



2013

Metrobüslerde Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulanması ile Verimlilik Artışı Fizibilite Çalışması



Okan Üniversitesi OKAN ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL

İÇİNDEKİLER

1- Yönetici Özeti.....	3
2- Proje Tanıtımı.....	5
2.1 Özet ve anahtar kelimeler.....	5
2.2 İngilizce özet ve anahtar kelimeler.....	6
2.3 Proje amacı ve Hedefler.....	6
3- Tanıtım ve Gerekçe.....	8
3.1- Metrobüs hattı tanıtımı.....	8
3.2- Metrobüs hattında iyileştirilmesi gereken noktalar.....	12
3.3- Literatür araştırması.....	18
3.4- Tavsiye edilen olası yöntemler ve özgün yön.....	27
4- Olası Hedeflerin Tesbiti.....	37
4.1- Kapasite artışı.....	37
4.2- Yakıt sarfiyatında azalma.....	50
4.3- Karbon salımında azalma.....	58
4.4- Olası iş gücü kazancı.....	58
5- İş paketleri tanıtımı.....	61
6- İş Zaman Çizelgesi.....	65
7- Bütçe Öngörüsü ve Yatırımların Açıklaması.....	67
8- Olası Proje Ortakları.....	68
9- Ekonomik Kazanç.....	69
10-Teşekkür.....	69
11-Referanslar.....	69

ÖNSÖZ

İstanbul Metrobüs Sistemi Beylikdüzü'nden Söğütlüçeşme'ye kadar eski E-5 karayolu güzergahı üzerinde, önemli yerleşim birimlerini ve Avrupa ile Anadolu yakasını birleştiren, bir toplu taşıma sistemidir. Günde yaklaşık 700,000 yolcu taşıyarak, İstanbul'un toplu taşıma sistemi içinde önemli bir yeri vardır. Fakat, özellikle zirve saatlerdeki aşırı talep, yolculuk konforunu önemli derecede bozmaktadır.

Metro ve hafif raylı sistemlerin, metrobüse göre daha fazla yolcu taşıyabileceği bilinen bir gerçektir. Metrobüs sistemi üzerindeki otobüsler, otonom konvoy şeklinde, kısa aralıklar ile birbirini takip ederlerse, duraklara aynı anda yanaşıp, kapılarını aynı anda açar ve kapatırlarsa ve metroya benzeyen iyi bir yönetim ve haberleşme sistemi ile desteklenirse, metro avantajlarının bir kısmı, mevcut sisteme aktarılabilir ve kapasite önemli ölçüde artırılabilir. Bu fikir araştırmacılarımızdan geldiği zaman konuyu incelediğimizde çok disiplinli bir takıma ihtiyaç olacağını gördük. Otomotiv, ulaştırma, mekatronik, bilgi teknolojileri, elektronik, haberleşme, optimizasyon uzmanları birlikte çalışmalıydı. Okan Üniversitesi "Ulaşım Teknolojileri ve Akıllı Otomotiv Sistemleri Araştırma Merkezi"(UTAS) çok disiplinli uzmanların birlikte çalıştığı bu konu için ideal bir yerd. UTAS'ta geliştirilen otonom araç ve haberleşen araçlara yönelik bilgi birikimi de bu konuda çalışma başlatmak için çok önemli bir başlangıç noktası idi. Bu nedenle bu önemli konuda UTAS tarafından bir fizibilite yapılması kararlaştırıldı. Bu fizibilite çalışması aşağıda isimleri soyadı sırasına göre belirtilen araştırmacılar tarafından çok disiplinli bir çalışma sonucu gerçekleştirildi.

Prof.Dr. Tevfik Akgün
Prof.Dr. Orhan Alankuş(Proje Koordinatörü)
Yrd. Doç.Dr. Selim Dünder
Prof. Dr Güngör Evren
Arş. Görevlisi Şafak Güner
Prof. Dr. Levent Güvenç
Arş. Görevlisi Zeynel Koç
Prof.Dr. Ümit Özgüner
Yrd.Doç.Dr. Başar Özkan
Prof.Dr. Nejat Tuncay
Prof.Dr. Enar Tunç

Fizibilite çalışmasına destek veren İstanbul Kalkınma Ajansına desteklerinden ötürü teşekkür ederiz. Ayrıca Proje çalışmaları sırasında İETT İşletme Planlama Müdürü Sayın Köksal Altunkaynak ve İETT Ulaşım Planlama Daire Başkanlığı metrobüs danışmanı Sayın Büşra Buran'ın metrobüs hattı bilgilendirme destekleri, yön göstermeleri ve hızlı iletişimleri için teşekkür ederiz.

Prof. Dr. Nejat Tuncay

UTAS Başkanı

1. YÖNETİCİ ÖZETİ

Ulaşım türleri özellikle kapasite açısından karşılaştırıldığında metro ve hafif raylı sistemler en uygun sonucu vermektedir(şekil 3.1 , [13]). Metrobüsün saatte 15,000-30,000 düzeyinde yolcu taşımada etkin olduğu, daha üst seviyelerde metro ve hafif raylı sistemlerin ön plana çıktığı görülmektedir. Buna karşılık metrobüs sistemlerinin hızlı devreye alınması ve ilk yatırım maliyeti açısından avantajları vardır. Metro ve hafif raylı sistemlerin avantajları ise şu şekilde sayılabilir,

- Daha fazla sayıda aynı anda hareket eden vagonla yolcu kapasitesinde artış
- Aynı anda açılıp, kapanan kapılar ile yolcu iniş biniş hız artışı
- Sabit kapı pozisyonları ve platform ile aynı hızda duruş ile biniş kolaylığı
- Bilgilendirme ve yönetim sistemi
- Dış hava şartlarından etkilenmeyen sabit hız profili
- Aktif sinyalizasyon sistemi

Önerilen proje metrobüs hattında otobüslerin otonom konvoy halinde, ideal hız profilleri ile yol almasını ve duraklarda her zaman belirli pozisyonlarda durarak, kapıların aynı anda açılıp, kapanmasını sağlamaya yöneliktir. Aynı zamanda projede metro yönetim sistemine benzer bir yönetim ve bilgilendirme sistemi öngörülmektedir. Böylece bu sistem yukarıda belirtilen metro avantajlarının büyük çoğunluğunu yapabilecek durumda olacaktır. Dış hava şartları ve yol durumunu kontrol ederek, güvenli takip mesafesi ve ideal hız ve frenleme profilini dinamik olarak hesaplayabilecektir.

Beylikdüzü- Söğütluçeşme Metrobüs hattı 51 km uzunluğunda, 45 duraktan oluşan, günde yaklaşık 700,000 kişiyi taşıyan İstanbul'un önemli bir ulaşım koridoru olan eski E-5'e paralel, dünyanın en çok yolcu taşıyan metrobüs hatlarından birisidir. İstanbul trafiğinin durumu, ve hattın önemli bir güzergahı kapsamı her geçen gün yolcu sayısını arttırmakta ve özellikle yoğun akşam ve sabah saatlerinde sıklıkla ve yolcu memnuniyetsizliğine yol açmaktadır. Hatta ve platformlara ulaşım da bir diğer sorundur. Ayrıca hat üzerinde sollama olanağı olmaması, arızalı araç durumunda önemli tıkanıklara neden olmaktadır. Bu sorunları çözümlenmeye yönelik olarak projede aşağıdaki çalışmaların yapılması planlanmaktadır,

- Mevcut araçlar ve yönetim kontrol sistemi ayrıntılı incelenmesi
- Yönetim kontrol sistemi için bilgi toplama sistemleri, optimizasyon, simülasyon ve yönetim kontrol sistemi programı hazırlanması
- Otobüslerde otonom ve haberleşen araç alt yapısının oluşturulması
 - Gaz ve fren sisteminin elektriksel kontrol edilebilir hale getirilmesi

- Araçlara birbirleri ile haberleşebilen sistemin hazırlanması, uyarı mesajlarının verilmesi, fren ve gaz sistemine komut verebilir hale getirilmesi
- Duraklara yanaşma ve doğru yerde durma sinyalizasyon sistemi hazırlanması
- İdeal hızlanma ve yavaşlama bilgilerinin dinamik olarak hesaplanması
- Direksiyona otomatik kumanda projenin daha sonraki aşamalarında ele alınacaktır.
- Ön araç bilgisi duyargalarının araçlara adaptasyonu ve ilgili yazılımın hazırlanması
- Komple sistem yazılımı hazırlanması ve simülasyon yapılması
- Kapıların aynı anda açılma ve kapanma sistemleri kurulması
- Metrobüs koridoru akıllı ulaşımına uygun hale getirilmesi
 - Duraklarda yanaşma ve kapı pozisyonlarına yönelik duyargaların yerleştirilmesi
 - Duraklarda gerekli uyarı sistemlerinin ve bilgi sistemlerinin hazırlanması
 - Araçlara yağış durumu ve yol durumu bilgisi veren duyargaların hazırlanması
- Araçlar arası ve araçlarla merkezi sistem arasında kablosuz haberleşme protokolü oluşturulması
- Sistemin içinde yer alacak metrobüs sürücüleri iyi bir eğitimle bilgilendirilmesi
- Prototip araçların hazırlanması ve aşamalı yol testleri yapılması
- Yolcular yeni sistem hakkında bilgilendirilmesi
- Yeni alınacak metrobüs araçları için teknik parametrelerin çıkartılması

Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilecek kazançlar fizibilite çalışması süresince yaklaşık olarak hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır,

- Yakıt Sarfiyatı kazancı: yakıt sarfiyatı kazancının yapılan simülasyon sonuçlarına göre yaklaşık % 5 civarında olacağı tahmin edilmektedir. . Bu bir senede 45 milyon km yol katedildiği göz önüne alındığında, yaklaşık 1 milyon litre yani yaklaşık 4 milyon TL lik bir kazanç karşılık gelmektedir.
- Karbon Emisyon Kazancı: Senelik yaklaşık 3,000 ton'luk bir kazanç olacaktır..
- İşçilik Kazancı: Sistem yalnız konvoyun en önündeki araçta şoför ile çalıştırılabildiğinde, sürücü sayısı yarıya veya üçte bire inebilir. Ayrıca yolcuların ulaşım süresinin kısılması da, genel olarak günlük toplam kazancı önemli ölçüde arttırmaktadır.

- **Kapasite Artışı:** Hesaplar en az % 45 kapasite artışı ortaya koymaktadır. Bu kapasite metro kapasitelerine oldukça yaklaşmaktadır. Benzer bir kapasiteli sistemi oluşturmanın maliyeti oldukça fazladır.

Projenin ARGE çalışmaları için üç aşama öngörülmüştür. İlk aşama 24 ayı kapsamakta ve kısa sürede devreye alınabilecek özellikler devreye alınarak, genel verimliliği arttırma hedeflenmektedir. 36 aya kadar olan ikinci aşamada araçlar konvoy halinde birbirini takip edecek özelliklere ulaşabilmektedir. 48 aya uzayan son aşamada da direksiyon sistemi de otonom hale getirilerek, istendiği takdirde konvoyun ilk aracı hariç, sürücü sayısının azaltılmasına imkan verilecektir.

Bu proje de ARGE maliyetleri tahmini olarak çıkartılmıştır. ARGE çalışmaları sonrası geliştirilen ürünler daha sonra hattaki tüm araçlar ve duraklara uygulanmalı ve yönetim sistemi kurulmalıdır. Yukarıda belirtilen kazançlar ve özellikle kapasite kazancı, böyle bir yatırımı rahatlıkla karşılayabilecek bir düzeydedir.

2. PROJE TANITIMI

2.1 Özet ve Anahtar Kelimeler

Metrobüs hattı İstanbul için önemli ve vazgeçilemez bir toplu ulaşım sistemi haline gelmiştir ve aynı zamanda birçok uluslararası toplantılarda da övgü ile söz edilmektedir. Yalnız hattın özellikle yoğun saatlere yönelik olarak konforu ve güvenliği açısından sorunları oldukça açıktır.

Bu sorunların önemli bir kısmı metro sistemi mantığı ile çalışan otonom araçlar ve bir optimizasyon algoritması kullanan merkezi yönetim sistemi ile çözülebilir. Bu sistemin yerli teknolojiler ile geliştirilmesi, sorun halinde müdahalesini kolaylaştıracak, iyileştirmeye veya yeni hatlara yönelik çalışma yapılmasına imkân sağlayacaktır. Aynı zamanda bu önemli konuda ülkemizde teknoloji geliştirilmiş olacaktır. Metro mantığı ile otobüslerin ideal şartlarda hızlanıp, yavaşlayarak konvoy halinde hareket etmeleri ve durmaları, kapılarını aynı anda açma ve kapamaları önemli bir kapasite iyileştirmesi getirecektir. Diğer yandan araç duruş ve kalkışlarının azaltılması, konvoy sistemi ile hareket, ideal hızlanma ve frenleme araçların yakıt sarfiyatını ve karbon salımını da iyileştirecektir.

Bir diğer sorun da şerit sayısı nedeni ile arızalı araçların sollaranamamasıdır. Araçlar arasında haberleşme sistemi ve dinamik sinyalizasyon koyarak durak harici şeritlerde arızalı araçların sollarınasına imkân tanınabilir. Bu şekilde sıkışıklıklar azaltılabilir.

Metro sistemlerinin ve hafif raylı sistemlerin bir farkı hava şartlarından etkilenmemesidir. Hazırlanacak sistem hava koşullarına göre hız şartlarını dinamik olarak ayarlayabilmelidir. Bu şekilde farklı hava ve yol koşullarına en uygun hızlanma ve frenleme eğrileri ve güvenli takip aralığı sağlanabilecektir.

Anahtar kelimeler: metrobüs sistemi, otonom araçlar, konvoy otobüs sistemleri, metrobüs yönetim sistemi optimizasyonu

2.2 Summary and Key Words

Metrobus Line has become an important and irreplaceable public transport system for Istanbul. It has also been quoted positively in most public transport conferences. However, the comfort and security problems especially in peak hours are quite obvious.

Most of the comfort and capacity problems can be resolved by using an autonomous convoy system working similar to metro system and by using a central management system using dynamic optimization algorithms. Developing these systems with local technologies and knowhow will be beneficial giving the fast intervention possibility in case of problems, and possible extensions and improvements and for new applications. Also local technology will be developed in such an important area. Having the busses accelerate and decelerate in optimum conditions, following each other at optimum distance, stopping, opening and closing the doors at the same time, in metro-like operation will help to increase the capacity, to decrease fuel consumption and carbon emission.

Another problem about the line is the restriction of overpassing creating bottle necks in case of a break down in one of the busses. Intra-bus dynamic communication systems would allow safe surpassing of the vehicles except on the bus stops, eliminating congestion and delays.

Another advantage of metro and light rail systems is the minimum effect of adverse air conditions such as rain, snow and ice. In this system, the acceleration, deceleration profiles, the maximum speed and the distance between vehicles will be automatically adjusted according to the road conditions.

Keywords: metrobüs system, autonomous vehicles, bus convoy systems, metrobüs management system optimization

2.3 Amaç ve Hedefler

Ulaşım ve Erişilebilirlik İstanbul Bölge Planı 2010-2013 raporunda yer alan stratejik gelişme alanlarından birisidir ve İstanbul için gerçekten çok önemlidir. Beylikdüzü'nden Söğütluçeşme'ye uzanan metrobüs hattı bu anlamda önemli bir görevi yerine getirmektedir. Aynı zamanda özel araçların yerini alarak ve hızlı ve verimli ulaşım sayesinde CO₂ emisyonunun azalmasına da olumlu katkıları bulunmaktadır.

Fakat artık metrobüs hattı oluşan aşırı talep ile ciddi bir yoğunluğa ulaşmıştır. Sabah ve akşam saatlerinde konforlu bir ulaşım sağlayamamaktadır. Bu konuda ilgili

kuruluşlar ve Büyükşehir Belediyesi de arayış içindedir ve sistemi iyileştirmeye çalışmaktadır.

Bilindiği gibi aslında metro sistemleri en fazla yolcu taşıma kapasitesine ve hıza sahip ulaşım sistemidir. Fakat yatırım maliyeti metrobüse göre daha fazladır, gerçekleştirilmesi daha uzun vakit almaktadır. Bu aşamada mevcut metrobüs hattını metroya çevirmeye imkân yoktur. Metro sistemlerinin hızlı ve kapasitesi fazla olmasını sağlayan faktörler hız, arka arkaya çok sayıda vagon, aynı anda açılıp kapanan ve aynı pozisyonda duran kapılar ile hızlı biniş, iniş olanağı, çok sayıda geniş kapı olarak sayılabilir.

Gelişen teknoloji ile metrobüs hattında çalışan otobüsleri gerçek bir metro gibi çalıştırma olanağı vardır ve yukarıda belirtilen metro özelliklerinin bir kısmı sağlanabilir durumdadır. Otonom ve birbirleri ile haberleşen çift körüklü otobüsler ile otobüsler arka arkaya metrolarda olduğu gibi vagonlar halinde aynı anda hareket edebilir ve fren yapabilir duruma getirilebilecektir. Yalnızca öndeki araçta metrolarda olduğu gibi sürücü bulunması yeterli olacaktır. Ayrıca otobüsler aynı pozisyonda duracak, kapılar aynı anda açılıp kapanacaktır. Bu şekilde metrobüs hattının kapasitesi önemli ölçüde artacaktır.

Bu projenin amacı, otonom ve birbirleri ile haberleşen çift körüklü otobüsler arka arkaya metrolarda olduğu gibi vagonlar halinde aynı anda hareket edebilir ve fren yapabilir duruma getirmek ve bu şekilde İstanbul Bölgesi'ndeki, ulaşım ve erişilebilirlik gelişim eksenine olumlu katkıda bulunmak, çevre kirliliğine olumlu katkı sağlamak ve dünya içinde yeni olan böyle bir konuda ARGE projesi başlatarak, bölgedeki yenilikçi ve katma değerli ürün geliştirme çalışmalarına katkıda bulunmaktır. Bu proje sırasında tüm yeni teknolojiler yerli firmalar ile geliştirilecek, böylece akıllı ulaşım teknolojilerine dönük, elektronik ve yazılım uygulamalarında ülkemizde bilgi oluşturulacak ve ihracat olanakları sağlanacaktır.

Bu projede İstanbul Beylikdüzü-Söğütluçeşme metrobüs hattında aşağıdaki iyileştirmelerin sağlanması hedeflenmektedir,

- 1- Sabah ve akşam yoğun saatlerde kapasitenin %20-30 arasında arttırılması
- 2- Yakıt sarfiyatının % 5-10 oranında iyileştirilmesi
- 3- Karbon salımının % 5-10 oranında azaltılması
- 4- İsteğe bağlı olarak sürücü sayısı azaltılması
- 5- Yolcu konforu iyileştirilmesi
- 6- Arıza gibi acil durumlarda aktif araçlar arası haberleşme sistemi ile sıkışıklık azaltılması

Aşağıda belirtilen hedeflerin tahmin şekilleri ve ulaşma yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

3. TANITIM VE GEREKÇE

3.1 Metrobüs Hattı Tanıtımı

İstanbul'un toplu ulaşım sisteminde yeni bir dönemi başlatan Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattı Beylikdüzü'nden başlayarak büyükşehir alanını doğu-batı yönünde kat eden O-3 (eski E-5) Karayolu ve Boğaziçi Köprüsü üzerinden Anadolu Yakasında O-1 üzerinden Söğütlüçeşme demiryolu istasyonuna kadar uzanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün standartlarına göre inşa edilmiş ve çevre alanlara bağlantıları sağlanmış toplam 51 km uzunluğundaki koridor üzerinde tüm yerleşim alanı kat edilmektedir. Koridor çok sayıdaki konut alanının yakınından geçmekte, birçok yan koridorla kesişerek aktarma olanağı sağlamakta, Avcılar, Mecidiyeköy ve Zincirlikuyu gibi önemli iş merkezlerine ulaşmaktadır.

Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattının ilk aşaması olan 18,3 kilometrelik Avcılar-Topkapı kesimi 17 Eylül 2007 de açılarak önceden 67 dakika olan Topkapı-Avcılar arasındaki yolculuk süresini 22 dakikaya indirmiştir. İkinci aşama olan Topkapı-Zincirlikuyu (10,7 km) bölümü 8 Eylül 2008 tarihinde, üçüncü aşaması olan Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme kesimi (13,3 km) 3 Mart 2009, hattın dördüncü aşaması olan Avcılar-Beylikdüzü bölümü (9,7 km) ise 16 Temmuz 2012 tarihinde işletmeye açılmıştır. Ana koridorlarda zirve saatlerde 10-15 km/saat düzeyine düşen ortalama ticari hızlara karşılık metrobüs hattında 25 km/saat ortalamasında bir ticari hız sürdürülebilmektedir.

Beylikdüzü-Söğütlüçeşme Metrobüs Hattı kenti bir uçtan diğer uca kat eden, Boğaz geçişi dışında trafikten fiziksel engellerle ayrılmış 51 km uzunluğunda tekil bir toplu taşıma koridorudur ve bir şebeke niteliği yoktur (**Foto-3.1**). İki şeritli, ortadaki durak platformlarına yaya üst geçitleriyle erişilen bu hatta taşıtların sağda bulunan kapılarının kullanılabilmesi için genel trafiğin tersine soldan giden trafik düzeni ile işletilmektedir (**Foto-3.2**).

Bu hatta Boğaziçi Köprüsü dışında hiçbir kesimde sollama şeridi bulunmamaktadır. İki şerit arasındaki ayırımın yalnız çizgi ile gerçekleştirilmesi nedeniyle, durak geçişleri dışında bir otobüsün karşı yöndeki şeridi kullanarak önündeki arızalı bir aracı veya bir engeli sollayabilmesi mümkün olmakta ancak ticari işletmede otobüslerin diğer araçları sollamasına izni verilmemektedir. Diğer taraftan, arızalı aracın sollanması da büyük risk taşımaktadır. Bu projede haberleşen araç sistemi kurulması ve dinamik sinyal sistemi ile karşıdan gelen araca bilgi verilerek, emniyetli geçişin sağlanması planlanmaktadır. Hattın farklı altyapı geometrik ve fiziki özellikleri bakımından, Beylikdüzü-Zincirlikuyu ve Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme olarak iki kesimde değerlendirilmesi gerekmektedir.

3.1.1 Hattın Fiziksel Özellikleri

Beylikdüzü-Zincirlikuyu Metrobüs Hattı Kesimi: İlk iki aşama ile birlikte son eklenen dördüncü aşamayı oluşturan 40 km uzunluğundaki bu hat kesiminde toplam 37 durak bulunmaktadır. Bu kesimde durak aralıkları ortalama 1.060 metredir.

