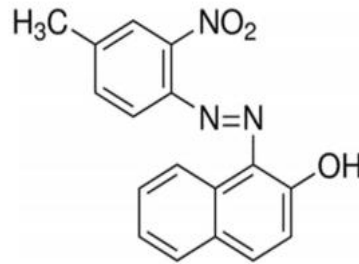
Sentetik organik pigmentler çok büyük ve önemli bir grup içermektedir. En yaygın kullanılan sentetik organik pigmentler şunlardır:

- Bakır ftalosiyanın mavileri ve yeşil pigmentleri; kimyasal olarak inert yüksek renklendirme ve mükemmel ışık haslığına sahiptir. Ftalosiyaninler esas olarak nispeten açık tonlarda kullanılmaktadır. Şekil 4’de bakır ftalosiyanın yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4. Bakır Ftalosiyanın, C.I. Pigment Blue 15 (Roberts, 1968).

- Toluidin kırmızılıarı; suda doğal olarak çözünmeyen azo grubu pigmentlerini içermektedir. Toluidinler; iyi örtme gücüne, mükemmel parlaklığa, dayanıklılığa ve renk kalıcılığına sahiptir. Toluidin kırmızılıarı endüstriyel alanda geniş kullanım alanına sahiptir. Şekil 5’de toluidin kırmızısının yapısı verilmektedir.



Şekil 5. Toluidin Kırmızısının Yapısı (Lewis, 1988).

- Para kırmızılıarı; çözünmeyen azo pigment grubuna sahiptirler.
- Lithol kırmızısı; çözünür azo pigment grubuna sahiptirler.

İnorganik pigmentler; boya ve plastik ürünleri renklendirmek amacıyla kuru toz halde yaygın olarak kullanılır. İnorganik pigmentlerden biri olan çinko oksit; elastomerlerde reaktif bir dolgu maddesi ve UV-stabilizatörü olarak kullanılmaktadır. İnorganik etki pigmentleri; özel optik uygulama alanında (renk ve ışık yansıtma efektleri olarak) kullanılmaktadır (Rashid ve Mahlting, 2018). Titanyum dioksit pigmentleri; tekstil endüstrisinde UV emiciler olarak kullanılmaktadır (Yazhini ve Prabus, 2015). Bütün bunların yanı sıra; boya sentezinde de kullanılırlar (Yazhini ve Prabus, 2015).

Pigmentlerin bir başka önemli grubu; kadmiyum ve kadmiyum pigmentleridir. Krom ve kadmiyum bazlı inorganik pigmentlerin kullanımında çevresel problemler bulunmaktadır. Endüstriyel olarak kullanılan malzemelerin çoğunu; sarı inorganik pigmentler, kadmiyum, kurşun ve altı değerlikli krom temsil etmektedir. Örnek olarak; kurşun kromat $PbCrO_4$ ve PbO verilebilir.

Krom pigmentler; boyalarda, kaplamalarda ve plastiklerde kullanılmaktadır. Parlak renk tonları, iyi renklendirme gücü, gizleme gücü, ışık haslığı ve hava direnci ile karakterize edilmektedir.

Metalik pigmentler; boyalarda kullanılmaktadır. Metalik pigment olarak en çok alüminyum kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra diğer metalik pigmentler; sınırlı ölçüde nikel, kalay ve kurşun alanında kullanılmaktadır. Karbon siyahı; renklendirme gücü en yüksek olan pigmenttir. Opaklık ve kaplamalarda geniş kullanım alanına sahiptir. Kadmiyum sarıları ve kırmızıları alkaliye karşı dirençlidir. Alkaliye dayanıklı olanlar; emülsiyon boyalarda kullanılmaktadır (Roberts,1968).

2.1.1. Daha önce yapılan bazı çalışma sonuçları

Günümüzde pigmentlerin tekstil kaplama endüstrisinde kullanımı ile ilgili çeşitli araştırmalar mevcuttur:

Rashid ve Mahlting (2018) yapmış oldukları bir çalışmada; inorganik etki pigment-binder sistemini sol-jel prosesi ile %100 pamuklu dokuma kumaşlara uygulamışlardır. Çözeltinin vizkozitesini sabit durumda tutmak için kıvamlaştırıcı ilave etmişlerdir. Çözeltinin dağılımını sağlamak için dispers ajanı kullanmışlardır. Pigment, binder, kıvamlaştırıcı, dispers ajanı ve inorganik kimyasallar temin edilerek, prosesi tamamlamışlardır. Kurutma işleminden sonra, refleksiyon ve transmisyon karakteristikleri spektrofotometre kullanılarak ölçmüşlerdir. Dalgaboyunun fonksiyonu olarak kaplamanın refleksiyon ve transmisyon değerlerini; inorganik efekt pigmenti ve bağlayıcı ile kaplanan pamuklu kumaşın optik özelliklerini geliştirmede kullanmışlardır. Bu çalışmanın bilime katkısı; inorganik efekt pigmentlerinin tekstil materyalinin optik özelliklerini geliştirmektir (Rashid ve Mahlting, 2018).