Fotoğraf-3.1 İstanbul Metrobüs Hattı Genel Düzenlemesi
(<http://www.metrobusblogu.com>)



Fotoğraf-3.2 İstanbul Metrobüs Durağı
(<http://www.wowturkey.com>)



Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme Hat Kesimi: Toplam 11,5 km uzunluğunda olan bu hat kesimi 2009 Mart'ında işletmeye açılmıştır. Sekiz durağa sahip olan bu kesimde, durak aralıkları ortalama 1.437 metredir. Boğaz Köprüsü geçişindeki karışık trafik içindeki kesim haricinde otobüslerin güzergâhı çelik halatlı bariyerlerle diğer trafikten ayrılmıştır.

3.1.1 Durakların Özellikleri

Beylikdüzü, Söğütlüçeşme, Avcılar, Zincirlikuyu ve Beylerbeyi durakları dışında orta peronlu duraklar kullanılmaktadır. Bu duraklar ve Topkapı durağında dönüş köprüleri mevcuttur. Platformlar, eşzamanlı olarak 26 m uzunluğunda iki, 18 m uzunluğunda üç otobüsün yanaşabileceği şekilde düzenlenmiştir. Duraklarda sollama olanağı bulunmamaktadır. Optimizasyon çalışmalarında bu sollama kısıtı dikkate alınacaktır.

Platform ve taşıt döşemeleri genel olarak aynı düzeydedir. Araçların yanaşma pozisyonu doğru ayarlandığında iniş biniş kolaylığı ve güvenliği ile birlikte daha hızlı ve ergonomik iniş biniş sağlanabilmektedir. Ancak sürücüler duraktan açıkta durduklarında araçlardan iniş ve binişler zorlaşmakta ve güvensizleşmektedir. Yapılacak çalışma sayesinde, taşıtlar durak alanında önceden belirlenmiş noktalarda duracaklar, bu da güvenliği arttıracaktır.

Peronların üstü genelde kapalıdır, fakat yine de yolcuların olumsuz hava şartlarından etkilenmemesini tam olarak sağlayamamaktadır. Bu proje çerçevesinden bakılınca bu detay kapsam dışı olacaktır.

Diğer yandan duraklarda otobüslere ilişkin anlık yolcu bilgilendirmesi, güvenliği artıran cam kaplamalar ve kayan kapılar, güvenlik kameraları bulunmaması, projenin verimli çalışması açısından sorun oluşturabilir. Bu nedenle özellikle anlık yolcu bilgilendirmesi, güvenlik kameraları proje çerçevesinde tavsiye edilecektir.

3.1.2 Ödeme Teknolojisi

Ödeme genel olarak platformlara giriş öncesinde Akbil ve elektronik kart ile yapılmaktadır. Platformlara girişler üç kollu bariyerler vasıtası ile olmaktadır. Durakların çoğunda giriş ve çıkışlar için ayrı turnikeler kullanılmadığı için yoğun yolcu olan saatlerde sıkışıklık yaşanabilmektedir. Giriş ve çıkış turnikeleri kullanılarak, platformdaki yolcu sayısı tahmin edilebilir ve gönderilecek araç sayısı programlamasında dikkate alınabilir.

3.1.3 Duraklara Erişim (Alt ve Üst Geçitler, Merdivenler ve Asansörler)

Metrobüs durakları, karayolu hattı boyunca yolun orta eksenine konuşlandırılmıştır. Bu nedenle yolcular duraklar ulaşmak için alt ve üst geçitleri, rampaları ve merdivenleri kullanmak zorundadır. Metrobüsün geçtiği hat, önceden karayolu araçlarının kullanması için tasarlanmış bir hat olduğu ve yeni tasarlanmakta olan bir hat olmadığı için, çevresinde çeşitli türden yapılar bulunmaktadır. Bu yapıların bulunması nedeniyle de yolcuların kullanmak zorunda kaldıkları alt ve üst geçitler,

rampalar ve merdivenler kimi yerlerde yeterli boyutlarda oluşturulamamıştır. Yolcu talebinin zirve yaptığı saatlerde bu elemanların kapasitesi çoğunlukla yetersiz gelmektedir (**Foto-3.3**). Pek çok durakta engelli yolcuların erişimini kolaylaştıracak rampa ve/veya asansörler mevcut değildir. Özellikle engelli yolcuların erişimini kolaylaştıracak geometrik çözümler üzerinde durulması önem taşımaktadır.

Fotoğraf-3.3 Giriş ve Çıkış İçin Kullanılan Yetersiz Merdivenler

(<http://www.metrobusblogu.com>)



3.1.4 Park Et-Bin (Park-and-Ride) Tesisleri

Metrobüsün geçtiği koridor boyunca, farklı kapasitelerde park et-bin tesisleri bulunmaktadır. İSPARK tarafından işletilen bu tesisler, metrobüs hattını kullanmayı tercih edecek araç sahibi yolcuların özel araçlarıyla metrobüs güzergahına dahil olmasını engellemekte ve trafik yükünü kısmen de olsa hafifletmektedir. Yakın gelecekte park et-bin tesislerinin sayı ve kapasitelerinin artırılması hedeflenmektedir.

3.2. Metrobüs Hattında İyileştirilmesi Gereken Noktalar ve Darboğazlar

Beylikdüzü-Söğütlüçeşme Metrobüs Projesi mevcut bir karayolu aksı üzerinde çeşitli fiziksel düzenlemeler yapılarak hayata geçirilmiş bir projedir. Bu nedenle sıfırdan oluşturulan bir sisteme nazaran çeşitli sorunları da bünyesinde barındırması kaçınılmaz olmaktadır. Buna karşın, özellikle ülke çapında yenilikçi bir proje olması sayesinde büyük bir yolcu talebini kendisine çekmiştir. Bu sayede, bir günde İstanbul şehrinde faaliyet gösteren raylı sistemlerin toplamından daha fazla yolcu taşıyan bir alt sistem haline gelmiştir. Metrobüs sisteminin daha da faydalı hale getirilebilmesi de ancak sistemdeki sorunların doğru bir biçimde tanımlanması ve bu sorunlara gerçekçi

çözümler sunmakla mümkün olabilir. Bu kapsamda metrobüs hattında karşılaşılan çeşitli sorunlar ve darboğazlar incelenmiştir.

3.2.1 Planlama Sorunları

Metrobüs taşıtlarının üzerinde çalıştığı hat, bu amaçla tasarlanmadığı, metrobüs sistemi mevcut bir hat üzerine sonradan eklenmek zorunda kaldığı için bir takım yapısal kısıtlarla karşılaşmıştır. Bu kısıtlar da özellikle bir kent içi toplu taşıma sistemi olan metrobüsün, bir otoyol özelliği taşıyan, erişim kontrollü bir karayolu üzerine oturtulması nedeniyle ortaya çıkmıştır.

Metrobüs Koridorunun Fonksiyonel Uyumu: Bir kent içi toplu taşıma sistemi olan metrobüs, yayaların erişimini kolaylıkla ve güvenli bir biçimde sağlayacak şekilde tasarlanmış olmalıdır. Oysa ki metrobüs hattının üzerinde bulunduğu D100 karayolu, taşıtların yüksek hızlarla hareketlerine imkan verecek şekilde tasarlanmış erişim kontrollü bir karayolu olarak tasarlanmıştır. Dolayısıyla çevresindeki kentsel alanlardan gelecek yayaların sisteme erişimi kolay olmamaktadır.

Metrobüs Duraklarına Erişim: Metrobüs hattı mevcut bir erişim kontrollü karayolu hattı üzerine oturtulduğu için, durakların yer seçimi konusunda önemli kısıtlarla karşılaşmıştır. Aynı zamanda yayaların inşa edilen duraklara erişimi de bu sebepten kolaylıkla sağlanamamaktadır.

Diğer Ulaşım Sistemleriyle Bütünleşme: Bir kent içi ulaşım sistemi, ne kadar iyi tasarlanmış olursa olsun, kendi başına ulaşım sorunlarının çözümünde önemli bir etkinlik sağlayamaz. Bütüncül bir yaklaşım ile bir bölgenin ulaşım sistemini, farklı sistemlerin birbirleriyle bütünleşik halde çalışabilecekleri şekilde tasarlamak, pek çok ulaşım problemine kesin çözümler sağlamaktadır. Bu kapsamda, metrobüs sistemine yayaların erişiminin yanı sıra, otomobil, minibüs, otobüs ve raylı sistem gibi diğer ulaştırma sistemleriyle de erişim çoğunlukla kolay olmamaktadır. Bunun yanı sıra, bütüncül yaklaşımla metrobüs sistemine erişimi sağlamak gibi bir fonksiyona sahip olması gereken otobüs sisteminin bazı hatları bu koridor üzerinde kısmen de olsa metrobüs ile paralel hareket etmekte, dolayısıyla bir rekabet ortamı içerisinde bulunmaktadır.

Boğaziçi Köprüsü Geçişi: Boğaz Köprülerine zirve saatlerde kapasitesinin çok üzerinde araç talebi gelmektedir. Bu da trafik yoğunluğunu arttırmakta, işletme hızı düşmekte ve önemli oranlarda gecikmelere yol açmaktadır. Boğaz köprülerinin her bir şeridinden bir saatte en fazla 1800-2000 taşıt geçebilmektedir. Bu taşıtların tamamının tam dolu otomobillerden oluşması halinde dahi bir şeritten taşınabilecek yolcu sayısı en fazla 10000 kişidir. Öte yandan metrobüs sistemi ile saatte 26000 yolcu tek yönde hizmet alabilmektedir. Buna karşın metrobüs Boğaziçi Köprüsü'ne

yaklaştığında motorlu taşıt trafiği içerisine dahil olmakta ve köprüyü geçtikten belirli bir mesafe sonra tekrar yalnızca kendine ait bir yol üzerinde hareketine devam etmektedir. Özellikle zirve saatlerde Boğaziçi Köprüsü yaklaşımında ve üzerindeki trafik yoğunluğu metrobüsün hareketini de etkilemekte, dolayısıyla kapasitesini ciddi oranda azaltabilmektedir. Bu nedenle, Boğaziçi Köprüsü geçişi esnasında metrobüs sisteminin diğer karayolu taşıtlarının trafiğinden dinamik şerit uyarısı sistemleri ile ayrılması verimliliğini önemli ölçüde arttıracaktır.

Yolcu Talebinin Duraklara Dağılımı: Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattı mevcut bir yüksek standartlı bir kentler arası karayolu üzerinde planlandığı için şehrin ana cazibe merkezlerine doğrudan erişimi bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu cazibe merkezlerine mesafesi yakın olan duraklar birer önemli aktarma noktası işlevi görmektedir. Bu da, bazı duraklardaki yolculuk talebinin diğer duraklara kıyasla çok daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu sayede yüksek yolculuk talebine (yolcu iniş ve binış sayıları) sahip olan duraklar metrobüs sisteminin kapasitesini belirleyen kritik noktalar haline dönüşmektedir.

Yolculuk talebinin hat üzerindeki duraklara dengesiz dağılmış olması nedeniyle, bazı duraklar türler arası bir aktarma merkezi görevi görmekte ve metrobüs hattı dışında kalan bazı cazibe merkezlerine doğru yapılan aktarmaların yükünü de taşımaktadır. Dolayısıyla aktarmalar nedeniyle oluşan ilave yolcu yükünün duraklar arasında daha dengeli dağıtılması, durak kapasitelerinin daha etkin kullanımını sağlayacaktır.

Toplu Ulaşım Arzu Hatlarına Uyum: Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattının önemli kesiminin kentin eski “çevre yolu” olarak tanımlanan D100 ve O1 karayolları üzerine yerleştirilmiş olması nedeniyle hat şehrin ana cazibe merkezlerinden uzaklaşmakta ve dolayısıyla güzergâh toplu ulaşım arzu hatları ile uyuşmamaktadır. Şehrin önemli cazibe merkezleri metrobüs güzergâhından tamamen ayrı koridorlarda bulunmaktadır. Şehrin geleneksel yerleşim alanlarının ve merkez koridorunun dışından geçen metrobüs hattı bir nokta dışında kentin ana cazibe merkezlerine erişemediğinden bu merkezlere ulaşmak isteyen diğer tüm toplu ulaşım yolculuklarının aktarmalı olarak yapılması gerekmektedir. Yolculuk taleplerinin en yüksek olduğu duraklar bu aktarmaların yapıldığı noktalarıdır.

Eski çevre yolu üzerine yerleştirilen metrobüs hattı, şehir merkezlerine erişimi hedefleyen toplu ulaşım arzu hatları ile uyumlu olmamakta, ancak özellikle karayolu trafiğinde büyük tıkanıklıkların yaşandığı zirve saatlerde, mesafe olarak daha uzun olmasına karşılık daha hızlı bir ulaşım olanağı sağlamaktadır.

3.2.2 Altyapı Tasarım Sorunları

Durak Yer Seçimi: Metrobüs araçlarının üzerinde çalıştığı hat eski çevre yolu ortasında bulunan bir şeridin yalnızca metrobüs araçlarına tahsis edilmesiyle

oluşturulmuştur. Dolayısıyla sistemin yolcularının duraklara erişimlerinde çeşitli güçlükler bulunmaktadır. Bu güçlüklerin önemli bir nedeni de durakların yer seçiminden kaynaklanmaktadır. Mevcut bir yol üzerindeki uygun noktalara yerleştirilmiş durakların birçoğuna yaya erişimi zorlukla sağlanmakta ve duraklar en yakın konut ya da iş merkezlerine yürüme mesafesi içerisinde bulunmamaktadır. Bu tür durakların yer seçimleri ve çevresindeki arazinin kullanım deseni gözden geçirilmelidir.

Durak Tasarım Sorunları: Metrobüs sistemi koridoru boyunca diğer karayolu trafiğinden bariyerlerle ayrılmış iki şeride sahip olmakta, duraklarda şeritler birbirlerinden ayrılarak orta platformlu duraklar oluşturmaktadır. Durakların pek çoğuna erişebilmek için önce yolun iki tarafındaki merdivenlerle üst geçide çıkılmakta ve tekrar merdivenlerle orta platforma inilmektedir. Yol üzerinde durak tasarımı için yeterli genişlik bulunmadığından merdiven ve rampa gibi duraklara erişim elemanları birçok yerde standartların altında kalmaktadır.

Durak Merdivenleri ve Rampaları: Duraklarda yolun her iki kenarından üst geçitlere ve üst geçitlerden platformlara ulaşmayı sağlayan merdivenler ve rampaların pek çoğu yolculuk talebi karşısında yetersiz kalmış ve bu nedenle yenilenmiş ve genişletilmiştir. Yüksek yolcu talebinin yarattığı sorunlar merdivenlerin genişletilmesinin yanı sıra iniş ve çıkışların birbirinden ayrılması ile karşılanmaya çalışılmıştır.

Bazı duraklardaki yolcu talebine cevap verebilmek için inen ve binen yolcular için ayrı merdivenler düzenlenmiştir. Ancak bunu sağlayabilmek için iki ayrı üst geçit inşa edilmesi gerekirken tek üst geçit kullanılmış (örneğin Şirinevler Durağı) ve bu da otobüslerin aynı durakta yolcu indirmek ve almak için ayrı ayrı durmasını gerektirmiştir. Bu da zaman kaybına ve otobüslerin katarlaşmasına sebep olmaktadır.

Durak Platformları: Orta platform uygulamasının bir sonucu olarak her iki yöne giden ve her iki yönden gelen otobüslerin yolcuları aynı platform üzerinde karşılaşmakta, bu da yaya hareketlerini özellikle zirve saatlerde önemli ölçüde kısıtlayabilmektedir. Özellikle aktarma yapılan duraklarda yolculuk talepleri yoğun olduğunda bu durakların fiziki yapıları standartların çok altında kalmakta, yaya hareketlerinin akışkanlığı ve yolcu güvenliği tam olarak sağlanamamaktadır.

Durakların Dış Etkenlerden Korunması: Duraklar yolcular için hava koşullarından yeterli koruma sağlayamamakta; yolcular yağmur, soğuk ve kardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca karayolu trafiğinin ortasındaki duraklarda bekleyen yolcular diğer taşıtların sıçrattığı sulardan ıslanmaktadır.

Fiziksel Ayrım: Metrobüs hattı diğer karayolu trafiğinden yalnızca çelik halatlardan oluşan bir bariyer ile ayrılmaktadır. Motorlu taşıt sürücüleri araç kontrollerini

kaybettiklerinde bu bariyerleri aşmakta ve yüksek hızlarla karşı yönlerden gelen taşıtlarla otobüsler karşılıklı çarpışabilmektedir. Bunun yanı sıra, çelik bariyerler motosiklet sürücüleri için de büyük risk taşıyan bir bariyer türüdür. Meydana gelen trafik kazalarında, motosiklet sürücüleri araçlarından düştükten sonra kayarak çelik halatlara çarptığında ölümcül etkilerle karşılaşabilmektedir. Bu nedenle hat boyunca daha güvenli bir fiziksel ayırım kullanılması daha olumlu olacaktır.

Üst Geçitler: Pek çok noktada tahmin edilenin üzerinde talep nedeni ile düşük standartlarla inşa edilen üst geçitler özellikle zirve saatlerdeki yolcu talebi karşısında yetersiz kalmaktadır. Yaya üst geçitlerinin bir kısmı yeniden inşa edilerek genişletilmiş olmasına karşılık pek çoğu halen yolculuk talebini karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

3.2.3 İşletme Sorunları

Düzensiz Sefer Aralıkları: Özellikle zirve saatlerde yolculuk talebinin karşılanabilmesi amacıyla başlangıç duraklarından kaldırılan taşıtların sefer aralıkları 15-20 saniyeye kadar düşebilmektedir. Ancak altmış saniyenin altındaki sefer aralıklarında düzenli bir işletme sağlanamamakta, duraklardaki yolcu iniş ve binişlerinin farklılaşması sebebiyle bu aralıklar bozulmakta ve araçlar katarlaşmaktadır. Zirve saatlerde 6-10 otobüslük katarlaşmalar görülebilmektedir. Her katarlaşma, bu katarın öncesinde ve sonrasında sefer aralıklarının düzensizleşmesine neden olmaktadır. Herhangi bir aksaklıkta küçük sefer aralıkları sebebiyle çok kısa sürede katarlaşmalar ve tıkanıklıklar oluşmakta, bu tıkanmalar kısa sürede koridorun tamamına yayılmaktadır.

Özellikle zirve saatlerde duraklardaki yolcu yığılmaları sebebiyle yolcular otobüslere binememekte, otobüsler duraklarda gereğinden daha uzun süre durmak zorunda kalmakta ve bu da otobüslerin gecikmesine ve katarlaşmasına bir diğer sebep olmaktadır. Boş olarak ilerideki duraklarda bekleyenler için gönderilen otobüsler de hat boyunca sollama imkanı olmaması nedeniyle dolu otobüslerin arkasında beklemek zorunda kalmaktadır. Gerçekleştirilecek çalışma ile seferlerin sabit aralıklarla yapılmasının sağlanması, taşıt kapılarının açılma yerlerinin önceden bilinmesi sayesinde yolcu binişlerinin hızlanması ve gecikmelerin azaltılması hedeflenmektedir.

İşletme Politikaları: Hattın her bir yönde yalnızca tek şeride sahip olması ve sollama imkanının bulunmaması nedeniyle, ekspres ya da durak atlamalı işletmecilik gibi farklı işletme politikalarının uygulaması mümkün olmamaktadır. Sefer sıklığının 20-30 saniye düzeylerine indiği bir işletme şeklinde sollama yapılması durumunda bile düzenli sefer aralıklarının korunması mümkün olmayacaktır. Geliştirilecek çalışma

sayesinde, yolcu yoğunlukları ve duraklardaki fiziksel olanaklar da dikkate alınarak daha yüksek kapasite ve düzenli aralıkların sağlanabileceği birbirini otonom takip eden otobüslerden oluşan katarlar oluşturulması hedeflenmektedir.

Sefer Sayıları: Sabah zirvesi öncesinde yolculuk talebinin çok üzerinde bir kapasite sunan sefer sayıları, talepteki keskin zirve nedeniyle sabah zirvesinde yetersiz kalmakta ve iki saat süren zirve süresince çeşitli sorunlar yaşanmaktadır.

Zirvenin sonrası saatlerde benzer şekilde talepten fazla kapasite sunan seferler, saat 18.00'deki akşam zirvesine kadar taleple uyumlu bir sayıdadır. Keskin akşam zirvesinde yetersiz kalan sefer sayıları saat 19.00'dan sonra yine yolculuk talebinin üzerinde kapasite sunmaktadır. Yolcu binişleri ve sefer sayılarının dağılımındaki bu uyumsuzluklar metrobüs tarifelerinin yeniden düzenlenmesi ile bir ölçüde giderilebilecektir. Buna karşın yolculuk talebindeki keskin ve kısa zirveler işletme verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Güvenlik: Metrobüs şeritlerinin karayolu trafiğinden çelik halatlı bariyerlerle ayrılması herhangi bir kaza anında yeterli korumayı sağlayamadığı için hem karayolu trafiğinin hem de metrobüs trafiğinin aksamasına neden olabilmektedir. Herhangi bir kaza sonrasında sollama olanağı bulunmaması nedeniyle çok kısa bir sürede her iki yönde de otobüsler birikmekte, çok sayıda otobüsten oluşan katar yüzünden işletme uzun süre aksamakta, yolculara hizmet sunulamamakta, yolcular altı şeritlik bir otoyolun ortasında yürümek zorunda kalmaktadırlar.

Yol eksenini boyunca diğer karayolu taşıtlarının trafiğinden daha az şerit alınması amacıyla orta peronların kullanılması ve bunun sonucu olarak otobüslerin diğer trafiğe göre ters yönde gitmeleri zorunluluğu metrobüs hattı ve karayolu trafiği arasındaki çelik halatlardan oluşan bariyerler birleşince ciddi ve ölümcül riskler doğurmaktadır.

Arıza ve Acil Durum: Metrobüs durak enkesitlerinin boyut kısıtları nedeniyle duraklarda sollama imkânı bulunmadığı için duraklarda oluşan bir kaza, arıza ya da acil durum hattın büyük ölçüde kapanmasına ve işletmenin durmasına yol açabilmektedir. Benzer şekilde bir otobüsün duraklar arasında arızalanması halinde karşı şerit kullanılarak sollama yapılabilse de karşı yönlerden gelen araçların sıklığı nedeniyle işletmede önemli sorunlar yaşanabilmektedir. Arızalanan araçların kısa sürede kaldırılabilmesi ve şeritlerin tekrar işletmeye açılabilmesi için hattın uygun kesimlerinde çekiciler bekletilmekte olsa da bu çekiciler kısa sürede etkin çözümler sağlayamamaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilecek bir metrobüs yönetim sistemi ile acil durumlarda etkili işletme kararları alınabilmesi hedeflenmektedir.