Mahlting vd. (2017) yaptıkları çalışmada; poliester kumaşlar için metal efektli pigmentler ve poliüretan bağlayıcı içeren kaplama sistemini geliştirmişlerdir. Çalışmalarında bakırdan yapılan metal pigmenti kullanmışlardır. Kullanılan metal pigment mikro ölçekli boyutta olup, anizotropik şekle sahiptir. Optik modifikasyon ve diğer fonksiyonel özellikleri göstermek için kullanmışlardır. Pigmentlerin tekstil yüzeyine sabitlemesi için poliüretan bağlayıcı gereklidir. Mevcut araştırmanın amacı; pigmenti tekstil yüzeyine bağlayıcı ile sabitlemektir. Bağlayıcı; bir nem giderme işleminin sonucu olarak pigment yüzeyinin üzerinde mikro yapıların oluşmasına yol açmıştır. Bu mikro yapı pigment yüzeyinin bilime katkısı; kaplama alanında su itici, antimikrobiyal ve antistatik özelliklerin iyileştirilmesi olmaktadır (Mahlting vd., 2017).

Manasoğlu vd. (2014) yaptıkları çalışmada; selüloz tozlarının tekstil kaplamacılığında dolgu maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ön işlem görmüş, %100 poliester dokuma kumaşa, bıçaklı kaplama tekniği kullanılarak selüloz tozları uygulanmıştır. Öncelikle, fiksaj sıcaklığının ve süresinin selüloz tozlarının sararma davranışı üzerine etkisi araştırılmış ve minimum sararmanın meydana geleceği optimum fiksaj şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Kaplamada kullanılan selüloz tozu konsantrasyonunun ve tanecik büyüklüğünün kaplanmış kumaş özellikleri üzerine etkisini araştırmak amacıyla, farklı konsantrasyon ve farklı tanecik boyutlarına sahip selüloz tozları ile kaplanan kumaşların çeşitli fiziksel özellikleri ile ses ve ısı yalıtım özellikleri değerlendirilmiştir. Selüloz tozları ile yapılan kaplamalar sonucunda özellikle orta ve yüksek frekanslarda poliester kumaşların ses yalıtım davranışının belirgin şekilde geliştiği ve genelde ısı iletkenlik değeri düşük kaplamaların elde edilebildiği görülmüştür. Bu çalışmanın bilime katkısı; kaplamada kullanılan polimerlerin ısı iletkenliği genellikle sıcaklıkla azalmaktadır. Isıl iletkenlik değeri düşük olan malzemeler; yalıtkan olarak kullanılmaktadır (Manasoğlu vd.,2014).

Topp K. vd. (2014) yaptıkları çalışmada; efekt pigmentleri kaplama ile çeşitli malzeme yüzeylerinin optik etkileri geliştirilmiştir. Metalik efekt pigmentleri; antimikrobiyal etkiler, elektriksel iletken kaplamalar ya da radyo dalgalarına karşı koruma özellik göstermiştir. Bu

makalede; metalik efektli pigmentlerin tekstil malzemeleri üzerine kaplanmasıyla yeni fonksiyonel tekstiller elde edilmiştir. Toplamda, dört farklı metalik etki pigmentleri incelenmiş, gümüş ve grafit pigmentlerle karşılaştırılmıştır. Bakır yada gümüş içeren efekt pigmentlerinin kaplama ile uygulanmasıyla *E.coli* ve *S.aureus*'a karşı önemli antibakteriyel özellikler elde edilmiştir. Radyo dalgalarına karşı etkili koruma sağlayan iletken tekstiller elde etmede bakır pigment içeren gümüş kaplama; en iyi özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada; geniş bir uygulama sunan fonksiyonel tekstiller elde etmek için etkili bir kaplama yöntemi geliştirilmiştir (Topp vd., 2014).

Rashid vd. (2019) yaptıkları çalışmada; pamuklu kumaşların optik fonksiyonelliğini geliştirmek için efekt pigmentleri pamuklu kumaşlara uygulanmıştır. Bu çalışmada; metalik efekt ve inci cilası pigmentleri kumaş üzerine kaplanarak optik özellikleri incelenmiştir. Efekt pigment ile tekstilin optik işlevselliği geliştirilmiştir. Bu çalışmanın bilime katkısı; efekt pigmentinin tekstil materyalinin optik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Rashid vd., 2019).

Özdemir ve Özgüney (2017) yaptıkları çalışmada; keskin mavi-yeşil renkli, oldukça sağlam, iki boyutlu 18 π -elektron konjuge sistemine sahip aromatik makrosiklik bileşikler olan ftalosiyanimler kullanılmıştır. Makro halka yapının merkezi koordinasyon boşluğuna; aromatik yapının periferik ve nonperiferik konumlarına ise çeşitli fonksiyonel süstitüentlerin bağlanmasıyla ftalosiyanimlere; katalitik, elektrokromik, elektriksel iletkenlik, fotovoltajik, fotoiletkenlik, ışık absorpsiyonu, foto uyarıcı gibi çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür. Geleneksel bakır ftalosiyanim pigmenti dışında ftalosiyanim türevlerinin de tekstil materyallerinin renklendirilmesinde kullanılmasıyla; farklı fonksiyonel özellikli (güç tutuşur, antibakteriyel...vs) teknik tekstillerin elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmanın bilime katkısı; ftalosiyanim türevi pigmentlerin tekstil materyalinin güç tutuşur, antibakteriyel işlevselliğinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Özdemir ve Özgüney,2017).