3.2.4 Taşıt Sorunları

Mevcut metrobüs hattında hizmet veren üç tip otobüs bulunmaktadır. Metrobüs hattında kullanılmak üzere neden bu otobüs çeşitlerinin seçildiğine ilişkin teknik bir bilgi bulunmamaktadır. Aralarında uzunlukları, genişlikleri, yükseklikleri, dönüş yapabilecekleri en küçük karp yarıçapları, kapı konumları ve sayıları, kapasiteleri ve estetik özellikleri açısından tam bir uyum bulunmamaktadır.

Üç tip otobüsten ilki Mercedes-Benz marka Citaro modeli otobüs olup, metrobüse özgü bir otobüs değildir. İkinci tip Phileas marka otobüsler yüksek kapasitelerine ve daha az kirletici salınımlarına karşılık, yüksek yolcu hacimleri altında beklenen performansı gösteremediğinden ve sık arızalandıklarından dolayı ağırlıkla zirve saatlerdeki yolcu hacimlerinin karşılanmasında düşük eğimli hatlarda kullanılabilir. Üçüncü tip olan CapaCity en fazla sayıda bulunan otobüs olduğundan sistemin otobüsü olarak düşünülebilir. Bu durum, bütüncül bir yaklaşım ile sistemin altyapı ve otobüslerin birbiriyle uyumlu olarak tasarılanmamasından kaynaklanmaktadır. Otobüslerin ülkemizdeki genel trafik kuralının aksine soldan ve yandaki trafik akımına karşı seyretmeleri diğer karayolu trafiğindeki taşıtlarla kafa kafaya çarpışmalarına neden olabilmektedir.

Otobüslerin tümü alçak döşemelidir, bu nedenle oturma yeri kapasitesi bir miktar azalmakta, bunun yanı sıra bazı koltuk konumları yolculuk konforuna pek uygun olmamaktadır.

Orta peronlu duraklar kapıları yalnızca sağ tarafta bulunan Citaro ve CapaCity model otobüslerin genel trafik kurallarının ve sürücülerin alışkanlıklarının aksine soldan seyretmelerini zorunlu kılmaktadır. Bu da güvenlik açısından önemli sakıncalar doğurmaktadır.

Günümüzde çevre duyarlılığı ve çevre kirlenmesinde ulaştırmanın önemli payı bilinen bir gerçektir. Bu nedenle metrobüs otobüslerinin hava kirlenmesine katkıları önemle değerlendirilmesi gereken bir husustur. Bu bağlamda, Phileas'ın Euro 4 niteliğinde olmasına karşın diğer iki otobüsün Euro 3 olmalarının çevreye etkileri açısından karşılaştırılmasında yarar bulunmaktadır. **Tablo-3.1**'de Euro 3, Euro 4 ve Euro 5 taşıtlarının gaz salınımları (gr/yolcu-km olarak) görülmektedir. Tablodaki değerlere göre, Euro 4, Euro 3'e göre, CO, HC, NO_x salınımında %30, partikülde %80 ve duman için %37.5 oranında iyileşme sağlamaktadır. Euro 5 ise özellikle NO_x salınımını Euro 3'e göre %60 oranında azaltmaktadır.

Tablo-3.1 Euro Standartlarına Göre Kirletici Düzeyleri

Motor	CO	HC	NO _x	PM	Duman
Euro 3	2,1	0,66	5	0,10	0,8

Euro 4	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro 5	1,5	0,46	2	0,02	0,5

Özetle ifade etmek gerekirse, taşıtlara ilişkin sorunlar, esas olarak, sistem bütünlüğü içinde ve sistemle uyumlu olarak tanımlanmamış olmalarından kaynaklanmaktadır.

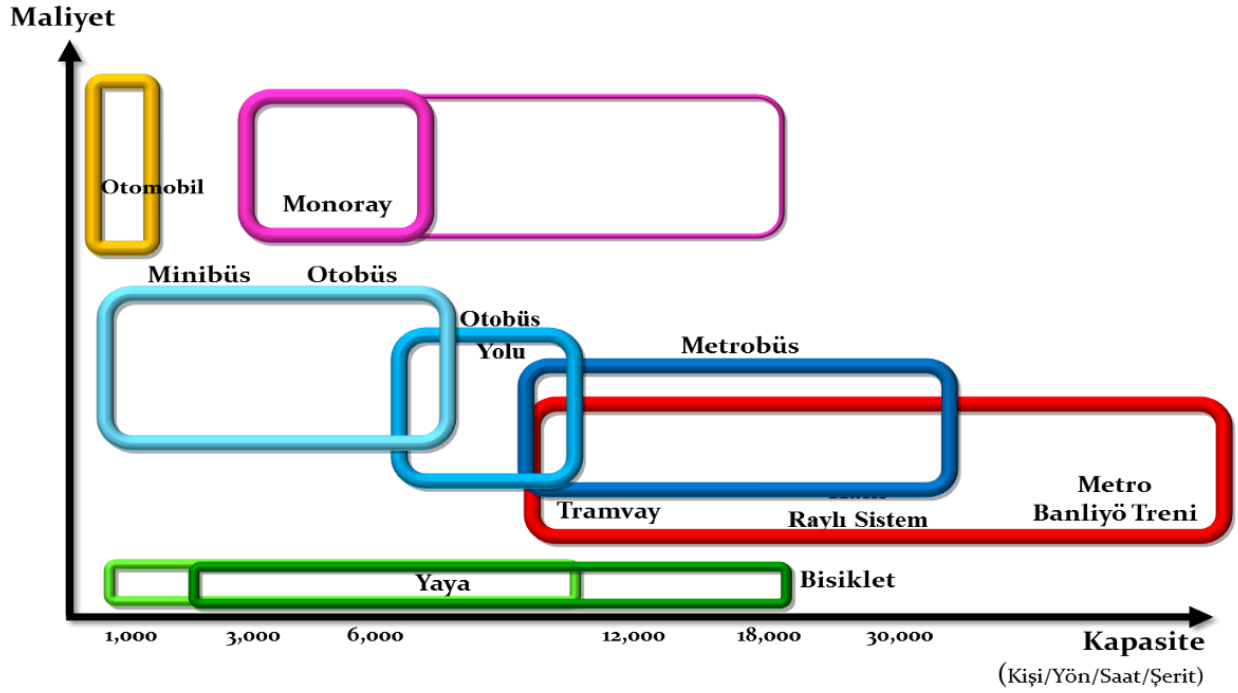
3.3 Literatür araştırması

Ulaşım Türlerinin Maliyet ve Kapasite Açısından Karşılaştırılması

Şekil 3.1 de[13], çeşitli ulaşım türlerinin kapasite ve taşıma maliyetleri karşılaştırması görülmektedir. Burada görüldüğü gibi metrobüs saatlik 15,000 ile 30,000 arası yolcu taşıma kapasitelerinde uygun bir ulaşım türüdür. Daha yoğun taşıma gereksinimi için raylı sistemler ve metro tercih edilmelidir. Metro ve raylı sistemlerin, metrobüse göre kapasite açısından avantajları şöyle sayılabilir,

- 1- Daha fazla sayıda aynı anda hareket eden vagonla yolcu kapasitesinde artış
- 2- Aynı anda açılıp, kapanan kapılar ile yolcu iniş biniş hız artışı
- 3- Sabit kapı pozisyonları ve platform ile aynı hizada duruş ile biniş kolaylığı
- 4- Bilgilendirme ve yönetim sistemi
- 5- Dış hava şartlarından etkilenmeyen sabit hız profili
- 6- Aktif sinyalizasyon sistemi

Bu projede önerilen “Otonom Metrobüs Sistemi “ ile hava şartlarından etkilenmeme hariç, yukarıda belirtilen özelliklerin çoğu sağlanabilecektir. Böylece kapasite ve yolcu konforu önemli ölçüde arttırılabilecektir. Bu projede hava ve yol şartlarına göre emniyetli konvoy mesafesi ve hız profili hesaplanarak, lastik tekerlekli sistemler için ulaşılabilecek en iyi şartlar elde edilecektir.



Şekil 3.1- Ulaşım Türlerinin maliyet ve kapasite açısından karşılaştırılması

BRT (Bus Rapid Transit-Hızlı Otobüs Taşımacılığı) Sistemleri

İstanbul'da Metrobüs olarak adlandırılan BRT (Bus Rapid Transit-Hızlı Otobüs Taşımacılığı) sistemi, çoğunlukla araç trafiğinden ayrı kendine ait bir koridoru olduğundan sıradan bir otobüs hattından daha hızlı ve daha verimlidir ve bu sebeple Tablo 3.2'de de görüldüğü gibi dünyanın birçok şehrinde farklı isimlerle yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Wright ve Hook [2007] BRT sistemini, esnek, yüksek performanslı, özel olarak dizayn edilmiş istasyon, işletim sistemi ve akıllı ulaşım sistemlerinden oluşan hızlı, güvenilir, rahat ve düşük maliyetli bir ulaşım hizmeti olarak tanımlamıştır.

Yapım Yılı	Şehir	Ülke	Uzunluk (Km)	İstasyon Sayısı
1974	Curitiba	Brezilya	60	221
1984	Ottowa	Kanada	30.9	28
1999	Kunming	Çin	46	63
2000	Bogota (TransMilenio)	Kolombiya	84	114
2001	Tapei	Tayvan	--	--
2004	Seul	Güney Kore	--	--
2005	Pekin	Çin	54	60
2005	Los Angeles (Orange Line)	Amerika	29	18
2007	İstanbul (Metrobüs)	Türkiye	52	44
2009	Los Angeles (Silver Line)	Amerika	41.8	9
2010	Lima (El Metropolitano)	Peru	33	38

Tablo 3.2 :Dünyadaki BRT Uygulama Örnekleri

1937’de Chicago’daki üç adet kent içi raylı sistem hattının ekspres otobüs hattına dönüştürülerek işletilmesi hızlı otobüs taşımacılığının ilk örneği olarak kabul edilse de, BRT sistemine dünya çapında asıl ünü kazandıran ve birçok şehir tarafından toplu taşıma aracı olarak tercih edilmesini sağlayan 1974 yılında 20 km’lik hat uzunluğuyla devreye girerek verimli bir şekilde çalıştığını ispatlayan ve şu an günde ortalama 1,3 milyon yolcu taşıyan Curitiba’nın (Brezilya) hızlı otobüs sistemi olmuştur. BRT sisteminin yalnız nüfusu az olan kentlerde (Curitiba gibi) işleyebileceği fikrini değiştiren ve metropollerde de kullanılmasını sağlayan ise 2000 yılında 7 milyon gibi kalabalık bir nüfusa sahip Bogota (Kolombiya) şehrinde kurulan “TransMilenio” olarak adlandırılan hızlı otobüs taşımacılığı sistemi olmuştur.

Günümüzde günde yaklaşık 1.7 milyon insanı hızlı ve konforlu bir şekilde taşıyan TransMilenio'nun başarısı iyi bir planlamadan geçmektedir. Bu planlamada, istasyonlarda tek yöndeki şerit sayısını birden fazla yaparak, ekspres otobüslerin kullanılmasına imkân sağlanması ayrıca dikkati çekmektedir.

Artık dünyada birçok uygulaması olan BRT sisteminin yüksek performanslı olarak nitelendirilebilmesi için Willumsen ve Lillo'ya [2005] göre sahip olması gereken özellikler,

- Araç içinde geçirilen yolculuk süresinin mümkün olduğunca kısa olması,
- Yolcuların duraklarda bekleme sürelerinin minimum tutulması,
- Güvenli bir yolculuk sağlanması,
- BRT sistemi diğer toplu taşıma sistemleriyle entegre biçimde çalışması,
- Duraklar arası mesafe yolcuların erişimini zorlaştıracak kadar uzun ya da araca çok fazla dur-kalk yaptırmayacak kadar kısa olmaması,
- Duraklarda yolcu birikiminin olmaması,
- Yolcuların güzergâhlar ve araçlar hakkında bilgilendirilmesi,
- İyi ve planlı bir altyapı oluşturulması(durak konumları, otopark hizmetleri, gişeler vb.)
- Konfor bakımından araçlardaki yoğunluğun belli bir seviyeyi aşmaması,
- İşletme bakımından zarar edilmemesi için boş seferlerin olmaması,

olarak sıralanmıştır. Bu özellikleri sisteme kazandırmak için ise,

- Araçların optimum hızda ilerlemeleri sağlanmalıdır.
- Uygun frekansta servis sıklığı sağlanmalıdır.
- Ücret toplama işleminin akıllı biletler vb. sistemlerle yapılması ve bu sayede zaman kaybının önlenmesi gerekmektedir.
- Duraklardaki inen ve binen yolcu yoğunluğuna göre normal seferlerin dışında ekspres servislerin de düzenlenmesi ve bu sayede araçların her durakta durma zorunluluğunun ortadan kalkması sağlanmalıdır.
- Durak uzunluklarının aynı anda birden fazla aracın durabilmesine uygun olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.
- BRT sisteminde yer alan farklı hatların rotalarının uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Her ne kadar bu koşullar sağlansa da zirve saatlerde yolcu sayısındaki aşırı artış sebebiyle zaman zaman BRT sistemi istenilen verimlilikte çalışmayabilir. Bu sorunu aşmak için servis sayısını arttırmak bazen çözüm yerine, problemi daha da derinleştirebilir. Çünkü çok yüksek frekansta araç kaldırmak koridor üzerinde ve duraklarda trafiğe neden olabileceğinden yolcu taşıma kapasitesi ve sistemin genel performansı daha da düşebilir. Zirve saatlerde bile sistem performansını maksimum seviyede tutabilmek ve BRT hattını verimli bir şekilde kullanabilmek için geliştirilen çözüm yollarından biri araç konvoy sistemi uygulanması, bir diğeri ise BRT yönetim sisteminin iyileştirilmesidir.

COMONOR (COMboio de ONibus ORdenados-Senkron Otobüs Konvoyu), 1977 yılında Sao Paulo (Brezilya) şehrinde sürücü merkezli olmasına rağmen hızlı BRT’de konvoy sisteminin başarıyla sergilendiği uygulamalar biridir. Buradaki temel prensip raylı sistemde birbirini takip eden vagonlarda olduğu gibi grup içindeki otobüslerin koridor üzerinde kopmadan birbirine yakın seyretmesine, istasyonlarda ise duruş ve kalkış esnasında aynı anda hareket edip, aynı anda yolcu almasına dayanır. Uygulanan bu metot amaçlanan hedef istasyonlarda dur-kalk için harcanan zamanı minimum düzeylere çekerek otobüslerin ortalama işletme hızını, dolayısıyla da hattın yolcu kapasitesini arttırmaktır [3].

Bu iki yöntemi rakamlarla karşılaştırmak gerekirse konvoy sisteminin faydalı olabileceği Tablo 3.3’deki örnekte olduğu gibi net bir şekilde görülmektedir. Bu örnekte 4 araçlı konvoylardan oluşan bir BRT sistemi ile konvoy düzeni olmayan başka bir BRT sistemi ele alınmış, her yolcunun otobüse biniş süresi ise ortalama 2 saniye olarak kabul edilmiştir. Bir araç için perona yanaşma(6 s) ve perondan ayrılma(6 s) süresi yaklaşık 12 saniye alınmış, konvoy düzeninde ise araçlar aynı anda hareket etmesine rağmen sürücü kaynaklı araç başı yaklaşık 4 saniyelik (durma 2 s, kalkma 2 s) bir gecikme olabileceği düşünülerek hesaplar daha gerçekçi hâle getirilmiştir.

Veriler	Geleneksel İşletme Mantığı	Konvoy İşletme Mantığı	
Gruptaki Otobüs Sayısı(adet)	1	4	
Binen Yolcu Sayısı(adet)	4	4	
Otobüsün Yolcular Binerken Harcanan Süre(s)	8	2	
Otobüsün Yanaşmak-Kalkmak İçin Harcadığı Süre(s)	12	28	
Bir İstasyon İçin Toplam Harcanan Süre(s)	20	30/4=7.5	- 12.5
Durağın&Koridorun Taşıt Kapasitesi(adet/saat)	180	120x4=480	+300

Tablo 3.3: Geleneksel İşletme Mantığı ile Konvoy İşletme Mantığının Karşılaştırılması

Sonuç olarak geleneksel yöntemde koridorun araç kapasitesi en yüksek 180 adet/saatte kalırken, konvoy mantığında bu değer 480 adet/saate kadar çıkartılabilir. Elbetteki bu tekli otobüs çalışma aşamasında verimin yüksek olmadığı durumlar için geçerlidir. İstanbul metrobüs hattına yönelik, gerçekçi koşullar ile yapılan kapasite hesaplarında bölüm 4.1 de görüldüğü gibi yaklaşık % 45'lik bir kapasite artışı ortaya çıkmaktadır.

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi bir otobüsün sadece bir istasyonda kaybettiği zaman ortalama 12.5 saniye kadar daha azdır. Bunun anlamı metrobüste (İstanbul) olduğu gibi 45 istasyona sahip bir BRT sisteminde bir aracın ilk duraktan kalkıp son durağa varışı 83 dakika yerine, yaklaşık 10 dakika (562 saniye) daha az, yani 73 dakikaya inecektir. Üstelik bu sistem sürücü odaklı olmaktan çıkarılıp, otomatize edildiğinde sürücü gecikmeleri ortadan kalkacağı için çok daha iyi noktalara ulaşacaktır.

Tamamen otomatize veya yarı otomatize hâle getirilmiş bir konvoy sistemi, toplu taşıma için kapasiteyi daha da yukarılara çıkabilme gibi bir avantaja sahip olmasının yanı sıra diğer yönlerden önemli başka avantajlara da sahiptir. Otomatize edilmiş sistem sayesinde takip mesafesi oldukça kısalmakta ve bu yüzden rüzgâr direncinin araca etkisi en alt seviyelere inmektedir. Böylece hem yakıt tüketimi ve hem de CO₂ emisyonu bakımından önemli derecede bir azalma meydana gelecektir. Enerjinin günden güne daha değer kazandığı bugünlerde buradan yola çıkarak otomatik konvoy sistemi üzerine hem simülasyon hem de proje bakımından birçok çalışma yapılmaktadır.

2000 yılında bu doğrultuda yapılan simülasyonlardan birinde toplu taşıma için konvoy sistemlerinin iyileştirilmesi üzerine bir model kurulmuş ve sonuçları irdelenmiştir. Sotelo, Vilela ve Leonel'in (2000) kurduğu modelde otonomlaştırılmış otobüsler ve onlarla etkileşime girebilecek özel olarak ayrılmış akıllı şeritlerin var olduğu yollar yer almaktadır. Simülasyon sonuçlarında otobüsler yüksek hızlarla (70-80 km/sa) ve farklı ivmelerle hareket etse bile sistemin sürücüden daha hızlı tepki verebilmesi sayesinde otobüsler arası mesafenin hep 2.5 metrenin altında kaldığı görülmüştür. Fizibilite çalışmasının ve elde edilen sonuçların ardından yapılan çıkarım, otobüslerin gerekli yazılımlarla birlikte uygun donanımlara (sensörler, eyleyiciler ve kontrolörler) sahip olmasıyla manyetik şeritleri izleyebilecek şekilde sürücüye gerek duymaksızın otomatikleştirilebileceği, bu sayede araç takip mesafelerinin bir hayli azalacağı ve beraberinde yol kapasitesinin artacağı olmuştur.

Esasında otonom konvoylara yönelik proje ve uygulamaların otobüsler için olmasa da başka araçlar için çok daha önce başladığı söylenebilir. California PATH Program, University of Berkeley, General Motors Research Lab., Delphi Saginaw, Delphi Chassis, Delco Electronics, Huges ve California Department of Transportation tarafından ortaklaşa yürütülen bir çalışmadadır. Bu çalışmada her biri şerit takibi, şerit değiştirme, hız regülasyonu, araçlar arası mesafe korunumu yapabilen 8 adet araç ile bir konvoy oluşturulmuştur. Proje bitiminde bu araçlar 60 km/sa hızda giderken farklı hava ve yol koşullarında birbirlerini 6.5 metre gibi çok kısa aralıklarla otonom olarak sorunsuz bir şekilde takip edebilmiştir. Üstelik bu testlerde araçlar arası mesafe için konvoydan ayrılma ve konvoya katılma esnasındaki kalıcı hal hatası 25 cm, araçların konumu ile ilgili hata ise 10 cm'in altında ölçülmüştür. Sistemin yapısı incelendiğinde ise araçlar arası iletişimi sağlamak için radyo sinyalleri, araçlar arası mesafeyi ölçmek

için radar, yola göre yanal konumunu belirlemek için manyetik sensörler kullanıldığı görülür. Ayrıca direksiyon, gaz ve fren, eyleyicilerin de yardımıyla elektronik olarak kontrol edilebilir hâle getirilip, gerekli yazılımların bulunduğu bilgisayara bağlanmıştır. Buna ek olarak sistem istenildiğinde kontrolü tamamen otomatik yapmak ya da sürücüye bırakmak için butonlar ve sürücüyü bilgilendirmek için göstergeler içermektedir[5].

Çok benzer bir çalışma ise yakın zamanda Japonya'da Toyota firması tarafından yine ITS teknolojileri kullanılarak IMTS (Intelligent Multi-mode Transit System) adıyla uygulamaya konmuştur. Bu projede de hem boylamsal hem de yanal kontroller yine birlikte gerçekleştirilmiş, 6 adet araç tam otonom olarak hareket ettirilmiştir. Yanal kontrolde oldukça başarılı sayılabilecek projede 2.5 metre genişliğe sahip olan araçlar 3 metrelik genişliğe sahip dar bir yolda yine mıknatıslı çiviler ve manyetik sensörler kullanılarak, diğer ekipman ve yazılımların da yardımıyla konvoy olarak yürütülmüştür. Ayrıca konvoy halinde 60 km/sa hıza çıkabilen bu sistem en fazla %8'lik bir eğime kadar veya en az 20 metre yarıçaplı kıvrıma kadar işleyebilme özelliğine de sahiptir[6].

Eylül 2009'da başlamış ve 3 yıllık bir program olarak tasarlanmış olan SARTRE, European Commission FP7 ortak yapımı bir projedir. Projedeki amaç araçları konvoy halinde hareket ettirmek ve bunu yaparken tüm araçların birbiri ile iletişim halinde olmasını sağlamaktır. Projedeki dikkat çekici nokta her konvoyu böyle bir sistemi kullanabilme ehliyetine sahip sürücü tarafından kullanılan lider bir aracın idare etmesidir. Konvoydaki diğer araçlar tamamen otomatik olarak hareket etmekte ve lideri izlemektedirler. Her araçta global kontrol sistemi ile koordine bir şekilde çalışan lokal bir kontrol sistemi de vardır. Bu Araçlar otonom hâle dönüştürülürken ACC(Adaptive Cruise Control), frenleme yardımıyla çarpışma azaltıcı, şerit dışı uyarı sistemi, kamera ve 76 GHz tarama hızına sahip radar gibi araç üzerlerinde bulunan hazır donanımlar da kullanılmıştır. Proje sonunda yapılan testlerde başlangıç hedeflerinden biri olan yakıt tasarrufuna da araçlar birbirine çok yakın hareket ettiğinden ulaşılmış, nitekim elde edilen verilere göre %20'ye varan bir iyileşme sağlamıştır [7]

Araç konvoylarını otonom hâle getirmek için yapılan bu çalışmalarda hem amaçlar hem de izlenen yol bakımından birçok ortak yan bulunduğu aşikârdır. Yazılmış veya uygulanmış her çalışma otonom konvoy oluşturmanın 3 ana avantajından bahsetmektedir:

- Yol kapasitesini artırır
- Yakıt sarfiyatında azalma meydana getirir
- CO₂ emisyonunu azaltır

Yine bu çalışmaların hemen hemen hepsi farklı metotlar barındırır da araçları otonom hale getirmeyi,

- Algılayıcılar
- Eyleyiciler
- Akıllı Yollar
- Kontrolörler ve Yazılımlar
- Haberleşme Protokolü

üzerine kurmuştur. Tüm bunların sonucunda bir BRT sistemi için konvoy sistemi koridorun yolcu taşıma kapasitesinde nasıl bir artış sağlıyorsa, otonom konvoy sisteminin kapasiteyi daha da ileri götüreceği, hatta bunun yanında yakıt tasarrufu ve araçların daha az CO₂ salınımı yapmasını sağlayacağı kanaatine rahatlıkla varılabilir.

Tabi ki BRT sisteminin daha efektif olması için araç konvoy yönteminin dışında veya beraberinde BRT yönetim sisteminin iyileştirilmesi ve optimize edilmesi de bir başka seçenektir. İyi bir yönetim ve bilgilendirme sisteminin olması gereken özellikleri ise şöyle sıralanabilir:

- ✓ Operatöre karar verme desteği sağlaması
- ✓ Güçlü, kolay ve anlaşılabilir bir ara yüze sahip olması
- ✓ Gerçek zamanlı veri toplaması ve işleyebilmesi
- ✓ Geniş bir veri tabanına sahip olması
- ✓ İstatistiksel verileri profilleri ile anlık verileri bir araya getirip araç talep miktarını belirleyebilmesi
- ✓ Araç tam konumlarını bilmesi
- ✓ Yolcu sayma teknolojisine sahip olması
- ✓ Sinyalizasyonları kontrol edebilmesi
- ✓ Esnek ve modüler olması
- ✓ Yolcu bilgilendirme sistemlerinin bulunması

3.4-Tavsiye Edilen Olası Yöntemler ve Özgün Yönler

Metrobüs sisteminin kapasite ve verimliliğini arttırmaya yönelik akıllı ulaşım uygulamaları ve teknolojileri kapsamında, ilk sırada incelenecek ve en etkili yöntem, günümüzde işletildikleri haliyle birbirinden bağımsız olarak hareket eden metrobüs araçlarından birlikte hareket eden akıllı yol trenleri oluşturmak üzerine kuruludur.

Mevcut metrobüs filosu içinden seçilecek birbirinden tamamen bağımsız araçlar yerine, bir kaç araçtan oluşan ve birbirine haberleşme/sensör sistemleri ile bağlı prototip araç trenleri haline getirilebilir. İlk aracın insan kontrolünde olacağı bu trenlerde, takip eden araçlar insansız/otonom teknolojilerle donatılarak eldeki şoför sayısı sabit tutulup aynı anda daha fazla araç sefere çıkartılabilir. Bu sayede aynı anda aktif olan araç sayısının artmasının yanı sıra, insan kontrolündeki araçlara göre daha yakın takip mesafeleri sayesinde, hava sürtünmesine harcanan yakıttan tasarruf edilecektir.

Bu araç konvoylarının ve trenlerinin oluşturulmasında kullanılabilecek özelleşmiş akıllı ulaşım teknoloji ve metotlarına örnekler, aşağıda sıralanmıştır:

1. **Kooperatif Gelişmiş Seyir Kontrolü:** RADAR, GPS, lazer mesafe algılayıcı (LIDAR) ve araçlar arası kablosuz haberleşme kullanılarak, var olan seyir kontrolü sistemlerinin geliştirilmesine dayanır. RADAR ve LIDAR sayesinde her araç önündeki ile olan mesafeyi yüksek hassasiyette ölçer ve radyo haberleşmesi ile GPS sistemlerinin bir arada kullanılması sayesinde tüm konvoyun konumları her araç tarafından takip edilebilir.
2. **Şerit terk uyarısı / Şerit terk önleme:** Ticari ve bireysel araçlarda kullanılmaya yeni başlanan bu sistemde, kameralar aracılığıyla şerit çizgilerinin tanınması ve şerit dışına kayan araçların sürücülerinin otomatik olarak sesli veya titreşimli uyarılması mümkün olmaktadır. Daha gelişmiş şerit terk önleme sistemlerinde, elektronik kontrol sistemi direksiyona veya bir taraftaki pedallara müdahale ederek aracın şerit içine dönmesini sağlayabilir.
3. **Elektronik stabilite kontrolü:** Özellikle yüksek profilli otobüs, kamyon ve TIR gibi araçların virajlarda ve dönüşlerde dengelerinin korunmasına yönelik bu sistemler, aracın hızını, yatay eksenindeki olası kaymaları ve düşey eksenindeki eğilmeleri ivmeölçerler ve aracın kendi hız ölçme yöntemleri ile takip ederek, gerekirse hızı azaltıp tehlikeyi azaltabilmektedir.

Yukarıda örnekleri verilen akıllı ulaşım teknolojileri bir araya getirilerek ve özgün kontrol/koordinasyon sistemleri ile desteklenerek, öne sürülen otonom araç konvoyları oluşturulabilir. Bu kapsamda gerek duyulacak koordinasyon ve kontrol sistemleri birkaç değişik seviyede incelenebilir. Bazı uygulamalar tüm sistemin verimliliğini arttırmaya yönelik olarak en üst kademede çalışırken, sistemin daha alt kademelerindeki farklı alt görevler için başka yöntemler kullanılabilir. Aşağıda tarif edilen uygulamalar, bir arada ve paralel şekilde çalışarak, sistemin farklı kısımlarını geliştirecek şekilde seçilmiştir.

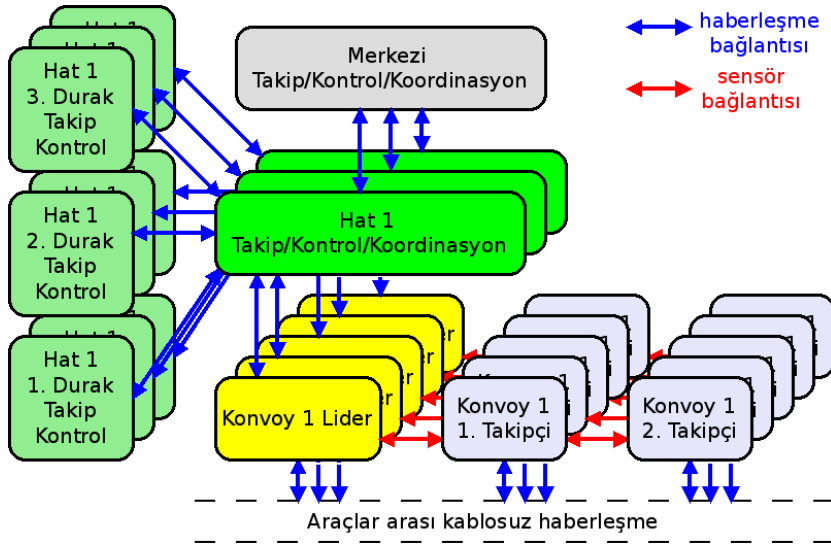
- **Sistem seviyesinde akıllı zamanlama:** Oluşturulacak metrobüs konvoylarının ilk aracı insan kontrolünde de olsa, ilk duraktan kalkış ve ona göre diğer duraklara varış zamanları yolcu miktarlarına ve gün içindeki yoğunluk trendlerine göre dinamik olarak optimize edilebilir. İlerleyen aşamalarda birden fazla araç konvoyu oluşturulduğunda, hangi hatta ne kadar araç gerekeceğine de yine bu en üst seviye uygulaması karar verebilir. Bu yöntem, gün veya hafta seviyesinde kalkış/varış saatlerini doğru ve verimli seçebilmek için en uzun zaman ölçeğinde çalışacaktır.
- **Araç-durak eşleştirme:** Metrobüs hattının durakta bekleyen araçlar yokken arkadan gelen bir aracın geçip devam etmesine izin verdiği şartlarda, geliştirilecek araç konvoyunun hangi duraklarda duracağına, hangilerini pas geçeceğine de dinamik olarak ve verimliliği yüksek tutmayı hedefleyen algoritmalar ile karar verilebilir. Bu yöntem, listelenenler arasında orta seviyede çalışacaktır.
- **Araç hız optimizasyonu:** Bir sonraki durağa varılacak zamanın o duraktaki şartlara ve aradaki trafik durumuna göre belirlenmesi için geliştirilecektir. Durakta zaten yolcu almakta ve indirmekte olan araçlar varsa ve yeni bir araca yer yoksa, mevcut araçlar hareket ettiği anda durakta olacak şekilde daha yavaş ama verimli bir hızda gidilebilir. İlk araç şoför kontrolünde de olsa, akıllı ulaşım teknolojileri ile hesaplanacak optimal hız limitleri, tavsiye ve/veya uyarı niteliğinde gerçek zamanlı olarak sunulabilir. Diğerlerine göre daha kısa ölçekli ve araç seviyesinde çalışan bu uygulama ile yakıt tasarrufu sağlanabilir.

Yukarıda sıralanan uygulamaların hayata geçirilmesi için araç ve duraklarda kullanılacak sensör ve kontrolcü donanım/yazılımının yanı sıra, özellikle ilerideki aşamalarda tüm sistemin ve değişik seviyelerdeki alt sistemlerin koordinasyonunu sağlayacak merkezi veya yarı-merkezi bir mimari de geliştirilebilir. Bu kapsamda en alt seviyeden en üst seviyeye doğru takip ve kontrol sistemleri şu şekilde olabilir:

- **Tek araç seviyesi:** Her aracın tek başınayken veya oluşturulacak konvoylar içerisinde yerini, hızını, doluluk oranını takip eder. Konvoy içindeki şoförsüz araçların hıza bağlı olarak seçilecek araç takip mesafesini korumaları da bu seviyede kontrol edilir.
- **Konvoy seviyesi:** Araç konvoylarının dinamik olarak oluşturulması, bölünmesi ve genel olarak boylarının değiştirilmesinden sorumludur. Ayrıca, her araç grubunun (konvoy veya bağımsız) optimal hız seçimi de, yukarıda bahsedilen şartlara göre, bu seviyede kontrol ve takip edilir.
- **Hat seviyesi:** Aynı hatta hizmet veren araç konvoyları ve bağımsız araçların kalkış/ varış zamanları, duraklara atanmaları, hat üzerindeki durakların doluluk oranlarının ve dolayısıyla sistem üzerindeki talep miktarının takibi ve aynı hat üzerinde çalışmakta olan araçların haberleşme/koordinasyonu bu seviyede kontrol edilir.
- **Sistem/bölge seviyesi:** Merkezi bir mimari tercih edilirse tek bir ana merkezden, daha yarı merkezi uygulamalar için ise bölge merkezlerinden o bölgenin yetki alanına giren hatların kontrolü, hatlar arası araç transferleri, her hattın performans ve verimlilik kriterlerinin takibi bu seviyede yer alır. Gerekirse hat seviyesinde gerçekleşen kontrol ve optimizasyon süreçlerine, sistemin genel gereksinimlerini karşılamak için müdahale edilebilir. Bir hattın optimal şartların altında veya üstünde çalışması, çevredeki diğer hatların ve sistemin tamamının verimliliğini

arttırıyorsa, bu gibi sistem seviyesi optimizasyonları da bu kademedeki gerçekleştirilir.

Yukarıda tarif edilen koordinasyon ve kontrol seviyelerinin hiyerarşik yapısı, aşağıda verilen şemada görülebilir.



Şekil 3.2. Otonom Metrobüs Sistemi Kontrol Yapısı

Tek araç ve konvoy seviyesinde geliştirilecek uygulamalar şu anda öngörülen prototip otonom metrobüs konvoyu aşamasında da yarar sağlayacaktır. Daha üst seviyedeki hat ve sistem koordinasyonu uygulamaları hem daha kapsamlı, hem de birden fazla araca/konvoya dayanan sistemler olacağından, gelecekte planlanacak gelişim ve eklemelerin arasında değerlendirilebilir.

Yapılan çalışma ve araştırma sonuçları göstermiştir ki metrobüs ve benzeri ulaşım sistemlerindeki sorunlar özetle durak yapısı, yolcu yoğunluğu, hat kapasitesinin yetersizliği gibi temel öğelerden kaynaklanmaktadır. Yolcu yoğunluğunun zirve saatlerde ani bir artışla yüksek ve taşınması güç değerlere ulaşması sorunun başlangıç noktası olarak kabul edilebilir. Ayrıca otobüslerdeki yolcu yoğunluğu arttıkça taşıtların her duraktaki bekleme süresinin doğrusal değil üssel bir biçimde artması koridor üzerinde aşırı bir yoğunluk oluşmasının yanı sıra metrobüslerde gecikmeye sebebiyet vermektedir. Bu da verimin ve kullanılan kapasitenin düşmesine ve durumun daha da kötüleşmesine yol açmaktadır. Bu bağlamda metrobüs ulaşım sistemine ait verimliliğin artırılması ve sorunların giderilebilmesi için olası yöntemleri yukarıda belirtilen araç konvoyları oluşturma prensiplerini ve genel ulaşım teknolojileri metodolojilerini de göz önüne alarak, 3 farklı aşamaya sınıflandırabiliriz.

- Kısa vadede yapılabilecekler
- Orta vadede yapılabilecekler
- Uzun vadede yapılabilecekler

3.4.1. Kısa vadede yapılabilecekler

Bu noktada yapılabilecek uygulamalar hemen ya da birkaç ay içinde uygulamaya konulabilecek türden olup, metrobüs taşımacılığında var olan sorunlara tam bir çözüm getirmesi düşünülmesi de orta ve uzun vadede ki çözüm uygulamaları gerçekleşene kadar sorunlarda bir azalma ve sistemde bir rahatlama meydana getireceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Şoför merkezli konvoy sistemini uygulama

Literatür çalışmasında da görüldüğü gibi yolcu taşımada kullanılan konvoy sistemleri kapasitenin artmasını sağlayabilmektedir. Fakat otomatize veya yarı otomatik hale getirilmiş bir konvoy sistemini oluşturmak biraz zaman alabilir. Böyle bir çalışma yürütülürken kısa vadede buna paralel olarak manuel kontrollü bir konvoy sistemi de oluşturulabilir. Bu ileride kullanılacak otomatize edilmiş bir konvoy sistemi için hem gerekli verilerin elde edilmesini sağlayacak hem de orta vadede gelecek sistem kadar olmasa da kapasiteyi bir nebze olsun arttıracaktır. Bu sistemi oluşturmak için gerekli adımlar,

- İyi bir planlama ve geri bildirimli bir yapının oluşturulması
- Metro ve tramvay sistemlerinde olduğu gibi sinyalizasyon sisteminin kurulması
- Metrobüs şoförlerinin yapıyı ve kuralları anlatan iyi bir eğitimden geçirilmesi genel olarak sıralanabilir.

3.4.2 Orta vadede yapılabilecekler

Uygulamaya konulması yaklaşık 1-5 yıl arasında sürmesi düşünülen çözüm adımlarını bu sınıfa yerleştirebiliriz. Ayrıca bu çözümler yapılan fizibilite çalışmasının da teknik olarak temelini oluşturmaktadır.

3.4.2.1 Otonom konvoy sisteminin uygulaması

Konvoy sisteminde araçlar kalkış noktalarından itibaren içerisinde araç sayıları hesaplanmış bir grup olarak hareket etmeli ve araçlar duraklarda aynı anda yolcu alıp yolcu indirmelidir. Her ne kadar şoför merkezli konvoy sisteminin metrobüs taşımacılığında bir rahatlatma ve kapasite artışı yapması düşünülse de verimi daha da arttırmak için sistem insan odaklı olmaktan çıkarılmalı, daha hızlı ve standart tepkilere sahip otomatik hâle getirilmelidir. Sonuç olarak otomotize edilmiş bir yapı daha yakın takip mesafesi sağlayacak ve durak çıkışlarında kopmaların önüne geçecektir. Tabi ki bu sayede de optimizasyon çalışmalarının ardından koridor üzerinde araç yığılmalarının bitmesi planlanmaktadır. Tasarım tercihen iki şekilde uygulamaya konulabilir. Bunlardan ilki aracın sadece boyuna kontrolünü otomatik hale getirmek, yanal kontrolü ise yani direksiyonu ise sürücüyeye bırakmaktır. Sürücünün bir başka görevi de acil durumda sisteme müdahale etmek olabilir. Uygulamanın ilk günlerinde yolcuların sisteme olan güvensizliği de bu sayede bir nebze olsun azalacaktır. Planlanan diğer tasarımda ise yanal kontrol de sisteme bırakılacak, sürücü araçta sadece acil veya beklenmeyen durumlar için yer alacaktır. Her iki tasarım sürecinde de atılması gereken adımları belirtmek gerekirse:

- Mevcut araçlar ve yönetim kontrol sistemi ayrıntılı incelenmesi
- Yönetim kontrol sistemi için bilgi toplama sistemleri, optimizasyon, simülasyon ve yönetim kontrol sistemi programı hazırlanması
- Otobüslerde otonom ve haberleşen araç alt yapısının oluşturulması
 - Gaz ve fren sisteminin elektriksel kontrol edilebilir hale getirilmesi
 - Araçlara birbirleri ile haberleşebilen sistemin hazırlanması, uyarı mesajlarının verilmesi, fren ve gaz sistemine komut verebilir hale getirilmesi
 - Duraklara yanaşma ve doğru yerde durma sinyalizasyon sistemi hazırlanması
 - İdeal hızlanma ve yavaşlama bilgilerinin dinamik olarak hesaplanması
 - Direksiyona otomatik kumanda, projenin daha sonraki aşamalarında ele alınacaktır
 - Ön araç bilgisi duyargalarının araçlara adaptasyonu ve ilgili yazılımın hazırlanması
 - Komple sistem yazılımı hazırlanması ve simülasyon yapılması

- Kapıların aynı anda açılma ve kapanma sistemleri kurulması
- Metrobüs koridorunun akıllı ulaşımına uygun hale getirilmesi
 - Duraklarda yanaşma ve kapı pozisyonlarına yönelik duyargaların yerleştirilmesi
 - Duraklarda gerekli uyarı sistemlerinin ve bilgi sistemlerinin hazırlanması
 - Araçlara yağış durumu ve yol durumu bilgisi veren duyargaların hazırlanması
- Araçlar arası ve araçlarla merkezi sistem arasında kablosuz haberleşme protokolü oluşturulması
- Sistemin içinde yer alacak metrobüs sürücülerinin iyi bir eğitimle bilgilendirilmesi
- Prototip araçların hazırlanması ve aşamalı yol testleri yapılması
- Yolcular yeni sistem hakkında bilgilendirilmesi
- Yeni alınacak metrobüs araçları için teknik parametrelerin çıkartılması

Durak boylarının uzatılarak daha fazla sayıda otonom araç alabilmesi verimliliği arttıracaktır, fakat ilave yatırım getireceği için ilk aşamada yapılmayabilir. Sistem devreye girdikten sonra düşünülebilir. Dinamik bir optimizasyon sistemi hazırlanacağı için daha sonraki aşamada yeni durak boylarına göre sistem optimize edilebilir.

Şu anda dünyada otonom çalışan bir metrobüs sistemi mevcut değildir. Kamyonlara yönelik konvoy çalışmaları deneme sürüşleri şeklinde mevcuttur. Bu açıdan bu çalışma bir ilk olacaktır. Ülkemizde bu teknolojileri geliştiren ve üreten şirketler mevcut değildir. Koç Sistem'in haberleşen araçlara yönelik bir araştırma projesi mevcuttur. Ayrıca Okan Üniversitesi'nde otonom araç çalışması yapılmıştır. Ülkemizdeki bilgi birikimini kullanarak, bu teknolojilerin uygulanması çok önemli bir katma değer sağlayacaktır.

Kullanılacak sistemler, simülasyonlar ve yazılımlar ticari olarak mevcut değildir. Bu sistemlerin en doğru sonuçları, en güvenli bir şekilde verebilecek şekilde geliştirilmesi de özgün bir çalışma olacaktır.

3.4.2.2 Duraklar ergonomik ve akıllı hale getirilmeli

Metrobüs hattı üzerinde bulunan durakların da yolcular açısından daha ergonomik ve akıllı hale getirilmesi önemlidir. Bu proje ile paralel olarak aşağıda belirtilen iyileştirmelerin yapılması yararlı olacaktır.

Bu konuda öncelikle yapılması gereken her durağın tek tek ele alınması, incelenmesi, kendi ortam ve şartlarına göre farklı çözümler getirilmesidir. Çünkü her durağın bulunduğu mekânın imkânları, yolcu akışı, metrobüs hattındaki sırası, o durağı kullanan hatlar, yoğun yerleşim yerlerine uzaklığı bakımından birbirine göre farklılıklar gösterebilir. İnceleme sonucunda durak üzerinde imkânların izin verdiği ölçüde birçok değişiklik yapılabilir.