Özgüney vd. (2013) yaptıkları çalışmada; tetra periferik eugenol süstitüentli çinko ftalosiyanim sentezlenmiştir. Pigment öğütme işleminden sonra pamuklu kumaşlar pigment baskı yöntemiyle renklendirilmiştir. Elde edilen kumaşların antibakteriyel özellikleri, sürtme ve ışık haslıkları incelenmiştir. Basılan kumaşların *Staphylococcus aureus* bakterisine karşı etkili olduğu; *Klebsiella Pneumoniae* bakterisine karşı ise etkili olmadığı tespit edilmiştir. Genel olarak pigment baskıda elde edilen haslık değerlerden daha iyi yaş ve kuru sürtme haslığı değerleri elde edilmiştir. Işık haslığı değeri ise daha düşük ifade edilmiştir. Bu çalışmanın bilime katkısı; çinko ftalosiyanim pigmentinin tekstil materyalinin baskı yöntemine göre renklendirilerek, *S.aureus* bakterisine karşı antibakteriyel özellikler ile yaş ve kuru sürtme haslık değerlerinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Özgüney vd., 2013).

Güzel B.'nin (1989) yaptığı çalışmada; ülkemizde üretimi olmayan pigment boyarmaddelerden naftol ve naftol sülfonik asit türü pigmentlerin sentezlenmesi ve uygulanabilirlikleri incelenmiştir. Sentezlenen pigmentlerin toz haslıkları incelenmiş ve tekstil baskı boyamacılığında kullanılan pigmentler için verilen haslıklara benzer sonuçlar alınmıştır. Ayrıca sentezlenen pigmentler pamuk lifine uygulanarak, boyama özellikleri incelenmiş ve bazı haslık testleri yapılmıştır. Bu çalışmanın bilime katkısı; naftol ve naftol sülfonik asit türü pigmentlerin pamuklu mamüllerin boyanmasında kullanılarak, haslık özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Güzel,1989).

Bilgehan ve Serin (1993) yapmış oldukları bir çalışmada; iki aktif metilen grubu içeren N, N-bis(2,4-dimetoksi-5-klorofenil)- B, B-dioxo-1,4-benzen dipropan amid'e; 2-aminofenol, 2-amino benzoik asit, N, N-dietil-3- amino-4-metoksisülfonamid gibi değişik anilin türevleri ürünlerinin sentezini elde etmişlerdir. Elde edilen ürünlerin solvent haslıkları, tane büyüklükleri ve renk canlılıklarının istenilen standartlara uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Baskı tekniği ile pamuklu life uygulayarak, lif üzerine uygulanan testlerden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Diğer yandan

elementel analiz, IR, NMR, Uv-vis gibi spektroskopik tekniklerden yararlanılarak, yapının hidrazon formunun keto ve enol formlarında olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmanın bilime katkısı; keto ve enol formlarında anilin türevi ürünlerinin pamuklu life baskı tekniği ile uygulanarak, solvent haslıkları ile renk canlılıklarının geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Bilgehan ve Serin, 1993).

Sharma ve Biragi (2018) yapmış oldukları bir çalışmada; foto lüminesans pigmentlerin tekstil alanında ışık yayma eğiliminde olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada; foto lüminesans kavramı ve performansını etkileyen faktörler araştırılmaktadır. Bu makale tekstil alanında çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. Bu çalışmanın bilime katkısı; foto lüminesans renk yayan pigmentlerin akıllı tekstil alanında uygulanabilirliğini ifade etmektedir (Sharma ve Bairagi, 2018).

Soruç 'un (2017) yaptığı çalışmada; stor perdelik kumaş yapıları olmak üzere, tekstil bazlı kaplanmış malzemelerin kullanıldığı çadır, branda, tente, hafif çatı malzemeleri gibi güneş ışınlarına karşı korumanın/enerji tasarrufunun önemli olduğu farklı alanlarda pigmentlerin yakın kızılötesi (NIR) ışınları yansıtma davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla, farklı renklere sahip (siyah, sarı, mavi, yeşil ve kahverengi) organik pigmentlerin, demir oksit pigmentlerin ve kızılötesi yansıtıcı özel pigmentler; farklı konsantrasyon değerlerinde kullanılarak, güneş ışınlarını yansıtma (solar reflektans), absorblama ve geçirme (transmitans) özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın bilime katkısı; organik pigmentlerin tekstil kaplama alanında kullanılarak, güneş ışınlarına karşı koruma özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Soruç, 2017).

Miao vd (2015) yaptıkları çalışmada; ışık kontrollü kumaşların üretilmesi için radyo frekans (RF) magnetron püskürtme teknolojisi kullanılarak poliester kumaş üzerine Azo/Ag/Azo çok katmanlı filmleri uygulamışlardır. Bu çalışmada Azo/Ag/Azo kaplanmış poliester kumaşların yüzey morfolojisi, kristal yapısı, ıslanabilirliği, hava geçirgenliği, UV ışınım koruması, görünür bölge geçirgenliği ve kızılötesi özellikleri araştırılmıştır. Kaplama sonrasında %95 oranında infrared refleksiyon değeri, yaklaşık 91,5° temas açısı, 100 Pascalda 18ml/s/cm² hava geçirgenliği ve 35.01 UPF değeri elde etmişlerdir. Kaplama sonrasında özellikle infrared refleksiyon oranını arttırdığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmanın bilime katkısı; çok katmanlı Azo/Ag/Azo film kaplamanın tekstil materyalindeki su iticilik, hava geçirgenliği ve UV ışınım özelliklerinin geliştirilmesine katkısıdır (Miao vd., 2015).