- Durak en ve boylarının kontrol edilerek proje ile uyumlu hale getirilmesi
- Duraklara iniş, çıkış ve turnikelerin yolcu konforunu iyileştirecek şekilde düzenlenmesi
- Güvenliğe yönelik kamera ve kızılötesi ışın sistemlerinin uygulanması
- Metro istasyonlarındakine benzer yolcu bilgilendirme sistemleri hazırlanması
- Araçların kapılarının açılma pozisyonlarının dinamik olarak belirlenmesi ve yolcuların yönlendirilmesi

Duraklarda akıllı ulaşım teknolojilerinin sunduğu bazı imkânları kullanmak yolcuları bilinçlendirmenin yanı sıra metrobüs ulaşımını da rahatlatacak, insan yoğunluğunun neden olduğu karmaşa yerine daha düzenli ve daha modern bir görüntü sağlayacaktır. Kullanılabilecek bu teknolojilere örnek olarak araçlara binmek isteyen yolcuların inmek isteyen yolculara zorluk çıkarmasını engellemek için, özellikle kalabalık duraklarda tüplü peron sistemine geçilmesidir. Bu sistemde otobüs durağa yanaştığında durak üzerinde bulunan yolcuların bir cam kapı tarafından araca binmeleri engellenebilir. Otobüs, inen yolcuları binecek yolcularla karşılaşmayacak biçimde yan hazneye bıraktığında, cam kapı açılır ve durakta bekleyen yolcuların binmesi sağlanabilir.

Duraklarda rastlanan bir başka sorun ise insanların nerede bekleyeceklerini bilememesidir. Bu sorun yolcuların bazen kullanacağı hattı, bazen de ilk gelecek otobüsün veya konvoyun nerede duracağını bilmemesinden doğmaktadır. Bu bağlamda soruna yol açan iki sebebi de ortadan kaldıracak çözümler metrobüs taşımacılığına sunulabilir. İlk olarak duraklarda yolcu bilgilendirmelerinin daha iyi

yapılması gerekmektedir. Bu uygulama günün her saati dikkat çeken ve özellikle akşam saatlerinde de okunabilen ışıklı panolarla kolaylıkla yapılabilir.

3.4.2.3 Merkezi veri toplama ve simülasyon birimi kurulmalı

Metrobüs hattındaki yolcu taşımacılığını rahatlatmanın bir başka yolu da hat üzerinde gerçekleşen olaylar ve mevcut durumlar hakkında bilgi sahibi olmaktan geçer. Anlık durak yoğunlukları kameralar veya çalışanlardan alınan verilerle bilinebilir. Fakat 30 dakika sonra duraklarda oluşacak yoğunluğu bilmek, ancak daha önceki günlerdeki tecrübelerden faydalanılarak ya da yapılan anketlerin sonucundan tahmini olarak çıkartılabilir. Anketlerdeki dezavantaj tüm yolcuların sadece küçük bir kısmını ele alması ve anket yapılmayan diğer büyük kısmın eldeki verilere göre tahmin edilmesidir. Anketin bir başka dezavantajı ise anlık veri değil, geçmiş verileri (örneğin 1 ay öncesi ya da 1 yıl öncesi) içermesidir. Önceki günlerden yararlanılarak yapılan tahminlerde ise 30 dakikalık tahmin sürelerini 5-10 dakikalara çekme zorluğunun yanında her günün her saatinin birbirinden farklılık gösterebilmesidir. Olağan dışı ya da beklenilenden erken gerçekleşen durumlarda sistemin sabit kalıplaşmış tepkileri bazen yetersiz kalabilir ve tıkanma meydana gelebilir. Tüm bunların sonucunda bu veri toplama işlemlerinin işe yaramaz olduğunu söylemek de tamamen yanlış olur. Fakat bu yapının yanına daha dinamik ve sadece önemli verileri toplayan bir birimin getirilmesinin faydaları tartışılmaz.

Yolcuların birçoğunun e-kart kullandığı ve her e-kartın bir ID numarası olduğu düşünülürse, bu yolcuların hangi gün, hangi saatte, nereden bindikleri kolaylıkla bulunabilir. Bu bilgilerin dışında yolcunun nerede ineceği gibi bir bilgi de bir sonraki gündeki biniş yerine göre tahmini olarak bulunabilir. Tabi ki tüm bu anlatılanlar rutin yolculuk yapan insanlar içindir. Fakat birçok yolcunun bu sınıfa girdiğini de unutmamak gerekir. Sonuç olarak verileri tutan ve günlük olarak kendini güncelleyen işe yarar bir veri tabanı oluşturulabilir. Ayrıca bu veri tabanına olağan dışı veya özel günlerde kolaylıkla girilip işaretlenebilir. Tüm bunlara ek olarak gişelerden geçen yolcuların frekansı, kameralardan ve çalışanlardan alınan bilgiler veri tabanı ile aynı merkezde toplanırsa işlevselliği çok yüksek bir yapı oluşacaktır. Bu yapı sayesinde hangi gün hangi saatte hangi durakta ne kadar yolcu bekleniyor, kolaylıkla ve gerçeğe en yakın biçimde tahmin edilebilir. Hatta olağan özel günler bile daha

önceden yaşanmışsa (örneğin futbol maçı olan bir gün) bu tahminlerde yer alacaktır. Bu sistem sayesinde otobüslerin kalkış sıklığı gün, saat ve hatta dakika bazında en doğru şekilde tahmin edilecek ve taşımadaki sorunlar minimuma inecektir.

Kurulacak merkezi yönetim sistemi, metrobüs sisteminin hızlı ve etkin yönetilmesini sağlayan bir donanım, haberleşme, optimizasyon ve yazılım sistemidir. Temel işlevleri arasında otobüs-merkez bilgisayar iletişimini kurma, otobüslerden veri toplama, toplanan verileri operatörlere sunma, operatör komutlarını/uyarılarını otobüs bilgisayarına/sürücüye yönlendirme, otobüs bilgisayarı/sürücü kaynaklı komutları/uyarıları merkezde değerlendirilmesini sağlama, Trafik Yönetim Sistemi(TYS)/Operatörlerine karar verisi üretme ve simülasyon sistemine veri sunma sayılabilir. Bu amaçlara hizmet edecek bir Yönetim Kontrol Sistemi aşağıdaki öğelerden oluşmalıdır,

Metrobüs Yönetim Sistemi Bileşenleri :

A) Otobüs Bileşenleri

A1) Otobüs Kontrol Bilgisayarı (OKB)

Otobüs üzerinde ECU (Elektronik Kontrol Ünitesi) bilgisayarı ile sürücü arayüz aygıtlarını Merkezde bulunan MYS sistemine bağlayan bir bilgisayar donanımdır. OKB'nin ECU ile bağlantısı doğrudan hat üzerinden (RS232, Ethernet veya USB), MYS ile bağlantısı GSM üzerinden yapılmaktadır. Ayrıca sürücü ve otobüs içi yolcu Bilgi Panellerine bilgi aktarabilir. Sürücüden dokunmatik panel üzerinden bilgi/uyarıları merkeze aktarabilir. MYS üzerinden TYS komutlarını sürücüye görsel olarak ve ECU'ya (hız komutu gibi) doğrudan aktarır. ECU'dan topladığı anlık verileri (hız, gps vb.) merkeze bildirir ve günlük olarak depolar. OKB'nin seyyar servis bilgisayarı ile doğrudan hat üzerinden (RS232, Ethernet veya USB) veri bağlantısı da sağlanmıştır.

A2) Sürücü ve Yolcu Bilgi Panelleri

OKB'nin sürücü ile arayüzünü sağlayan panel ve Yolculara bilgilendirmekte kullanılan grafik paneller mevcuttur.

B- Durak Bileşenleri

B1) Durak Kontrol Bilgisayarı (DKB)

Duraklarda görevli personellerde bulunan mobil aygıtlar, çeşitli elektronik kontrol aygıtlar ve yolcu bilgi panelleri ile MYS bağlantısını sağlayan bir bilgisayar donanımdır. Mobil aygıtlar ile kablosuz, diğer aygıtlarla doğrudan hat üzerinden

bağlıdır. Durakta toplanan bilgileri/uyarıları MYS'e ve MYS'nin bilgi/komutlarını ilgili birimlere aktarılmasını sağlar. Duraklarda bulunan görsel veri toplama (video vb.) ve yayma, reklam vb. bu sistemin dışındadır. DKB ile MYS arasında her iki GSM tabanlı ve ADSL tabanlı bağlantı mevcuttur. Eğer duraklarda işletmeye yönelik elektronik kontrolörü aygıtlar gerektirirse DKB ile otobüslerdeki OKB'ler arasında mobil iletişim düşünülebilir.

B2) Durak İşletmeni Mobil Aygıtlar, Elektronik Kontrol Aygıtları ve Yolcu Bilgi Panelleri

İşletmenlerle MYS arasında bir arayüz oluşturmak için dokunmatik panelli mobil bilgisayarlar mevcuttur. Bu sistem dışında durak ile merkez arasında ayrıca sesli bağlantı mevcuttur. Ana duraklardaki işletmelerle ara duraklardaki işletmeler gibi farklı roller için farklı uygulamalar hazırlanacaktır. Yolcu bilgi panelleri olarak televizyon tabanlı ve LED tabanlı paneller sistemde yer alır. Duraklarda yolcu yönlendirme gibi elektronik kontrollü aygıtlarla doğrudan bağlantısı mevcuttur. MYS'den gelen bilgiler ve kendinden otomatik atanan işlemlere yönelik bu aygıtlar DKB denetiminde çalışır.

C) Merkez Bileşenleri

C1). Merkez Bilgisayar Sistemi (MBS)

Tüm sistemin denetlenmesini, gözetlenmesi ve veri depolamasını yapan sunucu bilgisayar sistemi ve çok sayıda kullanıcı bilgisayar kapsayan bir sistemdir.

C2). İşletim Panelleri

Tüm sistemin durumunu gösteren çeşitli grafiksel bilgilerin çıkarıldığı panellerdir. Video tabanlı paneller bu sistemin dışındadır.

C3). Metrobüs Yönetim Sistemi Yazılımı

MYS nin tüm işletimini/bakımını yapılmasını sağlayan yazılım sistemidir.

C4) . Metrobüs Karar Destek Yönetim Sistemi Yazılımı

Sistemde toplanan verileri anlık işleyen ve işletmenlere öneri oluşturan bir yazılım sistemidir. Sistemin bir parçası olarak bir simülasyon yazılımı yer alması söz konusudur.

3.4.3 Uzun vadede yapılabilecekler

Uzun vadede yapılabilecekler sistemi şoförden tamamen bağımsız bir şekilde otonom olarak hareket ettirmeye yönelik teknolojileri ve uygulamaları geliştirmek olarak ele alınabilir.

4. HEDEFLERİN BELİRLENMESİ

4.1 Kapasite artışı

Kapasite, bir taşıma tesisinden ya da taşıma yolunun bir kesitinden, belirli hizmet düzeyinde, birim zamanda geçen taşıt ya da yolcu sayısıdır. Bir taşıma sisteminin kapasitesini en küçük kapasiteli tesisi ya da kesiti belirler.

Yolcu sayısı olarak kapasite, kullanılan taşıtın yolcu kapasitesi ile taşıt sıklığı (birim zamanda geçen taşıt sayısı) çarpımına eşittir. Sıklık ise birbirini izleyen iki taşıt arasındaki süredir. Metrobüs için iki otobüs arasındaki izleme aralığı t saniye ise, bir saatteki sıklık $f=3600/t$ olur.

4.1.1 Kapasiteyi Etkileyen Faktörler

Zirve Saat Faktörü (ZSF), bir saatlik süre içinde yolcu talebinin dalgalanmasını göz önünde bulundurmaya yöneliktir. Bir otobüs sistemi zirve yolcu talebini karşılamaya yeterli olacak koşullarda tasarımlanmalıdır. Zirve talep bir saat boyunca sürmez ve bir saat boyunca karşılanacak talep hesaplanan zirve talepten küçük olmalıdır.

Ortalama yolculuk mesafesi, bir otobüsün hat boyunca seyri sırasında binen yolcu sayısını etkiler. Yolculuk mesafesi uzadıkça (hattın ilk durağına yakın binen ve son durağına yakın inen yolcular) binen ve inen çok olmayacaktır.

Otobüse binen yolcuların duraklar arasında dağılımı, inme-binme sürelerini etkiler. Yolcu inme-binmeleri bir durakta yoğunlaşırsa, bu durağın otobüs kapasitesi, dolayısıyla yolcu kapasitesi düşer. Böyle bir durak kritik durak niteliği kazanır. İnme-binmeler duraklar arasında dengeli dağıldıkça durakların otobüs ve yolcu kapasitesi büyür.

İşletmecisi Politikası

Otobüs sisteminde iki faktör doğrudan işletmecisi tarafından kontrol edilir. Bunlardan birincisi, otobüse binmesi uygun görülen en büyük yolcu sayısı, diğeri ise hizmet sıklığı, yani bir saatlik süredeki otobüs sefer sayısıdır.

Otobüse binmesi uygun görülen en büyük yolcu sayısı, aslında “otobüs kapasitesi” kavramıdır. Bu konuda, çoğunlukla uygun kabul edilen ayaktaki yolcu sayısı belirleyicidir. Metrekare başına 4 yolcu uygun, 6 yolcu kabul edilebilir düzeyleri ifade etmektedir. 8 yolcu ise ancak, yapısal dayanım hesaplarında kullanılmaktadır. Otobüsün çekiciliği, yolculara oturma olanağı sağlamasına, en azından kabul edilebilir ayakta yolculuk koşulları ile ilgilidir. Bunlar ve özellikle oturarak yolculuk olanağının sağlanması bir toplu taşıma kapasitesi yaratılması ve ekonomik yapılabirlik değerlendirilmesine bağlıdır.

Hizmet sıklığı ise altyapı, taşıt ve işletme koşullarının elverdiği olanaklar içinde kalmak üzere ulaşım ve talep yönetimi amaçları bağlamında belirlenmesi gereken bir faktördür.

4.1.2 Kapasite Hesaplamalarında Kullanılan Faktörler

4.1.2.1 Hattın Otobüs Kapasitesi

Daha önce belirtildiği gibi, bir metrobüs hattının yolcu kapasitesi, bir otobüste taşınabilecek yolcu sayısını ifade eden **otobüs kapasitesi** ile hattın belirli bir sürede geçebilecek otobüs sayısı anlamına gelen **hat otobüs kapasitesi** çarpımından oluşmaktadır. Kapasite belirlenmesinde asıl ve önemli konu altyapının otobüs kapasitesidir. Hattın otobüs kapasitesinin belirlenmesi, otobüs kapasitesine göre, daha çok parametre ile ilişkili ve daha karmaşık bir sorundur.

Altyapının otobüs kapasitesinin belirleyici bileşeni otobüsler arasındaki **en küçük izleme aralığı** ya da otobüslerin saatteki sefer sayısı yani sıklığıdır.

Metrobüslerde otobüsler arasındaki izleme aralığı açısından belirleyici bileşen duraklardır. Duraklar bir ya da daha fazla sayıda **yanaşma yerinden** oluşmaktadır. Yol boyunca yer alan durakların özellikleri ve dolayısıyla kapasiteleri farklıdır. Hattın kapasitesi, en küçük durak kapasitesi ile belirlenir. Durak kapasitesi, içerdiği yanaşma yeri, yolcu talebi nitelikleri, durak tasarımı ve uğrayacak otobüs özelliklerine bağlı bulunmaktadır.

Duraklarda bir yanaşma yerinde izleme aralığı; otobüslere inme-binme süresi, otobüs kapılarının açılıp kapanma süresi, otobüsün yanaşma yerini boşaltma süresi toplamına eşittir. Bu süre; durağı ve yanaşma yerlerini kullanan otobüslerin binme-inme süresi arasındaki farklılıktan ve bir otobüsün eriştiği durak yanaşma yerinde başka bir otobüsün bulunması olasılığından etkilenir.

Durak kapasitesi; yanaşma yeri sayısına, yanaşma yeri tasarımına, trafik yönetim ve denetim yöntemine bağlı bulunmaktadır.

Sonuç olarak, hat otobüs kapasitesi; en küçük durak kapasitesine, ekspres ya da otobüs gruplu gibi işletme yöntemlerine göre belirlenir.

4.1.2.2 Binme-İnme Süresi

Binme-inme süresi $[T(b-i)]$, en yoğun kapıdan yolcu inme-binme süresi ile kapıların açılma-kapanma süreleri toplamından oluşur:

$$T(b-i)=Y(i).t(i)+Y(b).t(b)+ t(\text{ç})$$

Burada, $Y(i)$: inen yolcu sayısı, $t(i)$: birim inme süresi (s/yolcu)

$Y(b)$: binen yolcu sayısı, $t(b)$: birim binme süresi (s/yolcu)

$t(\zeta)$: kapıların açılma-kapanma süresi (s).

Otobüs kapı sayısına göre yolcu başına binme-inme süreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Kapı açılışı için 2 saniye, kapanışı için 3 saniye uygun değerler olarak belirtilmektedir.

Tablo-4.1 Otobüs kapı sayısına göre yolcu başına binme-inme süreleri

Kapı sayısı	Binme süresi (s/yolcu)	İnme süresi (s/yolcu)
1	2.5	3.3
2	1.5	1.8
3	1.1	1.5
4	0.9	1.1
6	0.6	0.7

4.1.2.3 Yanaşma Yerini Boşaltma Süresi

Kapılar kapandığında, izleyen otobüsün yanaşabilmesi için, yerini boşaltması gerekir. Bu işlem otobüsün harekete geçmesi ve kendi boyu kadar yol almasıyla tamamlanır.

Bu süre için ABD'de yapılan etütlerde, 9-20 saniye aralığı belirlenmiştir. Başka bilgi olmaması durumunda ortalama 10 saniye değeri kabul edilebilir.

4.1.2.4 Binme-İnme Süresinin Değişkenliği

Yolcu talebinin otobüsler ve hatlar arasında dalgalanmasına bağlı olarak bütün otobüslerin bir durakta geçirdikleri süreler eşit değildir. Otobüsler için binme-inme sürelerinin değişkenliğinin otobüs kapasitesini etkiler. Kapasite belirlerken bu durumu göz önüne almak gerekir.

Binme-inme süreleri dağılımı normal dağılıma uymaktadır. Zirve değeri yüksek sivri dağılımlar küçük değişimleri, zirvesi düşük yassı dağılımlar büyük değişimleri göstermektedir.

Durak yanaşma yerlerinin kapasitesi, önceki otobüs yanaşma yerini boşaltır boşaltmaz yeni otobüsün girişiyle sağlanabilir. Ancak bu koşul, giriş yapacak otobüslerin beklemeleri yüzünden hızda düşme olması ve ek gelişmelerden dolayı dakiklikte zayıflama nedenleriyle uygun bulunmamaktadır. Sonuç olarak, bir otobüsün bütün yanaşma yerleri işgal edilmiş bir durakla karşılaşması sıklığını belirleyen **yetersizlik oranı** kavramı geliştirilmiştir.

Yetersizlik oranı, binme-inme süresi değişkenliği ile ortalama binme-inme süresinin birleşimi olarak bir işletme ek süresi oluşturulması için kullanılır. Bu süre ortalama binme-inme süresi ile yanaşma yerinin boşaltılması süresi üzerine eklenecektir. İşletme ek süresi ile yetersizliğin öngörülen bir orandan daha yüksek bir sıklıkta meydana gelmemesi koşulu belirlenmektedir. İşletme ek süresi, durağı kullanmak üzere planlanmış otobüs sayısı kapasitesine yaklaşması durumunda, bir otobüsün durak yetersizliği olasılığı yaratmaksızın, ortalama süresini aşabileceği en büyük

binme-inme süresidir. Öngörülen yetersizlik oranı küçüldükçe, işletme ek süresi ve dakiklik büyür, yanaşma yeri kapasitesi küçülür. Aksine izin verilen yetersizlik oranı büyüdükçe, işletme ek süresi ve dakiklik küçülür ve yanaşma yeri kapasitesi büyür.

Yanaşma yerinin kapasitesine yaklaşması durumunda, işletme ek süresi hesabı gerekir.

4.1.3 Durak Kapasitesi Hesabı

Durak kapasitesinin hesabı amacıyla, önce bir yanaşma yeri kapasitesinin hesaplanması ve bunun durağın içerdiği yanaşma yeri sayısına göre büyütülmesi gerekmektedir. Tablo 4.2, binme-inme süresine ve yanaşma yerini boşaltma süresi verilerine ve belirli varsayımlara göre yanaşma yeri otobüs kapasitelerini göstermektedir[15].

Tablo-4.2 Binme-inme süresine ve yanaşma yerini boşaltma süresi verilerine göre yanaşma yeri otobüs kapasiteleri

	Otobüsün yanaşma yerini boşaltma süresi (s)	
Binme-inme süresi (s)	10	15
15	116	100
30	69	63
45	49	46
60	38	26
75	31	30
90	26	25
105	23	22
120	20	20

4.1.3.1 Birden Fazla Yanaşma Yeri Bulunan Bir Durağın Kapasite Hesabında :

Yaygın olarak kullanılan lineer tasarımda kapasite, birbirini izleyen yanaşma yerlerinin birincisinden itibaren arkaya doğru hizmet etkinliklerinin sayı artışına bağlı olarak giderek azaldığını göstermektedir. Çünkü

-Arkadaki yanaşma yerleri daha az kullanılmaktadır.

-Yolcu otobüsün nerede duracağını bilmediği için gereğinden fazla hareket etmekte ve bu durum binme süresinin büyümesine neden olmaktadır.

-Sollama olanağı bulunmadığında arkadaki otobüslerin öndekinin gecikmesine bağlı olarak süre kaybedebilmesi söz konusudur.

Tablo 4.3'de, ABD ve Avrupa kentlerindeki deneyimlerin ışığında, arkadaki otobüsün öne geçemeyeceği varsayımına göre hat üzerindeki duraklarda, otobüslerin rassal ve gruplar halinde seyirlerine bağlı olarak, yanaşma yeri sayısı arttıkça etkinliğin artışı görülmektedir.

Tablo-4.3 Otobüslerin rassal ve gruplar halinde seyirlerine bağlı olarak, yanaşma yeri sayısına bağlı olarak etkinliğin artışı

Yanaşma yeri sayısı	Rassal gelişler		Grup halinde gelişler	
	Etkinlik	Birikimli etkinlik	Etkinlik	Birikimli etkinlik
1	%100	1.00	%100	1.00
2	%75	1.75	%85	1.85
3	%70	2.45	%80	2.65
4	%20	2.65	%25	2.95
5	%10	2.75	%10	3.00

Tablo 4.4’de, hat üzerindeki duraklarda, sinyal uygulaması bulunmaması durumunda, lineer yanaşma yerlerinin sayısına bağlı olarak, değişik binme-inme süreleri için en büyük otobüs kapasiteleri verilmiştir.

Tablo-4.4 Duraklarda, sinyal uygulaması bulunmaması durumunda lineer yanaşma yerlerinin sayısına bağlı olarak, değişik binme-inme süreleri için en büyük otobüs kapasiteleri

Binme-inme süresi (s)	Yanaşma yeri sayısı				
	1	2	3	4	5
30	69	120	169	182	189
60	38	66	93	101	104
90	26	46	64	69	72
120	20	35	49	53	55

4.1.4 Mevcut Durum

Beylikdüzü – Söğütlüçeşme arasında hizmet vermekte olan metrobüs, 7 ayrı hat düzeninde hizmet vermektedir.:

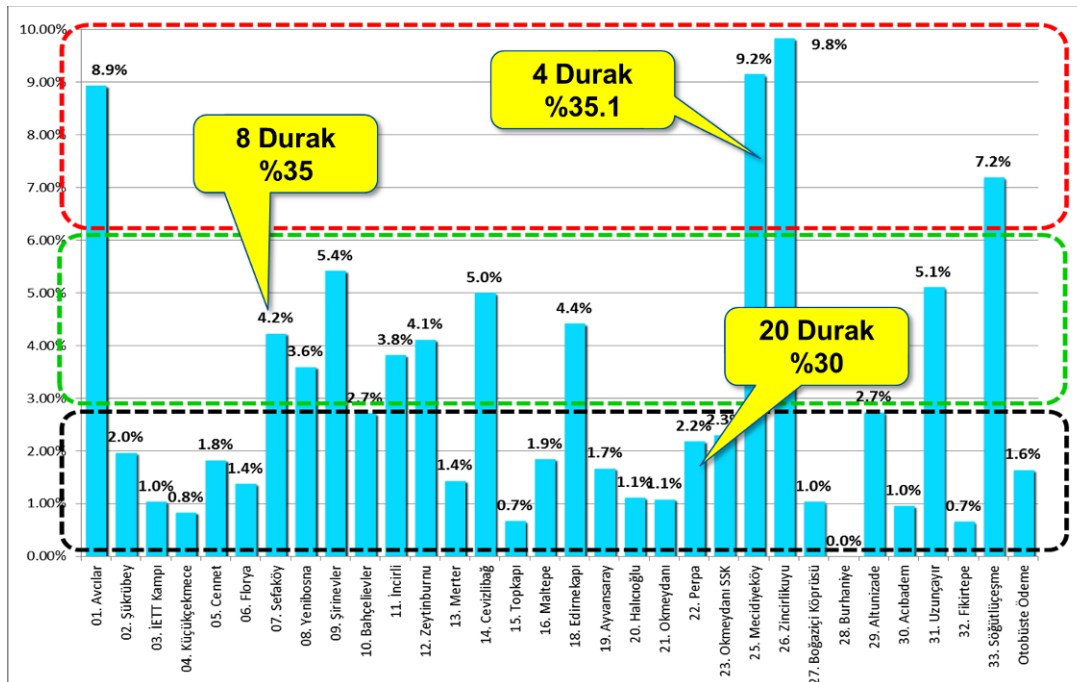
- 34 Avcılar-Zincirlikuyu
- 34A Söğütlüçeşme – Cevizlibağ
- 34B Beylikdüzü – Avcılar
- 34C Beylikdüzü – Cevizlibağ
- 34G Beylikdüzü – Söğütlüçeşme
- 34T Avcılar – Cevizlibağ
- 34Z Zincirlikuyu – Söğütlüçeşme

Bu hatlardan 34G 01:00-05:00, saatleri arasında hizmet verirken, diğer hatlar hem sabah zirvesi olan 07:00-09:00, hem de akşam zirvesi olan 18:00-20:00 saatleri arasında hizmet vermektedir. Sabah ve akşam saatlerinde duraklarda yolcu yığılmaları daha fazla görülmekte, özellikle bu saatler arasındaki hat kapasitesi daha büyük önem taşımaktadır. Zirve saatlerinde İETT tarafından ana duraklardan

mümkün olduğunca fazla metrobüs taşıtı gönderilmekte, ancak hat boyunca bazı kritik kesimlerin ve durakların kapasitesi yeterli gelmediği için, uzun taşıt konvoyları oluşmakta ve ticari hız düşmektedir. Dolayısıyla, her bir hat için kritik olan kesimin belirlenip, bu durağın kapasitesi kadar taşıt sevk edilmesi doğru bir işletmecilik yaklaşımı olacaktır.

4.1.4.1 Metrobüs Hatları İçin Kritik Durakların Belirlenmesi

Her bir metrobüs hattı için kritik durak, metrobüs taşıtlarının en uzun süre işgal etmek zorunda kaldıkları durak olarak tanımlanabilir. Taşıtların durağı işgal etmesinde önemli olan etkenler, duraktaki yanaşma yeri sayısı, durağın fiziki özellikleri ve durağa olan yolcu talebidir (iniş ve biniş). Dolayısıyla, taşıtların durağı işgal etme süreleri en uzun olan duraklar her bir hat kesimi için kritik olan duraklar olacaktır. Taşıtların durağı işgal etme süresi (t) = otobüs kapılarının açılma ve kapanma süresi + inme-binme süresi + otobüsün peronu boşaltma süresi olarak tanımlanabilir. Otobüs kapılarının açılma ve kapanma süresi duraktan durağa değişkenlik göstermeyen bir değerdir. Yolcuların inme-binme süresi otobüsün peronu boşaltma süresine nazaran daha büyük bir değer olduğu için taşıtların durağı işgal etme süresinin hesaplanmasında kritik olan veri olarak kabul edilebilir. Metrobüs hattının Avcılar-Zincirlikuyu arasındaki kesimindeki yolculuk talebinin %35,1'i Avcılar, Mecidiyeköy, Zincirlikuyu ve Söğütlüçeşme duraklarından olmaktadır (Şekil 4.1). Bu duraklar, bir hattın başlangıç/bitiş durağı olduğu takdirde, araçlardan inen yolcu olmayacağı düşünüldüğünde eğer hat üzerinde yoğun başka duraklar da mevcutsa, kritik durak olma özelliğini yitirmektedirler. Dolayısıyla, yolcuların hem iniş hem de biniş yaptıkları talep yoğun duraklar kritik durak olarak belirlenerek, bu duraklar için kapasite hesabı yapılmalıdır.



Şekil 4.1. Yolculuk taleplerinin duraklara oransal dağılımı

34 Avcılar-Zincirlikuyu hattında Mecidiyeköy durağı hem yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için (%9,2), hem de bir ara durak olduğu için kritik durak olarak kabul edilmiştir.

34A Söğütlüçeşme-Cevizlibağ hattında Zincirlikuyu durağı hem yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için (%9,8), hem de bir ara durak olduğu için kritik durak olarak kabul edilmiştir.

34B Beylikdüzü-Avcılar hattında başlangıç/bitiş durakları olan Avcılar ve Beylikdüzü yolcu talebi yoğun olan duraklardır. Bu hat kesimindeki diğer durakların yolculuk talebinin daha dengeli olduğu, varsayılarak, durak kapasitesi hesabı için Avcılar durağı kritik durak olarak kabul edilmiştir.

34C Beylikdüzü-Cevizlibağ hattında Avcılar durağı hem yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için (%8,9), hem de bir ara durak olduğu için kritik durak olarak kabul edilmiştir.

34G Beylikdüzü-Söğütlüçeşme hattında zirve saatlerde işletmecilik yapılmadığı için, hattın işletildiği saatlerde de kapasite konusunda herhangi bir sorun yaşanmadığından bu hat için herhangi bir hesap yapılması gerekli görülmemiştir.

34T Avcılar-Cevizlibağ hattında ara duraklardan Şirinevler durağı en yüksek yolcu talebine sahip olan durak (%5,4) olduğu için kritik durak olarak kabul edilmiştir.

34Z Zincirlikuyu- Söğütlüçeşme hattında ara duraklardan Uzunçayır durağı en yüksek yolcu talebine sahip olan durak (%5,1) olduğu için kritik durak olarak kabul edilmiştir.

4.1.4.2 Kritik Duraklar İçin Durak Kapasitelerinin Belirlenmesi

Metrobüs hattında işletilen Phileas, CapaCity and Citaro olmak üzere 3 tip otobüs bulunmaktadır. Bu otobüslerden Phileas ve CapaCityler'de 4, Citarolar'da 3 kapı bulunmaktadır. 3 kapı bulunan otobüslerde binme ve inme sürelerinin arttığı ve bunun da otobüslerin durakta bekleme sürelerini arttırdığı ve durak kapasitesini azalttığı bilinmektedir. Dolayısıyla kapasite hesabı, 4 kapılı olan Phileas ve CapaCity marka otobüsler esas alınarak yapılmıştır.

Durakların kapasiteleri belirlenirken, duraklar 3 ana sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir. Bunlardan birincisi, her bir hattın başlangıç ve son istasyonu olma özelliği taşıyan duraklardır. Bu durak tipi, bazı hatlar için başlangıç/son durağı olurken, bazı hatlar için de ara durak olma özelliği taşımaktadır. Beylikdüzü ve Söğütlüçeşme durakları hattın tümü için başlangıç/son durağı konumunda iken, Avcılar, Zincirlikuyu ve Cevizlibağ durakları ise ara durak olarak da hizmet vermektedirler. Bu duraklar başlangıç/son durağı olarak hizmet verdikleri takdirde, otobüsten yolcu inişi olmadığı

ancak ortalama 100 yolcunun otobüse bindiği kabul edilmiştir. İkinci durak tipi ise, başka bir hattın başlangıç/son durağı olan ancak hesaplanan hat için ara durak olma özelliği taşıyan hatlar ya da yolcu talebinin yoğun olduğu Mecidiyeköy, Uzunçayır, Şirinevler gibi duraklardır. Bu duraklarda da her bir araçtan 25 yolcunun inerek, 25 yolcunun bindiği kabul edilmiştir. Üçüncü durak tipi olarak, hat üzerindeki duraklarının çoğunluğunu oluşturan, yolcu talebinin daha az olduğu duraklardır. Bu duraklarda da 5 yolcunun araçtan inerek, 5 yolcunun araca bindiği kabul edilmiştir.

Beylikdüzü – Söğütlüçeşme hattı üzerindeki metrobüs duraklarına yanaşabilecek otobüs sayısını hesaplayabilmek için durakların uzunlukları İETT'den talep edilmiştir. İETT'den temin edilen veriler yanaşma yeri uzunluğunu içermemekte, durağın tamamının uzunluğundan oluşmaktadır. Dolayısıyla durak uzunlukları Google Earth © programı kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Ancak Avcılar – Beylikdüzü arasındaki kesim için yanaşma yeri uzunlukları hesaplamak mümkün olmamıştır. Bu kesimdeki yanaşma yeri uzunlukları, metrobüs hattı boyunca en sık rastlanan yanaşma yeri uzunluğu olan 60 metre olarak kabul edilmiştir. Söğütlüçeşme – Avcılar arasındaki hat kesiminde Burhaniye (18 metre) ve Boğaziçi Köprüsü (50 metre) duraklarının yanaşma yeri uzunlukları 60 metrenin altındadır. Bu duraklarda yolcu talebi düşük olduğu için (sırasıyla neredeyse %0,0 ve %1,0) yanaşma yeri uzunlukları yeterli görülebilir. Çoğu zaman otobüslerin Burhaniye durağında hiç durmadan yolculuklarına devam ettikleri görülmektedir. Ancak otobüsler İETT tarafından özellikle zirve saatlerde başlangıç durağından birbirini birkaç saniyelik aralıklarla takip eden taşıtlar halinde bir katar mantığıyla işletilmeye çalışıldığından, iki ve daha fazla sayıda otobüsün bu duraklara aynı zamanda yanaşamaması söz konusudur ve bu kesimlerde darboğaz oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle bu iki durakla ilgili bir yeniden planlama yapılması oldukça önemlidir. Hat kapasitesi hesaplanırken, bu iki duraktaki olumsuz durum ihmal edilmiştir. Ayrıca, hat üzerindeki diğer duraklarda en kısa 60 metrelik bir yanaşma yeri uzunluğu vardır. Bu durumda, Phileas marka otobüslerden 2 tanesi, CapaCity marka otobüslerden de 3 tanesi aynı anda bu duraklara yanaşabilmektedir. Başlangıç duraklarından bu sayıdan daha fazla sayıda otobüs içeren katarlar gönderildiği takdirde, ara durakların yanaşma yeri uzunlukları yeterli olmayacak ve durak yaklaşımlarında kuyruklanmalar meydana gelerek, hat kapasitesini azaltacaktır. 3 adet CapaCity marka otobüsten oluşan bir katar, 2 adet Phileas marka otobüsten oluşan bir kattan daha fazla yolcu taşıdığı için, kapasite hesaplamalarında temel olarak alınmıştır. Farklı türde otobüslerden oluşan katarlar kullanılmak zorunda kalındığında, taşınan yolcu sayısının düşeceği, sefer aralıklarının değişeceği ve buna bağlı olarak kapasitenin de etkileneceği düşünüülerek, gönderilecek katarlar için ayrı bir en iyileme çalışması yapılması yerinde olacaktır.

34 Avcılar-Zincirlikuyu hattında kritik durak olarak kabul edilen Mecidiyeköy, 126 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu durum aynı anda 3'den fazla otobüsün durakta durabilmesine imkân tanırsa da, 3'den fazla otobüsün kısa sürelerle sevk edilmesi daha kısa duraklarda kuyruklanmalara neden olacağı için, 3 otobüsün bu durakta aynı anda bulunabileceği göz önüne alınmalıdır. Mecidiyeköy, yolcu talebi

yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri ($25 * 1,1 + 25 * 0,9$) = 50 saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 60 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 90 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 * 3600 / 90 = 120$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $120 * 150 = 18000$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

34A Söğütlüçeşme-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Zincirlikuyu, 60 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu nedenle 3 otobüs bu durakta aynı anda bulunabilmektedir. Zincirlikuyu, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri ($25 * 1,1 + 25 * 0,9$) = 50 saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 60 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 90 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 * 3600 / 90 = 120$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $120 * 150 = 18000$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

34B Beylikdüzü-Avcılar hattında kritik durak olarak kabul edilen Avcılar, 60 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu nedenle 3 otobüs bu durakta aynı anda bulunabilmektedir. Avcılar, bir başlangıç/son durağı olduğu için, yolcu inişi olmadığı, buna karşın 100 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edilmektedir. Ancak yapılan gözlem çalışmalarında durağa tamamen boş olarak yanaşan bir otobüsün 30 saniye gibi bir süre içerisinde dolabildiği görülmüştür. Bu nedenle, yolcu binişleri için 30 saniyelik bir süre kabul edilmesi uygun olacaktır. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak, durağın başlangıç durağı olması da göz önünde tutularak 5 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 35 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3

otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 65 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 65 = 166$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $167 \times 150 = 24900$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

34C Beylikdüzü-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Avcılar, 60 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu nedenle 3 otobüs bu durakta aynı anda bulunabilmektedir. Avcılar, bir başlangıç/son durağı olmasına karşın, bu hat üzerinde bir ara durak konumunda olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 1,1 + 25 * 0,9) = 50$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleştirilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 60 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 90 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 90 = 120$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $120 \times 150 = 18000$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

34T Avcılar-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Şirinevler, 180 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu durum aynı anda 3'den fazla otobüsün durakta durabilmesine imkân tanısa da, 3'den fazla otobüsün kısa sürelerle sevk edilmesi daha kısa duraklarda kuyruklanmalara neden olacağı için, 3 otobüsün bu durakta aynı anda bulunabileceği göz önüne alınmalıdır. Şirinevler, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 1,1 + 25 * 0,9) = 50$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleştirilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 60 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 90 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 90 = 120$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $120 \times 150 = 18000$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

34Z Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme hattında kritik durak olarak kabul edilen Uzunçayır, 67 metrelik yanaşma yeri uzunluğuna sahiptir. Bu nedenle 3 otobüs bu durakta aynı anda bulunabilmektedir. Uzunçayır, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul

edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binışleri $(25 * 1,1 + 25 * 0,9) = 50$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 60 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 10 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 10 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 10 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 90 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 * 3600 / 90 = 120$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $120 * 150 = 18000$ yolcu/saat/yön olmaktadır.

4.1.5 Geliştirmeler Sonrası Durum

Projenin hayata geçirilmesi durumunda, taşıtların birbirlerini bir katar mantığıyla otonom olarak takip etmesi sağlanacak, bu da güvenli takip sürelerinin azalmasını sağlayacaktır. Taşıtların hızları arttıkça takip süresi değişmeyecek ancak seyir güvenliği açısından takip mesafeleri artacaktır. Otonom takip imkanı sayesinde taşıtların takip aralığının 1 saniye mertebesine indirilmesi teorik olarak mümkün olacaktır ancak seyir güvenliğini arttırmak için, bu aralığın 3 saniye olarak alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Taşıtların takip aralıklarının azalması otobüs konvoylarının durağı daha kısa bir sürede terk etmesini sağlayacak, dolayısıyla bir saatte daha fazla sayıda katar işletilmesi ve daha fazla yolcu taşınması mümkün olacaktır.

Proje kapsamında durakta duracak otobüslerin kapılarının denk düşeceği noktaların, taşıtların daha durağa gelmeden önce bilinmesi ve yolcuların da buna göre kendi konumlarını belirlemeleri planlanmaktadır. Bu durumda taşıtların iniş ve binışlerinin %20 civarında hızlanması beklenmektedir. Bu sayede birim iniş süresinin 0,99 saniye, birim binış süresinin de 0,72 saniye olacağı beklenmektedir. Bu hızlanma sayesinde yolcular otobüsün daha çabuk harekete hazır hale gelmelerini sağlayacak, dolayısıyla bir saatte daha fazla sayıda katar işletilmesi ve daha fazla yolcu taşınması mümkün olacaktır.

34 Avcılar-Zincirlikuyu hattında kritik durak olarak kabul edilen Mecidiyeköy, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 0,99 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,72 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binışleri $(25 * 0,99 + 25 * 0,72) = 42,75$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 52,75 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 61,75 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 * 3600 /$

61,75 = 174 otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $174 \times 150 = 26100$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %45 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

34A Söğütlüçeşme-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Zincirlikuyu, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 0,99 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,72 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 0,99 + 25 * 0,72) = 42,75$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 52,75 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 61,75 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 61,75 = 174$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $174 \times 150 = 26100$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %45 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

34B Beylikdüzü-Avcılar hattında kritik durak olarak kabul edilen Avcılar, bir başlangıç/son durağı olduğu için, yolcu inişi olmadığı, buna karşın 100 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. Yolcu binişlerinde %20 mertebesinde bir iyileştirme olacağı düşünüldüğünde, durağa tamamen boş olan bir otobüsün 24 saniye gibi bir süre içerisinde dolabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle, yolcu binişleri için 24 saniyelik bir süre kabul edilmesi uygun olacaktır. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak, durağın başlangıç durağı olması da göz önünde tutularak 5 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 29 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 38 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 38 = 284$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $284 \times 150 = 42600$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %71 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

34C Beylikdüzü-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Avcılar, bir başlangıç/son durağı olmasına karşın, bu hat üzerinde bir ara durak konumunda olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 1,1 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,9 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 0,99 + 25 * 0,72) = 42,75$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları

da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 52,75 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 61,75 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 61,75 = 174$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $174 \times 150 = 26100$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %45 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

34T Avcılar-Cevizlibağ hattında kritik durak olarak kabul edilen Şirinevler, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 0,99 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,72 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 0,99 + 25 * 0,72) = 42,75$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 52,75 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 61,75 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 61,75 = 174$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $174 \times 150 = 26100$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %45 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

34Z Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme hattında kritik durak olarak kabul edilen Uzunçayır, yolcu talebi yoğun olan bir durak olduğu için, 25 yolcunun indiği ve 25 yolcunun bindiği kabulü yapılmıştır. 4 kapıya sahip bir otobüste bir yolcunun 0,99 saniyede indiği ve yine bir yolcunun 0,72 saniyede bindiği kabul edildiğinde, toplam yolcu iniş ve binişleri $(25 * 0,99 + 25 * 0,72) = 42,75$ saniyelik bir süre içerisinde gerçekleşebilmektedir. Kapı açılma-kapanma süresi, taşıtlar dolu olduğundan, yolcuların zaman zaman gerçekleşen olumsuz davranışları da dikkate alınarak 10 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir otobüs 52,75 saniyelik bir süre içerisinde harekete hazır hale gelmektedir. Katardaki ikinci otobüsün ilk otobüsü 3 saniye, üçüncü otobüsün de ikinci otobüsü 3 saniye aralıkla aralıkla takip ettiği, üçüncü otobüs hareket ettikten 3 saniye sonra, yeni bir katarın ilk otobüsünün durağa yanaşabileceği kabul edilerek, 3 otobüsten oluşan bir katarın durağı işgal süresinin 61,75 saniye olduğu söylenebilir. Bu durumda, hattın otobüs kapasitesi, $3 \times 3600 / 61,75 = 174$ otobüs/saat/yön'dür. Yolcu kapasitesi de $174 \times 150 = 26100$ yolcu/saat/yön olmaktadır. Bu durumda, bu hat üzerinde %45 oranında bir kapasite artışı sağlanabileceği söylenebilir.

Projenin hayata geçirilmesi durumunda, taşıtların birbirlerini bir katar mantığıyla otonom olarak takip etmesi sağlanacak, bu da güvenli takip sürelerinin azalmasını sağlayacaktır. Taşıtların hızları arttıkça takip süresi değişmeyecek ancak seyir güvenliği açısından takip mesafeleri artacaktır. Otonom takip imkanı sayesinde taşıtların takip aralığının 1 saniye mertebesine indirilmesi teorik olarak mümkün olacaktır ancak seyir güvenliğini arttırmak için, bu aralığın 3 saniye olarak alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Taşıtların takip aralıklarının azalması otobüs konvoylarının durağı daha kısa bir sürede terk etmesini sağlayacak, dolayısıyla bir saatte daha fazla sayıda katar işletilmesi ve daha fazla yolcu taşınması mümkün olacaktır.