Soumya vd (2016) yaptıkları çalışmada; siyah pamuklu kumaşlar üzerine silan ve nano ZnO hibrit kapsüllü PMMA kaplamalar uygulanarak, NIR yansıtma özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır. Kızılötesi ve morötesi enerji kalkanlama kaplamalar ile tekstil yüzeylerinin solar ısı koruyucu yüzeylerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu kolloidal hibrit polimer çözeltisi kumaş yüzeyi üzerine daldırma tekniği ile uygulanmıştır. Bu çalışmanın bilime katkısı; silan ve nano ZnO hibrit kapsüllü PMMA kaplamaların pamuklu kumaşların kalkanlama özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmasıdır (Soumya vd.,2016).

Yano vd (2006) yaptıkları çalışmada; FePc (COOH)₄ ile boyanmış liflerin, çeşitli protein esaslı allerjenleri (sedir, hamam böceği, uyuz böceği, tahıl tozları, kedi kaynaklı) üzerine adsorbe ettiğini kanıtlamıştır. Bu şekilde çalışmalarından yola çıkarak atopik hastalar için yıkayıp tekrar kullanılabilen, allerjenleri yakalayan (üzerine adsorbe edebilen) çeşitli tekstil ürünleri üretilebileceğini savunmuşlardır. Allerjen proteinlerdeki disülfid bağının allerjik etki yarattığı düşünülmektedir. Pc ise bu bağı bozmamakta fakat adsorbe edebilmektedir (Yano vd.,2006).

Kobayashi vd (2010) yaptıkları çalışmada; merserize edilmiş ve edilmemiş örme kumaşları, bakır içerikli C.I Reactive Blue 71 ve C.I Reactive Blue 237 ile boyamıştır. C.I Reactive Blue 71 (Kayacion Turquoise E-NA) turkuaz renkli yapısı açıklanmamış ftalosiyanın yapıları boyarmadadır. Çalışmada pamuklu kumaşlara sırasıyla bakır (II) sülfat çözeltisi ile ön

mordanlama, boyama ve yine bakır (II) sülfat çözeltisi son mordanlama işlemi uygulanmıştır. Sadece ön mordanlanmış, mordanlanıp boyanmış ve son mordanlanmış boyalı mercerize ve mercerize olmayan kumaşların; etantiyol maddesine karşı koku giderici özellikleri ve *Staphylococcus aureus* bakterisine karşı antibakteriyel etkileri incelenmiştir (Kobayashi vd., 2010).

Gül vd (2011) yaptıkları çalışmada; iki değerlikli metal tuzlarının Zn(II), Co(II), Ni(II), Cu(II) varlığında, 4- (karboksimetilsülfonil)ftalonitril başlangıç maddesinin siklotetramerizasyonu ile dört periferel tiyoglikolik asit grupları içeren metallsiz ve metalli ftalosiyanimler hazırlanmıştır. Hazırlanan yeni bileşikler IR, UV-Vis, kütle spektrumları ve ¹³C-NMR ve ¹H-NMR ile karakterize edilmiştir. Hazırlanan suda çözünür metalloftalosiyanim türevleri ile katyonik pamuklu kumaş çektirme yöntemine göre boyanmıştır. Boyanan kumaşın su ve yıkama haslıkları incelenmiştir. Bakır, nikel ve kobalt içerikli ftalosiyanimler ile boyanan numunelerde homojen, etkili bir boyama elde edilmiştir. Haslık sonuçları da kullanım açısından yeterli çıkmıştır. Çalışmanın, özellikle hava temizleyici materyallerin üretimi gibi alanlarda; heterojen ftalosiyanim katalizatörlerinin tekstil endüstrisinde kullanımına yönelik gelecekte yapılacak çalışmalara yararlı olacağı vurgulanmıştır (Gül vd., 2011).

Hao vd (2012) yaptıkları çalışmada; polimerik dispergir madde ile ham sübstitüentsiz mavi bakır ftalosiyanimi mikro-jet öğütme metoduna (mikrofluidizer ile) göre öğütürerek, partikül boyut dağılımı 80 nm olacak şekilde nanoskala pigment süspansiyonu hazırlamıştır. Nanoboyutlu hazırlanan pigmentlerin katyonize edilmiş pamuklu kumaş üzerine adsorbsiyon özellikleri incelenmiştir. Katyonize kumaş çektirme yöntemine göre pigment çözeltisiyle işleme sokulup, daha sonra binder çözeltisi içine sokulmuştur. Sürtme ve yıkama haslık değerleri ile renk verimi (K/S) değerleri incelenmiştir. Öğütme sonucu iyi dispersiyon stabilitesi sağlanmıştır. Boyama sırasında, banyoya eklenen tuz miktarı arttıkça, pH derecesi (6-9) arttırıldıkça ve sıcaklık arttıkça, pigment adsorbsiyonu azalmıştır. Pigment konsantrasyonu arttıkça renk verimi değerleri artarken, yıkama ve sürtme haslığı değerleri azalmıştır. Reaktif boya ile kıyaslandığında elde edilen sürtme haslığı değerleri daha düşüktür. Genel olarak bakıldığında, birçok endüstriyel uygulama açısından kabul edilebilir haslık değerleri elde edilmiştir (Hao vd.,2012).