4.2 Otonom Konvoy Halinde Ulaşım Sağlayan Otobüslerin Yakıt Verimliliğinin Simülasyon Kullanılarak Araştırılması

Otonom konvoy halinde ilerleyen otobüslerin yakıt tüketimi açısından daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bunun için üç ana neden vardır. Bu nedenlerden birincisi, birbirini yakın takip eden araçların yakıt tüketiminde aerodinamik sürtünmenin iyileşmesi nedeni ile azalma olduğu gözlenmiştir[8]. Bundan dolayı konvoy halinde birbirini yakın takip eden otobüslerin daha az yakıt tüketmesi beklenmektedir. Otobüsler bağımsız bir şekilde otobüs durağına geldiğinde, durak dolu ise durağa yaklaşmak için beklemektedir. Durak boşaldıktan sonra ancak yaklaşabilmektedirler. Bu sebepten dolayı bu işlem birkaç dur kalk hareketi gerektirebilmektedir. Bir otobüs her fazladan durup kalkış sırasında fazladan enerji tüketmektedir. Bundan dolayı bir otobüs durağa gelip bir seferde durup yolcu alabilir ise daha verimli olacaktır. Otonom otobüsler hızlarını ayarlayarak durak boşaldıktan sonra durağa yaklaşabilir. Üçüncü neden ise otonom otobüsler en az yakıt tüketecek şekilde hızlanıp yavaşlayabilirler ve ortama uygun en verimli hızda gidebilirler. Bu raporda bu nedenlerden ilk ikisine simülasyonlar ile değinilecektir. Üçüncü neden için otobüs ve motor ile ilgili detaylı bilgi gerekmektedir. Bu bilgiler temin edildiğine detay analiz yapılabilecektir.

4.2.1 Hava Direncinden Dolayı Yakıt Verimliliğinin Değişmesinin Simülasyon Kullanılarak Araştırılması

Otobüs ve Otobüs Konvoyu Dinamik Modeli

Yakıt verimliliğini araştırmak için otobüsün bir dinamik modelini geliştirmek gerekmektedir. Otobüsün uzunlamasına dinamik denklemi aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$ma = F_i - F_{aero} - F_{yd} - F_{eğim}$$

Terimlerin açıklaması aşağıdaki gibidir:

$$F_i = \text{motordan gelen itme kuvveti}$$

$$F_{aero} = \text{hava sürtünme direnci}$$

$$F_{yd} = \text{yuvarlanma direnci}$$

$F_{eğim} = \text{yol eğimi kuvveti}$

Simülasyonlarda kullanılan parametre büyüklükleri ve birimleri aşağıdaki gibidir (yaklaşık değerler alınmıştır):

$$m = \text{otobüs kütlesi (100kişi dahil, kişi başı } \square 70\text{kg)} = 25050\text{kg}$$

$$a = \text{ileri yönde ivme(m/s}^2\text{)}$$

$$F_i = \text{motordan gelen itme kuvveti(N)}$$

$$F_{aero} = \text{hava sürtünme direnci(N)} = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$

$$\rho = \text{hava yoğunluğu(15}^\circ\text{C)} = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$C_d = \text{hava sürtüne katsayı} \square s \square (\text{tahmini}) = 0,868$$

$$A = \text{otobüs ön alan(tahmini)} = (2,706 \times 2,550) = 6,900\text{m}^2$$

$$F_{yd} = \text{yuvarlanma direnci(N)} = C_{yk} m g \cos(\theta)$$

$$C_{yk} = \text{yuvarlanma katsayı} \square s \square (\text{tahmini}) = 0,01$$

$$g = \text{yerçekimi ivmesi(m/s}^2\text{)} = 9,81$$

$$F_{eğim} = \text{yol eğimi kuvveti(N)} = m g \sin(\theta)$$

$$\theta = \text{yol eğimi(yokuş yukarı} \square \text{pozitif)}$$

Yukarıda 0,01 olarak alınan C_{yk} değeri literatürde belirtilen tahmini bir değerdir. Piyasadaki lastiklerin büyük bir bölümünün yuvarlanma katsayıları 0,006 ile 0,014 arasında değişmektedir[9]. Her ne kadar yuvarlanma direnci hıza bağımlı olsa da bunun etkisi genelde 80-100km/saat hızlardan sonra ortaya çıkmaktadır[13]. Bu sebepten dolayı analizde yuvarlanma direncinin hıza bağımlılığı ihmal edilecektir. Otobüsün şekli hem kendi hava direnci katsayısını hem de arkası ve önündeki otobüslere etkisini değiştirmektedir[8]. Jadavpur Üniversitesinde Debojyoti Mitra ve Asis Mazumdar dört araçtan oluşan konvoylar için rüzgâr tüneline hava direnci testleri yapmışlardır[10]. Konvoy içi araçlar arası mesafe araç uzunluğunun 0,4 katı olarak alınmıştır. Deneylerde rüzgâr hızı 82.8km/saat olarak kullanılmıştır. Araç sayısı arttıkça direnci katsayılarının azaldığı görülmüştür. Direnç katsayıları aşağıdaki gibi bulunmuştur:

Araç Sırası	Araba Konvoyu (C_d)	Otobüs Konvoyu (C_d)
Araç 1	0,331	0,868
Araç 2	0,273	0,602
Araç 3	0,225	0,424
Araç 4	0,284	0,521

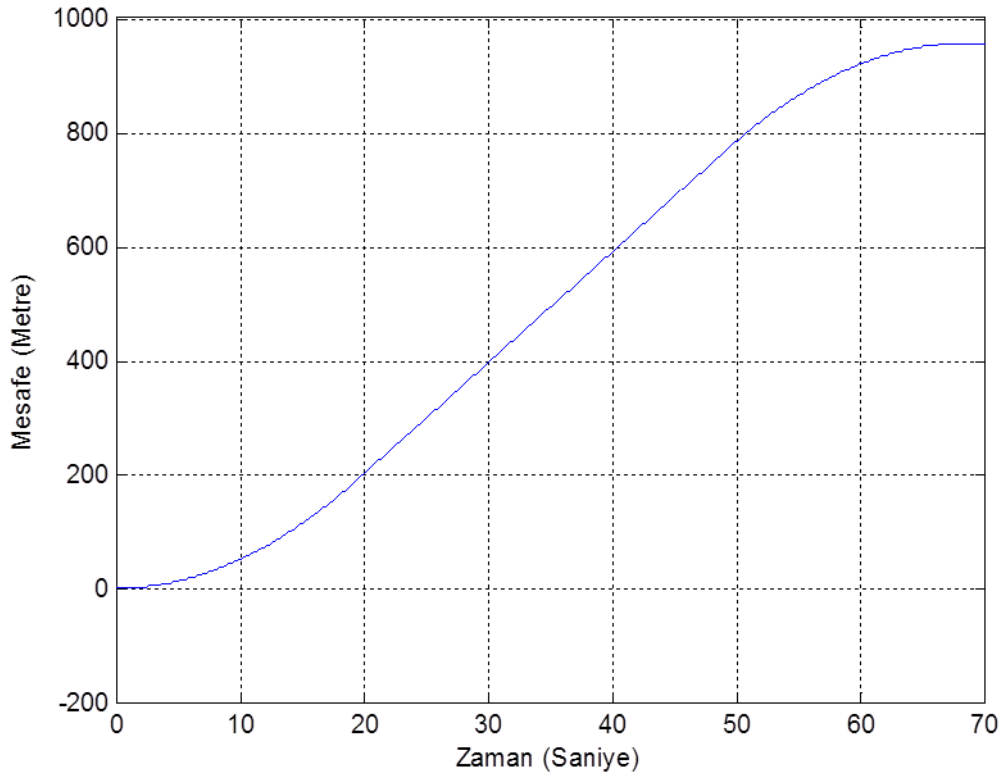
Tablo 4.5. Konvoy içindeki araçların hava direnci katsayıları.

Çeşitli otobüslerle yapılan deneylerde[11], yakıt enerjisinin %25'inin tekerleklere ulaştığı görülmüştür. Tekerleğe ulaşan enerji ile araçlar hareket etmektedir. Bu enerji ise hareket ederken yuvarlanma direncine ve hava direncine kaybedilmektedir. Ayrıca fren yapıldığında bu enerji fren balatalarında ısıya dönüşmektedir. Otonom bir konvoy kullanılıncaya bu enerji kayıplarından iki tanesi azaltılabilmektedir. Azaltılabilecek enerji kayıplarından ilki hava direnci nedeniyle kaybedilen enerjidir. Tablo 4.5'de görüldüğü gibi takip eden otobüslerin hava direnç katsayıları daha düşüktür. Bundan dolayı konvoy halinde ilerleyen otobüslerde yakıt sarfiyatı düşecektir. Otonom konvoy ile azaltılabilecek enerji kayıplarından ikincisi ise frenleme nedeniyle oluşan kayıplardır. Özellikle durakta başka bir otobüs bulunduğunda gelen otobüsler duraktan önce durup tekrar hareket ederek fazladan yakıt sarf etmektedirler. Her frene basış bir yakıt kaybıdır. Bunu azaltmanın iki yöntemi bulunmaktadır. Birincisi, aynı anda durağa birden fazla otobüsün yaklaşması ve aynı anda uzaklaşmalarıdır. Böylece duraktan hem çok miktarda yolcu alınacaktır hem de otobüsler birden fazla kere durmak zorunda kalmayacaktır. Frenleme açısından otonom konvoylar ile gerçekleştirilecek ikinci değişiklik ise durak dolu olduğu zaman yaklaşan otobüslerin hızını yavaşlatması ve tam duraktaki otobüsler kalkarken durağa yanaşmasıdır. Böylece bir sefer fren yapılarak yakıt tasarrufu sağlanacaktır.

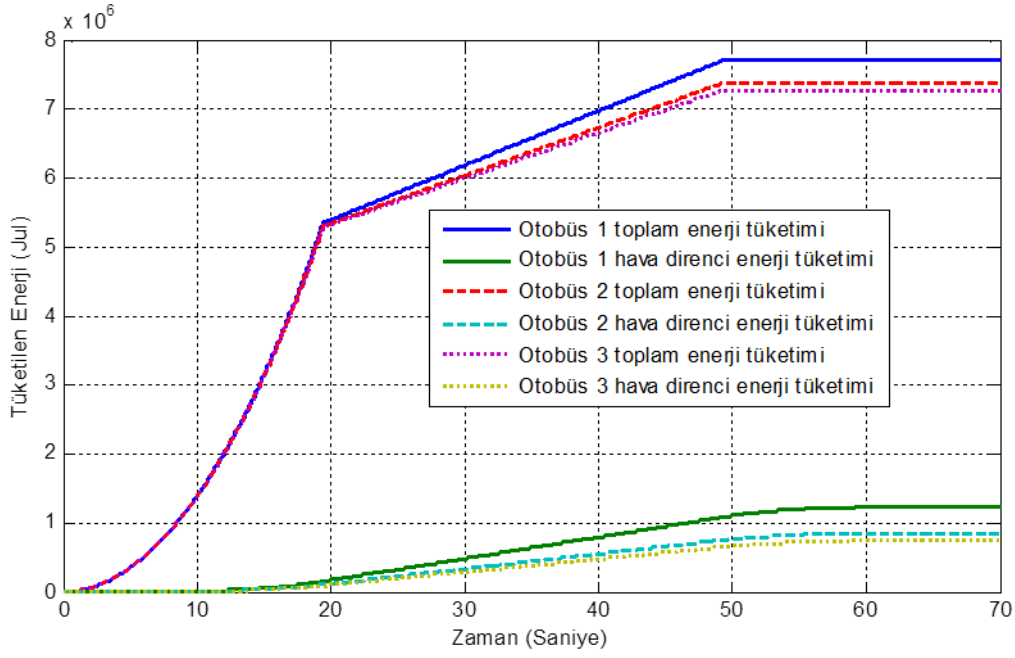
Konvoy Otobüsleri ile Bağımsız Otobüslerin Hava Direncinden Dolayı Verimliliklerindeki Farkın İncelendiği Simülasyonlar

Konvoy halinde kullanılan otobüslerin bağımsız otobüsler ile yakıt tüketimi açısından karşılaştırılması için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonların hepsi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de simülasyon yapılan bir otobüsün 1. duraktan 2. durağa ulaşması gösterilmiştir. Metrobüs hattındaki duraklar arasındaki mesafeler değişmekle beraber ortalama mesafe 957 metre olduğu için simülasyonlardaki duraklar arasındaki mesafeler 957 metre olarak alınmıştır. Otobüsün hızlanma ve yavaşlama ivmesi 1 metre/saniye olarak alınmıştır. Otobüsün sabit hızı 70km/saat olarak alınmıştır. Konvoy halinde ilerleyen otobüsler arasındaki mesafe sürekli olarak 4,8 metre olarak tutulmaktadır. Şekil 4.2'deki otobüs 1. otobüs olduğu için konvoydaki öteki üç otobüs şeklindeki eğriyi 4,8 metre geriden aynen takip etmektedir. Konvoydaki otobüsler arasındaki tek fark hava direnci katsayısıdır. Tablo 4.5'deki hava direnç katsayıları dört otobüslük konvoylar içindir. Burada yapılan simülasyonda üç otobüslük konvoy olduğu için tablodaki en büyük üç sürtünme katsayısı alınmıştır. Yani birinci, ikinci ve dördüncü otobüslerin sürtünme katsayıları buradaki üç otobüsün katsayılarını oluşturmaktadır. Şekil 4.3 konvoydaki otobüslerin her birinin eğrideki zamana kadar tekerlerde tükettiği enerji görülmektedir. Beklendiği gibi hava direncinin az olduğu otobüslerin tükettiği enerji daha düşüktür. Ayrıca hava direncinin ne kadar enerjiye mal olduğu da Şekil 4.3'de görülmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta, şekilde tüketilmiş olarak gösterilen enerji tekerleklere

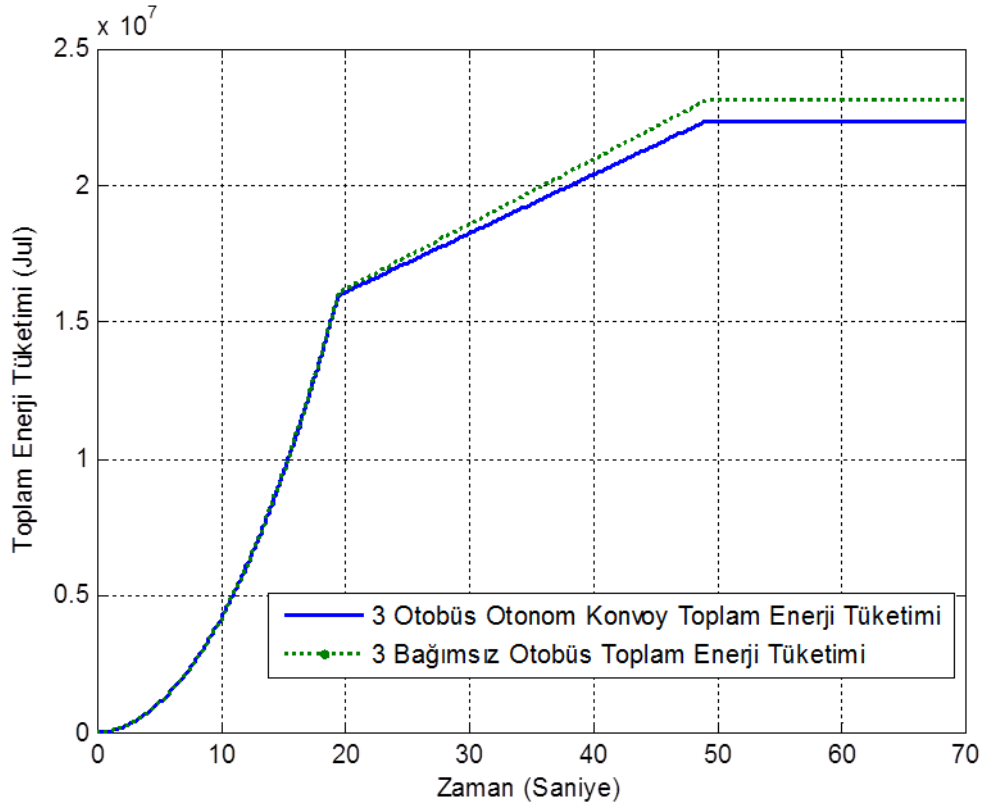
ulaşan enerjidir. Aslında otobüsün motorunda bu enerjinin yaklaşık 4 katı tüketilmektedir. Şekil 4.4'de ise konvoy halinde hareket eden üç otobüs ile bağımsız hareket eden 3 otobüsün bir duraktan bir sonraki durağa ulaşması sırasında tükettikleri enerji karşılaştırılmaktadır. Bütün otobüsler aynı şekilde hızlanıp yavaşlamaktadır fakat bağımsız otobüsler arasındaki mesafe çok olduğu için hava direnci açısından birbirlerine fayda sağlamamaktadırlar. Şekil 4.4'teki sonuçlara göre, hava direnci farkları sayesinde, konvoy halinde hareket etmek yakıt tüketiminde %3,33 verim artışı sağlamıştır.



Şekil 4.2. Otobüsün bir duraktan başka bir durağa ulaşması



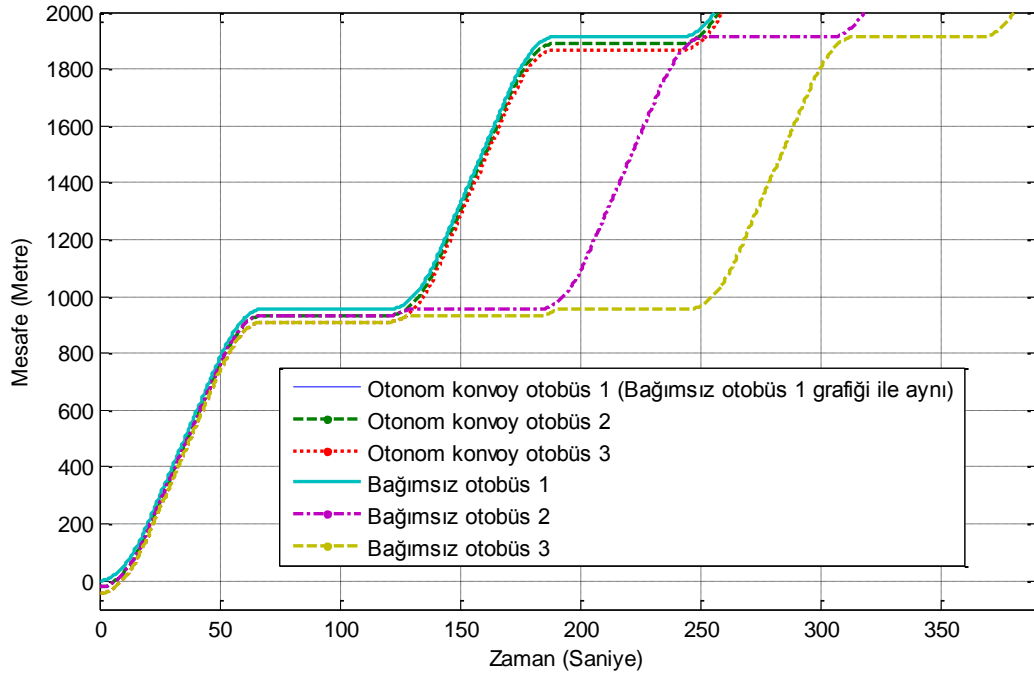
Şekil 4.3. Dört otobüsten oluşan konvoydaki otobüslerin her birinin tükettiği enerji.



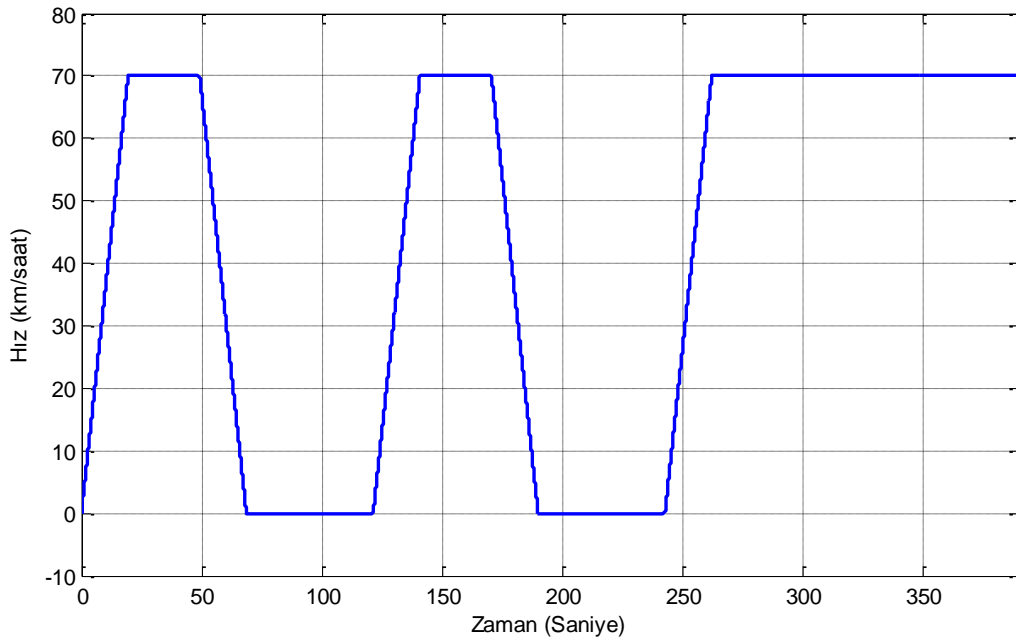
Şekil 4.4. Konvoy halinde hareket eden ve bağımsız hareket eden otobüslerin enerji tüketimi.