Özdemir vd (2016) yaptıkları çalışmada; azo grupları içeren suda çözünebilen çinko ftalosiyanim (Şekil 13) ile çektirme yöntemine göre boyanmış pamuklu kumaşın; boyanma özelliklerini (K/S, L, a*, b*, C*, h* değerleri), renk haslık değerlerini (ışık, su, ter, klorlanmış su, sürtme, yıkama) ve antibakteriyel aktivitesini incelemiştir. Farklı konsantrasyonlarda yapılan boyamalar sonucunda homojen yeşil boyalı yüzeyler elde edilmiştir. Boya konsantrasyonu arttıkça renk verimi artmıştır. Boyanan kumaşların *Staphylococcus aureus* ve *Klebsiella Pneumoniae* bakterisine karşı oldukça etkili olduğu görülmüştür. Su, yıkama, kuru sürtme ve ter haslığı değerleri iyi derecededir. Işık haslığı değerleri kötü, yağ sürtme haslığı ve klor haslığı değerleri ise orta derecededir. Geliştirilen kumaşın gelecekte askeriye, koruyucu giysiler ve özellikle medikal tekstillerde kullanılabilceği vurgulanmıştır (Özdemir vd., 2016).

Ağar vd (2003) yaptıkları çalışmada; bazı ftalosiyanim ve polimerik ftalosiyanim komplekslerinin yedi farklı bakteri (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecalis*, *Morexella catarrhalis*, *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae* ve *Pseudomonas aeruginosa*) ve iki maya (*Candida Albicans* ve *Candida tropicalis*) türüne karşı agar disk metoduna göre antimikrobiyal etkinliklerini incelemiştir. Onbeş farklı ftalosiyanim kompleksinin değişik seviyelerde bir veya daha fazla bakteriye karşı antimikrobiyal etki gösterdiği gözlenmiştir. İki ftalosiyanim tipinin *Staphylococcus aureus* bakterisine karşı, onbeş ftalosiyanim kompleksinin *Morexella catarrhalis* bakterisine karşı ve bir ftalosiyanim kompleksinin ise *Pseudomonas aeruginosa* bakterisine karşı etkili olduğu gözlenmiştir. Genellikle en yüksek antibakteriyel aktivite çinko metal iyonu içeren ftalosiyanim komplekslerinde saptanmıştır (Ağar vd.,2003).

Moinuddin vd (2012) yaptıkları çalışmada; simetrik sübstitüentli 2, 9, 16, 23-tetrafeniliminofthalosiyanın metal bakır (II), kobalt (II), nikel (II) ve çinko (II) komplekslerinin sentezi (Şekil 14), karakterizasyonu ve antimikrobiyal özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirmiştir (Moinuddin vd., 2012).

Kalhotka vd (2012) yaptıkları çalışmada; seçtikleri, suda çözünür periferel sübstitüentli on iki farklı ftalosiyanın türevinin antimikrobiyal etkisini incelemiştir. Alüminyum ve çinko merkez atomlu yapılar sentezlenmiştir. Çalışmanın amacı; geniş spektrumlu antimikrobiyal etkiye sahip katyonik suda çözünür ftalosiyanınlar hazırlamaktır. Sentezlenen ftalosiyanınlar *Escherichia coli* 3988 (Gram negatif), *Enterococcus faecalis* CCM 4224 (Gram pozitif) ve *Pseudomonas aeruginosa* CCM 1960 (Gram negatif) bakterilerine karşı antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda alınan ftalosiyanın türevleri, bakterilerle karıştırılarak çözeltiler hazırlanmıştır. Numune çözeltiler yapay ışık altında, oda sıcaklığında, belirli sürede karıştırılmıştır. Daha sonra petri kaplarında uygun besi ortamına aşılınmış ve oluşan koloniler sayılmıştır. Sonuçlar CFU/ml cinsinden (CFU: Koloni oluşturan birim) ifade edilmiştir. Sonuç olarak; gram negatif bakterilerin seçilmiş ftalosiyanınlere karşı daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Negatif ve nötr ftalosiyanınlar, gram pozitif bakteri üzerinde etkili iken katyonik esaslı ftalosiyanınlar her iki grup üzerinde de etkilidir. Kuaterner amin sübstitüentli çinko metalloftalosiyanın ve üre türevli sübstitüent içeren alüminyum metalloftalosiyanınlarının yüksek antimikrobiyal aktiviteye sahip oldukları görülmüştür (Kalhotka vd., 2012).

3.İNORGANİK VE ORGANİK PİGMENTLERİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Kumaş boyama için sentetik boyaların üretimi ve kullanımı günümüzde büyük bir endüstri alanına sahiptir. Kükürt, naftol boyları, nitratlar, asetik asit, sabunlar, enzimler, krom bileşikler, bakır, arsenik, kurşun, kadmiyum, civa, nikel, kobalt ve bazı yardımcı kimyasallar gibi ağır metallerin varlığı toplu olarak tekstil atıklarını zehirli hale getirmektedir. Boya ve boya dumanlarına uzun süre ya da yüksek oranda maruz kalmak; baş ağrısına, alerjiye, astım reaksiyonlarına neden olmakta; cildi, gözleri ve solunum yollarını tahriş etmektedir. Boyalardan kaynaklanan en önemli çevresel etki, uçucu organik maddenin salınmasıdır.

Organik pigmentlerin bazıları alerjik reaksiyonlara neden olmaktadır. Kimyasal ayrışma ve dolayısıyla organik pigmentlerden küçük moleküler toksinlerin salınması; risk faktörü olarak algılanmaktadır. Kurşun; boyada önemli sağlık ve çevre sorunlarına yol açtığından kullanımı yasaklanmıştır.

İnorganik pigmentler; kristal yapıları nedeniyle toksikolojik olarak nötr maddelerdir. Bu yaklaşım, inorganik pigmentlerin bileşimini ve parçacık boyutunu içermektedir. Günümüzde pigmentlerin yerini almak için çevre dostu inorganik pigmentler geliştirilmiştir. Cd, Co, Cr, Hg, Pb gibi elementler toksiktir. Sağlık ve çevre için tehlikeli olan elementler ise; Sb ve Se'dir. Günümüzde sarı inorganik pigmentlerin çoğu kadmiyum, kurşun, krom (IV), yani zararlı olabilecek ağır metal inorganik kimyasalların çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri ve kullanımı bazı ülkelerde yasaklanmıştır (Mahltig vd,2016; Faulkner ve Schwartz,2009; Kumari vd,2009). En yaygın kullanılan inorganik pigment; titanyum dioksittir. Yüksek örtme (yüksek kırılma indisi) özelliği nedeniyle matlaştırma maddesi olarak kullanılmaktadır.

TiO₂ nano partiküllerine inhalasyon maruziyeti; bağışıklık tepkilerine ve nöro toksik etkilere neden olmaktadır. Titanyumun gecikmiş aşırı duyarlılığının ve oksitleri yüksek duyarlılığı olan bireyler için bir sağlık riski oluşturabilmektedir (Sargeant ve Goswami,2007; Hallab vd.,2001). Nano boyutlu TiO₂ ile aynı özellikleri istenmeyen, zararlı etkilerle ilişkili olabilmekte ve bazı yararlı uygulamalar için kullanılabilir. TiO₂ pigmentleri cildi veya mukoza zarlarını tahriş

etmemektedir. Titanyum dioksit veya başka bir pigment, pigment tozunun solunmasından kaçınılması gerekmektedir. Titanyum dioksitlerin; sudaki çözünürlükleri oldukça sınırlı olmaktadır.

Çinko iyonları organizma üzerine etki etmektedir. Büyük miktarlarda çözünür çinko; toksik olmaktadır. Bununla birlikte, insan vücudu 2 g. çinko içermekte ve metabolik süreçler için günlük miktarlarda 10 ila 20 mg gerekmektedir. Çinko sülfür pigmentleri, ağır metal bileşikleriyle bulaşma olmadıkça toksik değildir. Akut toksisite göstermezler. Pigment tozunun solunması mekanik solunum yolu başlangıcına neden olabilmektedir. Cilt veya gözlerle temas, mekanik sürtünme ile tahrişe neden olabilmektedir (Sargeant ve Goswami,2007; Hallab vd., 2001).

4. SONUÇ

Pigmentlerin tekstil materyaline uygulanması gittikçe artmaktadır. Çeşitli organik ve inorganik pigment türlerinin tekstil materyalleriyle kombine edilmesi farklı özelliklerde ürünlerin üretimini sağlayabilmektedir. Pigmentlerin tekstil materyallerine uygulanması ile ilgili incelenen çalışmalardan da görüldüğü gibi, değişik pigment kombinasyonları ve farklı yapıda çok çeşitli pigment türlerinin sahip olduğu özellikler, renklendirilme işlemiyle (boyama, baskı ve kaplama yöntemleri ile) tekstil materyallerine farklı fonksiyonel özellikler (optik, su itici, antimikrobiyal, antistatik, ses ve ısı yalıtım, antibakteriyel, elektriksel iletkenlik, ısıl iletkenlik, radyo dalgalarına karşı koruma, hava geçirgenlik, UV ışınım koruma) kazandırılabilir. Bu fonksiyonel özellikler yanında; yaş-kuru sürtme, solvent ve de renk haslık özellikleri de geliştirilebilir.

Ftalosiyaninler tıp alanındaki birçok çalışmada kullanılan önemli bir kimyasal bileşiktir. Bu alanlardan en önemlisi ise kanserin fotodinamik tedavisinde (PDT) de ftalosiyanin bileşiklerinden yararlanılmaktadır.

Pigmentlerin tekstil materyaline kazandırmış olduğu fonksiyonel özellikler yanında; biyolojik etkileri (vücuttaki etkisi) Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Pigmentlerin Biyolojik Etkileri (Vücuttaki Etkileri)

Pigment Çeşidi	Biyolojik Etkisi (Vücuttaki Etkisi)	Kaynak
Berilyum oksit (inorganik pigment)	Granuloma	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Kadmiyum oksit	Tahriş, sistematik zehir	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Demir oksit	Fibrozis Birikme (akciğerlerde)	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Nikel oksit	Tahriş, kanser	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Titanyum dioksit	Solunumla akciğerlere ulaşmalarına rağmen akciğerlerde fonksiyonel bozukluk yapmayan tozlar	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Çinko oksit	Solunumla akciğerlere ulaşmalarına rağmen akciğerlerde fonksiyonel bozukluk yapmayan tozlar	Parmeggiani Dr.L.(Ed),1983
Ftalosiyanin (Çinko ve alüminyum türevlerinin fotodinamik	Mide bulantısı, kusma, saç dökülmesi, halsizlik gibi birçok yan etkisi bulunmaktadır.	(Prasad,2003; Zheng,2005; Patrice,2003)

kanser tedavisinde kullanılması sayılabilir)		
Kurşun molibdat	Yüksek miktarda ve tekrarlanarak alınan kurşun, ağızda metalik tat, mide ağrısı, kusma ve diyareden başlayan; sinir sistemi hasarına bağlı intoksikasyon, koma, solunum durması ve hatta ölüme kadar uzayan sonuçlar doğurabilir. Kurşunun klinik önemi kan hücreleri ve sinir hücrelerindeki kronik etkilerinden kaynaklanmaktadır. Önemli bir enzim inhibitörü olarak hücrelere geçen kurşun, selenyum ve sülfür içeren enzimlerin antioksidan etkinlik göstermesini engellemektedir.	(Grandjean,1992; Göker,1996)
Kurşun kromat	Kurşun bir nevi nörotoksindir ve anormal beyin ve sinir sistemi fonksiyonlarına sebep olmaktadır. Çocuklar üzerinde yapılan araştırmalarda kanda kurşun miktarı arttıkça IQ seviyesinin düştüğü tespit edilmiştir.	(Baldwin vd.,1999)

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Ağar, E., Karaoğlu, A.Ş., Şaşmaz, S., (2003), “Antimicrobial Activities of Some Phthalocyanine Derivatives”. Journal of Faculty of Pharmacy of Gazi University, 20(2), 79-86.

Baldwin, D.R., Marshall, W.J., (1999), “Heavy Metal Poisoning and Its Laboratory Investigation” (Review Article), Annals of Clinical Biochemistry, 36, 267-300.

Bilgehan, G., Serin S., (1993), “Benzendipropanamid Türevi Organik Pigment Sentezi ve Tekstilde Kullanımı”, IX Kimya ve Kimya Mühendisliği Sempozyumu, 20-24 Eylül, Trabzon.

Faulkner, E.B., Schwartz, R.J., (edt.) (2009), “High Performance Pigments”, 2nd ed. Weinheim: Wiley.

Göker, Ş., (1996), İstanbul Çocuklarında Kan Kurşun Taraması, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Uzmanlık Tezi, İstanbul.

Grandjean, P., (1992), Health Significance of Metals-Lead. Maxcy-Rosenau-Last Buc-blic Health and Preventive Medicine Ed: Last JM, Wallace.

Gül, A., Sevim, A.M., Ilgün, C., (2011), “Preparation of Heterogeneous Phthalocyanine Catalysts by Cotton Fabric Dyeing”. Dyes and Pigments, 89, 162-168.

Güzel, B., (1989), “Pigment Boya Sentezi ve Tekstilde Kullanımı”, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

- Hallab, N., Merritt, K., Jacobs, J.,** (2001), “Metal Sensitivity in Patients with Orthopaedic Implants”, *J Bone Joint Surg Am*, 83, 428-36.
- Hao, L., Wang, R., Liu, J., Cai, Y., Liu, R.,** (2012), “Investigating The Adsorption Performance of Nanoscale Pigment on Cationized Cotton Substrate”. *Powder Technology*, 222, 176-181.
- Herbst, W., Hunger, K.,** (2004), “Industrial Organic Pigments,” Third edition, Wiley-VCH, Weinheim.
- Kalhotka, L., Hrdinova, Z., Korinkova, R., Prichastalova, J., Konecna, M., Kubac, L., Lev, J.,** (2012), “Test of Phthalocyanines Antimicrobial Activity”. 2012 Nanocon, Brno, Czech Republic, EU.
- Kobayashi, Y., Kosaka, K., Nakanishi, T.,** (2010), “Deodorizing and Antibacterial Abilities of Knitted Cotton Fabrics Mordant Dyed with Reactive Dyes and Copper (II) Sulfate”. *Textile Research Journal*, 80(3), 271-278.
- Kumari, L.S., Rao, P.P., Koshy, P.,** (2009), “Red Pigments Based on CeO₂-MO₂-Pr 6O11 (M = Zr and Sn): Solid Solutions for The Coloration of Plastics,” *Journal of the American Ceramic Society*, 93, 1402-1408.
- Kurbanova, R., Mirzaoglu, R., Ahmedova, G., Şeker, R., Özcan, E.,** (1998), “Boya ve Tekstil Kimyası ve Teknolojisi,” Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yayınları., 34, 1-102.
- Lewis, P.,** (1988), *Pigment Handbook*, volume 3, (2nd edition), Wiley, New York.
- Linden, H., Rutzen, H., Wegemund, B.,** (1978), *Process for Dispersing Pigments and Fillers Using Ammonoalkanol and Salt, Alkoxylation and Quaternization Derivatives Thereof*, 930,229, Henkel.
- Mahltig, B., Zhang, J., Huth, M., Fahmi, A.,** (2017), “Microstructuring of Metal Effect Pigments in Functional Coatings on Textile Substrate”, *The Journal of The Textile Institute*, 108(4), 538-542.
- Mahltig, B., Zhang, J., Wu, L., Darko, D., Wendt, M.,** (2016), “Effect Pigments for Textile Coating: a Review of The Broad Range of Advantageous Functionalization,” *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 35-55.
- Maile, F.J., Pfaff, G., Reynders, P.,** (2005), “Effect Pigments - Past, Present and Future,” *Progress in Organic Coatings*., 54(3), 150-163.
- Manasoğlu, G.,** (2014), “Selüloz Tozlarının Tekstil Kaplamacılığında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Miao, D., Jiang, S., Zhao, H., Shang, S., Zhu, P.,** (2015), “Fabrication of High Infrared Reflective Azo/Ag/AzO Films on Polyester Fabrics,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(2), 1198-1204.
- Moinuddin, K.M.H., Venugopala, R.K.R., Keshavayya, J.,** (2012), (Bobbarala V.A.) *Synthesis, Spectral, Magnetic, Thermal and Antimicrobial Studies on Symmetrically Substituted, Search for Antibacterial Agents*, *InTech*, 305-318.

Özdemir, P., Özgüney, A., (2017), “Ftalosiyanın Esaslı Boyarmaddelerin Kimyasal Yapıları ve Fonksiyonel Tekstillerin Üretiminde Kullanımı”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi, 23(7), 809-817.

Özdemir Saral, P., Özgüney, A.T., Kaya Kantar, G., Şaşmaz, S., Seventekin, N., (2016), “An Investigation of Fastness and Antibacterial Properties of Cotton Fabric Coloured with Water-Soluble Zinc Phthalocyanine Containing Azo Groups”. Tekstil ve Konfeksiyon, 26(1), 92-99.

Özgüney, A.T., Kantar, C., Saral Özdemir, P., Seventekin, N., Şaşmaz, S., (2013), “Investigation of Fastness Properties and Antibacterial Effect of Metallophthalocyanine (M:Zn) Containing Eugenol Printed on Cotton Fabric,” Tekstil ve Konfeksiyon, 23(2), (2013), 261-266.

Parmeggiani, L., (Edt), (1983), Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, International Labour Office, Volume I., Third Ed., Ceneva

Parys, M.V., (1994), “Coating,” Eurotex, Germeen schapsonderwijs-CTL-Gent, Belgium.

Patrice, T., (2003), Comprehensive Series in Photochemistry and Photobiology Vol2, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK,

Pfaff, G., (2008), “Special Effect Pigments Technical Basics and Applications,” Vincentz Network GmbH & Co KG.

Pfaff, P.G., Kieser, M., Maile, F.J., Weitzel, J., (2009), “Special Effect Pigments: Technical Basics and Application,” Hannoprint, Germany.

Rashid, M., Mahltig, B., (2018), “Inorganic Effect Pigment-Binder System following Sol-Gel Process-Application for Optical Textile Functionalization”, Journal of Fashion Technology& Textile Engineering, 6(3), 1-6.

Rashid, M., Mahltig, B., Mamun, K., (2019), “Surface Modification of Cotton Fabric with Effect Pigment-A Review of Improved Textile Optical Functionalization”, International Journal of Textile Science, 8(1),10-15.

Roberts, A.G., (1968), “Organic Coatings:Properties, Selection and Use,” Building Science Series 7, Washington.

Sargeant, A., Goswami, T., (2007), “Paper VI – Ion Concentrations”, Mater Design, 28, 155-171.

Sekar, N., (2013), “Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles,” Woodhead Publishing Series in Textiles, 26,46.

Sharma, R., Bairagi, N., (2018), “The Role of Photoluminescent Pigments in Textiles”, Trends in Textile Engineering&Fashion Technology, 2(2), 164-167.

Soruç, S., (2017), “Kızılötesi (IR) Işımları Yansıtan Kaplamalı Kumaş Yapılarının Geliştirilmesi”, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.

Soumya, S., Kumar, S.N., Mohamed, A.P., Ananthakumar, S., (2016), “Silanated Nano ZnO Hybrid Embedded PMMA Polymer Coatings on Cotton Fabrics for Near-IR Reflective, Antifungal Cool-Textiles,” New Journal of Chemistry, 40(8), 7210-7221.

Speight, J., (2017), “Endüstriyel İnorganik Kimya,” Mühendisler için Çevresel İnorganik Kimya.

Topp, K., Haase, H., Degen, C., Illing, G., Mahltig, B., (2014), “Coatings with Metallic Effect Pigments for Antimicrobial and Conductive Coating of Textiles with Electromagnetic Shielding Properties”, *J.Coat. Technology Res.*, 11(6), 943-957.

Wyplosz, N., (2003), “Laser Desorption Mass Spectrometric Studies of Artists’ Organic Pigments,” Citation for Published Version (APA), 2003.

Yano, H., Sugihara, Y., Shirai, H., Wagatsuma, Y., Kusada, O., Matsuda, T., Kuroda, S., Higaki, S., (2006), “Phthalocyanine-Dyed Fibers Adsorb Allergenic Proteins”. *Amino Acids*, 30, 303-305.

Yazhini, K., Prabus, H., (2015), “Polymer Metal Oxide Composites on Textile Applications,” *Journal of Environmental and Applied Bioresearch.*, 3(1), 28.

Zheng, H., (2005), A Review of Progress in Clinical Photodynamic Therapy, *Technol Cancer Res Treat.* 4(3), 283–293.