Konvoy Otobüsleri ile Bağımsız Otobüslerin Durup-Hızlanmaktan Dolayı Verimliliklerindeki Farkın İncelendiği Simülasyonlar

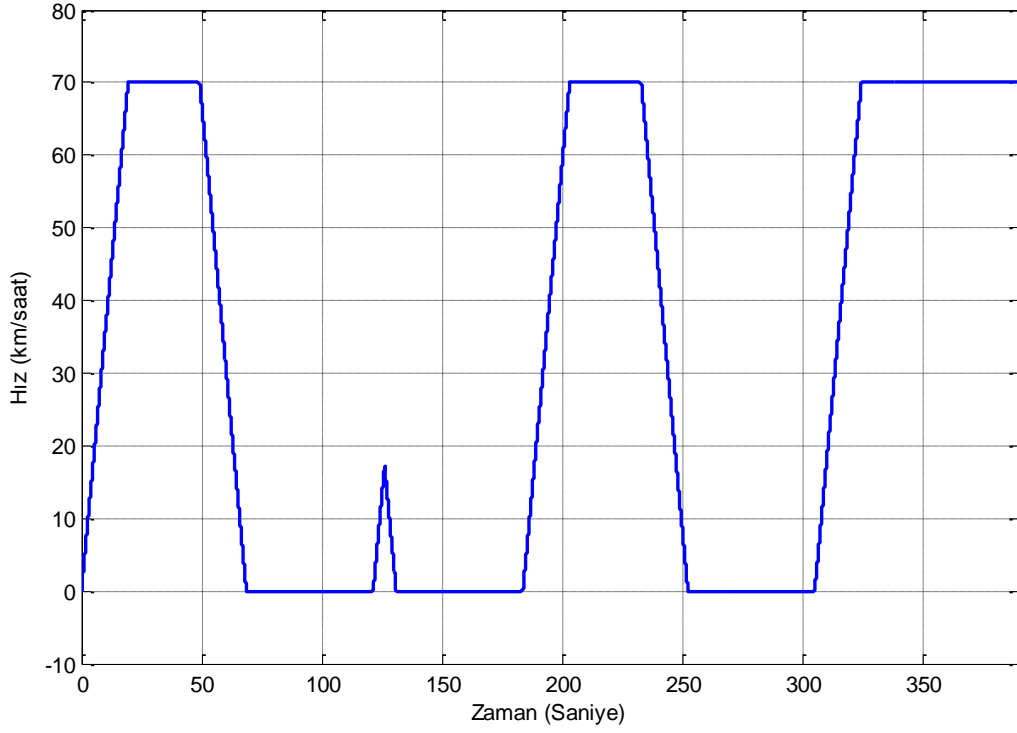
Bu bölümde konvoy halinde hareket eden otobüslerin bağımsız hareket eden otobüslere göre daha az durup hızlanmasının ne kadar yakıt tasarrufu sağlayacağı araştırılacaktır. Şu andaki İstanbul Metrobüs sisteminin çalışmasının tam bir modeli bulunmadığından dolayı karşılaştırma iki tür otonom otobüs sistemi ile yapılacaktır. Birinci otonom sistemde beraber hareket eden üç otonom otobüs bulunmaktadır. Duraklarda üç otobüsün aynı anda durabileceği yer bulunduğu varsayılmaktadır. Böylece otobüsler aynı anda durup aynı anda harekete geçmektedir. İkinci otonom sistemde ise yine üç otobüs aynı anda harekete geçmektedir fakat duraklarda bir otobüsün durabileceği yer olduğu varsayılmaktadır. Bundan dolayı durakta aynı anda sadece bir otobüs yolcu alabilmektedir. Durakta yolcu indirip bindirme süresi 52,75 saniye olarak varsayılmıştır. Böylece ilk otobüs durduktan sonra 52,75 saniye bekledikten sonra harekete geçmektedir. İkinci otobüs ise birinci otobüs kalktıktan sonra birinci otobüsün ayrıldığı yere geçecektir. Başka bir deyişle 22,8 metre daha ilerleyip yolcu alacaktır. Bunun sebebi otobüsler arası mesafenin en az 4,8 metre olarak kabul edilmesi ve otobüsün uzunluğunun 18 metre olarak kabul edilmesidir. Şekil 4.5’de birinci otonom sistem ile ikinci otonom sistemin duraklardan yolcu almasının karşılaştırılması görülmektedir. İlk üç eğri birinci otonom sistemdeki üç otobüsün beraber hareket etmesini göstermektedir. Dördüncü, beşinci, ve altıncı eğriler ikinci otonom sistemdeki üç otobüsün hareketini göstermektedir. Bu eğrilere otobüsler sırayla durakta durduğu için her biri ayrıca durakta 52,75 saniye durmaktadır. Şekil 4.6,4.7,4.8’de birinci, ikinci, ve üçüncü otobüslerin hız grafikleri bulunmaktadır. Mesela Şekil 4.8 üçüncü otobüsün hız grafiğini gösterdiği için tek otobüslük yeri olan durakta üç kere durup hareket etmektedir. Fakat Şekil 4.5’te görüldüğü gibi bu fazladan durup hareket etme sadece bir durakta gerçekleşmektedir. Bunun sebebi otobüsler arası mesafe bir kere açılınca ve bütün otobüsler aynı şekilde hızlanıp yavaşlayınca, otobüsler bir sonraki durağa vardığında önceki otobüs tam hareket etmektedir. Dolayısıyla otonom sistemde otobüsler bağımsız hareket edince bir daha karşılaşmamaktadırlar. Otonom konvoy otobüsleri ile bağımsız otonom otobüslerin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması Şekil 4.9’da görülmektedir. Bu şekilde otobüslerin iki durak ilerledikten sonra tükettikleri toplam enerjiler karşılaştırılmaktadır. Otonom konvoy ile bağımsız otobüslerden oluşan konvoy beraber hareket ettikten sonra ilk durağa varduktan sonra bağımsız otobüsler arasındaki mesafe açılmaktadır. Bundan dolayı birinci gruptaki otobüslere göre ikinci gruptaki otobüslerden sonuncusu ikinci durağa daha geç ulaşmaktadır. Yakıt tüketimleri karşılaştırıldığında üç otobüslük konvoy üç bağımsız otobüse göre %1,97 daha verimlidir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise bu hesapta bütün otobüslerin hava direnci eşit alınmıştır. Bunun sebebi sadece durup hareket etmenin etkisinin görülmek istenmesidir.



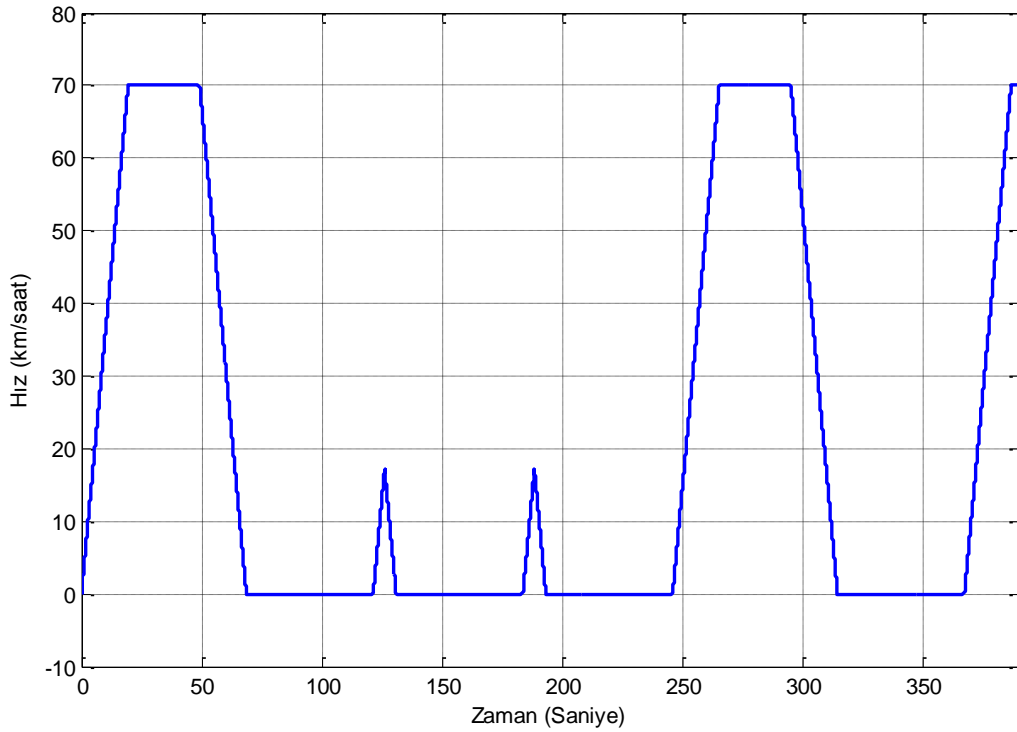
Şekil 4.5. Otonom konvoy otobüsler ile bağımsız otobüslerin duraklardan yolcu almasının karşılaştırılması.



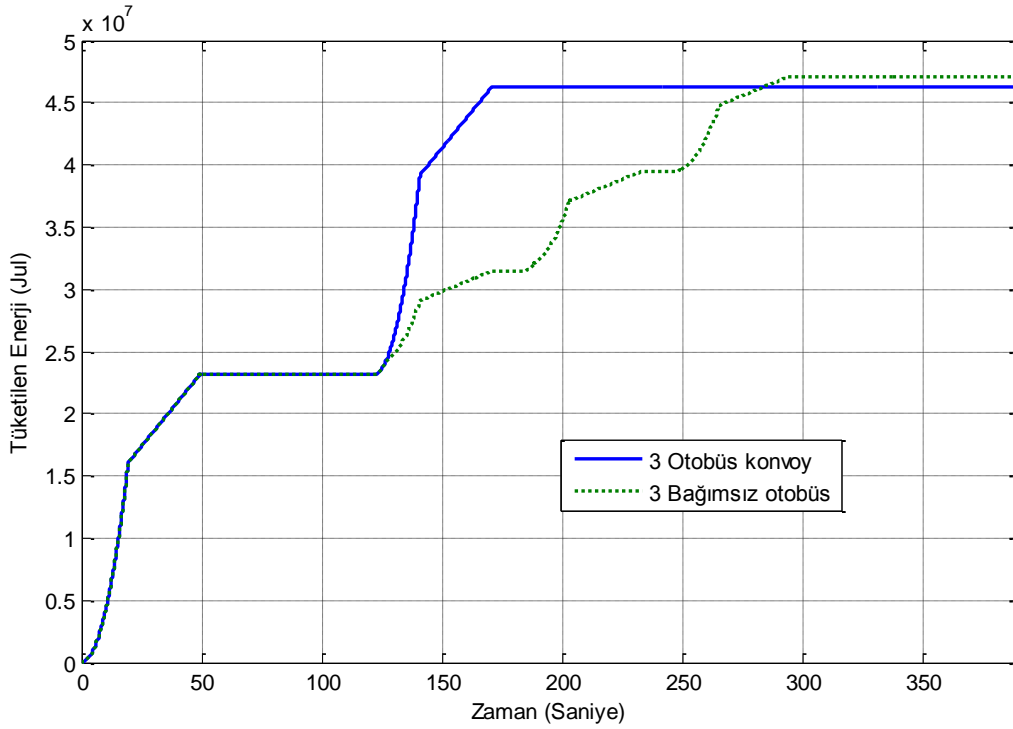
Şekil 4.6. Birinci bağımsız otobüsün hız grafiği.



Şekil 4.7. İkinci bağımsız otobüsün hız grafiği.



Şekil 4.8. Üçüncü bağımsız otobüsün hız grafiği.



Şekil 4.9. Otonom konvoy otobüsler ile bağımsız otobüslerin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılması.

4.3 Otonom Konvoy Halinde Ulaşım Sağlayan Otobüsler ile Bağımsız Otobüslerin Karbon Dioksit Salınımı Açısından Karşılaştırılması

Önceki iki bölümde görüldüğü üzere otonom konvoy halinde ulaşım sağlayan otobüsler bağımsız otobüslere göre yakıt tüketiminde yaklaşık %5 tasarruf sağlayabilecektir. Bu hesaplarda araç motor ve vites eğrileri dikkate alınmadı, bu özelliklerin de dikkate alınması ve daha hassas bir optimizasyon ile literatür bu rakamın % 10 veya daha üstüne çıkabileceğini göstermektedir[13].

Körüklü bir otobüsün 100 km'de dizel yakıt tüketimi yaklaşık 48 litredir[11]. Bir litre dizel yakıldığında 2.67 kg karbon dioksit ortaya çıkmaktadır[12]. Dolayısıyla bir otobüs 100 km'de yaklaşık 128 kg karbon dioksit ortaya çıkarmaktadır. %5 tasarruf hesaba katılırsa ve konvoy halinde ulaşım sağlandığında, her otobüs için her 100km yol alındığında, karbon dioksit salımı 6,5 kg azalacaktır. Metrobüs hattında yılda yaklaşık 45 milyon km yapılmaktadır. Bu da yaklaşık 2925 t luk bir karbon salımı azalmasına karşılık gelmektedir.

Yıllık yakıt sarfiyatı kazancı ise 1,080,000 litredir.

4.4 Olası İş gücü kazancı

Söğütlüçeşme-Beylikdüzü metrobüs hattı kısa zaman içerisinde İstanbul'un ulaşım sisteminde önemli bir rol üstlenmiş ve taşımadaki payı %5 düzeylerine ulaşmıştır. Bu düzey, İETT otobüsleri dışında en yüksek yolcu taşıyan kamu işletme biçimi olmasını sağlamıştır. Otobüslerin birbirini otonom takip etmesi sayesinde sağlanabilecek

kapasite artışı, metrobüsün kentiçi ulaşımındaki payını daha da yukarılara çekebilecektir. Bunun yanı sıra, taşıt kapılarının önceden belirlenen noktalarda açılıp kapanması ve otonom takip özelliği sayesinde seyahat sürelerinin de kısılacağı, dolayısıyla da işgücü kazancı sağlayacağı öngörülmektedir. Her bir hat için zirve saatteki ortalama seyahat süreleri hesaplanırken, duraklar 3 ana sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir. Bunlardan birincisi, her bir hattın başlangıç ve son istasyonu olma özelliği taşıyan duraklardır. Bu durak tipi, bazı hatlar için başlangıç/son durağı olurken, bazı hatlar için de ara durak olma özelliği taşımaktadır. Beylikdüzü ve Söğütlüçeşme durakları hattın tümü için başlangıç/son durağı konumunda iken, Avcılar, Zincirlikuyu ve Cevizlibağ durakları ise ara durak olarak da hizmet vermektedirler. Bu duraklar başlangıç/son durağı olarak hizmet verdikleri takdirde, otobüsten yolcu inişi olmadığı ancak ortalama 100 yolcunun otobüse bindiği kabul edilmiştir. İkinci durak tipi ise, başka bir hattın başlangıç/son durağı olan ancak hesaplanan hat için ara durak olma özelliği taşıyan hatlar ya da yolcu talebinin yoğun olduğu Mecidiyeköy, Uzunçayır, Şirinevler gibi duraklardır. Bu duraklarda da her bir araçtan 25 yolcunun inerek, 25 yolcunun bindiği kabul edilmiştir. Üçüncü durak tipi olarak, hat üzerindeki duraklarının çoğunluğunu oluşturan, yolcu talebinin daha az olduğu duraklardır. Bu duraklarda da 5 yolcunun araçtan inerek, 5 yolcunun araca bindiği kabul edilmiştir. Bu verilere dayanarak, otobüslerin her bir durakta harcadıkları süre elde edilmiştir. Otobüslerin durak aralarında hareket halindeyken harcadıkları süreler de hat boyunca 70 km/sa sabit hızla hareket ettikleri kabulüne göre elde edilmiştir. Mevcut durumda otobüslerin hızlanma ivmeleri ortalama 0,5 m/s², yavaşlama ivmeleri de ortalama 1,5 m/s² kabul edilmiştir. Yapılacak çalışma sonucunda, otonom hareketin sağlanmasıyla ivmelerde de %20'lik bir iyileşme olacağı öngörülmüş, dolayısıyla hızlanma ve yavaşlama ivmeleri sırasıyla ortalama 0,6 m/s² ve ortalama 1,8 m/s² alınmıştır. Otobüslerin duraklarda ve durak aralarında harcadıkları sürenin toplamı da ortalama seyahat süresini oluşturmaktadır. Ancak göz ardı edilmemesi gereken nokta, hesaplanan ortalama seyahat sürelerinin ideal koşullarda gerçekleşeceği, pratikte özellikle Boğaz geçişi esnasında 70 km/sa'lık sabit hız korunamamakta ve/veya katarlaşmalar sonucunda istasyon yaklaşımlarında hızlar önemli ölçüde düşebilmektedir.

34 Avcılar-Zincirlikuyu hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 52 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 48 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 4 dakikalık, bir günde toplam 8 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

34A Söğütlüçeşme-Cevizlibağ hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 42 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 39 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 3 dakikalık, bir günde toplam 6 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

34B Beylikdüzü-Avcılar hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 16 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 15 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 1 dakikalık, bir günde toplam 2 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

34C Beylikdüzü-Cevizlibağ hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 44 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 42 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 2 dakikalık, bir günde toplam 4 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

34T Avcılar-Cevizlibağ hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 28 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 26 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 2 dakikalık, bir günde toplam 4 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

34Z Zincirlikuyu-Söğütlüçeşme hattında zirve saatte ortalama seyahat süresi 19 dakika olarak hesaplanmıştır. Otobüslerin katar halinde otonom olarak hareketi ve taşıt kapılarının açılacağı yerlerin bilinmesi sayesinde zirve saatte ortalama seyahat süresinin 18 dakikaya ineceği hesaplanmıştır. Bu da bu hattı kullanan yolcu başına zirve saatte 1 dakikalık, bir günde toplam 2 dakikalık bir zaman ve işgücü kazancı oluşturacaktır.

Bunun yanı sıra, ilerideki aşamalarda katar halinde otonom olarak hareket eden otobüslerin yalnızca en öndeki taşıtında sürücü bulunması hedeflenmektedir. Mevcut durumda, metrobüs sisteminin kapasitesi, bölüm 4.1'de de gösterildiği üzere, 34, 34A, 34C, 34T, 34Z hatları için 120 otobüs/saat/yön, 34B hattı için de 166 otobüs/saat/yön'dür. Dolayısıyla ihtiyaç duyulan sürücü sayıları da otobüs sayısına eşit olacaktır. Katar halinde otonom olarak hareket eden otobüslerin kapasitesi ise 34, 34A, 34C, 34T, 34Z hatları için 174 otobüs/saat/yön, 34B hattı için de 284 otobüs/saat/yön olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, yalnızca öndeki araçta sürücü bulunması sağlandığında, 34, 34A, 34C, 34T, 34Z hatlarında 58 sürücü/saat/yön, 34B hattında da 94,7 sürücü/saat/yön yeterli gelecektir. Dolayısıyla 34, 34A, 34C, 34T, 34Z hatlarında 62 sürücü/saat/yön, 34B hattında da 71,3 sürücü/saat/yönlük bir işgücü kazancı sağlanabilecektir.

5. İŞ PAKETLERİ TANITIMI

Raporun bu bölümünde Metrobüs Hatlarında Akıllı Ulaşım Teknolojilerinin Kullanılması ile Verimliliğin Artırılması için yapılması gerekenler bir iş planı şeklinde özetlenmiştir. İş planı üç değişik aşamalı olarak düzenlenmiştir. Bu şekilde bazı proje kazançlarının daha kısa sürede elde edilmesi hedeflenmiştir. Proje aşamaları ve süreleri aşağıda sıralanmıştır.

- Birinci aşama (0-24 Ay)
 - Sistem optimizasyonu, yönetim ve yolcu bilgilendirme sistemi kurulması
 - İdeal hızlanma ve yavaşlama eğrileri ile ideal hız bilgisinin sürücüyeye verilmesi
 - Dinamik haberleşme ve sinyalizasyon sistemi kurulması
 - Duraklara manuel yanaşma sistemleri kurulması
- İkinci Aşama (18-36 Ay)
 - Araçların gaz ve fren sistemlerinin otomatik kumandalı hale getirilmesi
 - Araç sensörleri ve optimizasyon algoritması ile yazılım simülasyonu, donanım simülasyonu ve konvoy sürüşü gerçekleştirilmesi
 - Durak pozisyonlarına otomatik yanaşma ve kapıların aynı anda açılıp, kapanması
- Üçüncü Aşama (24-48 Ay)
 - Yolu algılama sistemi (kamera, lidar ya da yola döşenecek manyetik çivi sistemi ve otobüs altı endüktif sensör) entegre edilerek şerit takibinin devreye alınması
 - Direksiyon sistemi ile tam otonom otobüs konvoyları elde edilmesi

Birinci aşama çalışmasının 24 ay sürmesi planlanmıştır.. Mevcut metrobüs hattında ve otobüslerde hızla devreye alınacak çalışmalarla daha konforlu, güvenli ve verimli bir metrobüs yolcu taşımacılığı deneyiminin elde edilmesi hedeflenmiştir. Birinci aşama çalışmalarında otobüsler arası ve otobüs durak arası haberleşme ve sinyalizasyon sistemi oluşturulacaktır. Metrobüs hattı çalışması yani otobüs konvoylarının zamanlaması simülasyonlar ve optimizasyon çalışmalarıyla en verimli hale getirilecektir. Mevcut metrobüs yönetim sisteminde güncellemeler yapılarak bir yolcu bilgilendirme sistemi de devreye alınacaktır. Birinci aşama sırasında otobüsler sürücüler tarafından sürülecek ve yönlendirilecektir. Önceden hazırlanan ideal hızlanma ve yavaşlama eğrileri sürüş esnasında ek bir gösterge ile takip edilmesi istenen ideal hız olarak sürücüyeye iletilecektir. Birinci aşamada sürücüyeye durağın hangi bölgesine yanaşması gerektiği ek gösterge paneli kullanılarak iletilecektir.

İkinci aşama çalışmaları birinci aşama çalışmalarının son altı aylık bölümünde devreye girecektir. Bu aşamada otobüslerin boyuna yönde gaz ve fren kontrolleri otomatik olarak yapılacaktır. Bu amaçla öncelikle otobüslerin gaz ve fren sistemleri elektronik kumandalı hale getirilecektir. Bu amaçla otobüslere adaptif seyir kontrolü ve çarpışma uyarı ve engelleme sistemi eklenmesi planlanmaktadır. Otobüslere bu amaçla kısa ve uzun menzilli radar ve lidar sensörlerini takılması planlanmaktadır. Otobüslerdeki araçlar arası haberleşme olanağı da kullanılarak kooperatif adaptif seyir kontrolü devreye alınarak otobüslerin boyuna yönde konvoy olarak otomatik

olarak hareket etmesi sağlanacaktır. Otobüs konvoylarının duraklara konvoy halinde otomatik olarak yanaşması, tüm kapıların aynı anda açılıp kapanması ve konvoyun duraktan beraber kalkması planlanmıştır. İkinci aşamada sürücüler otobüsün sadece direksiyonunu kontrol edeceklerdir. Aracın hızlanma ve frenlemesi ve duraklara yanaşma ve duraklardan kalkış otomatik olarak yapılacaktır.

Üçüncü aşama çalışmaları projenin ikinci yarısını kapsayacak şekilde ayarlanmıştır. Üçüncü aşamada otobüslerin yönlendirilme işlemi de otomatik hale getirilecektir. Sürücünün tek görevi acil durumlarda müdahale şeklinde olacaktır. Otobüslerin direksiyon sistemi elektronik kumandalı hale getirilecektir. Kamera, lidar ya da yola döşenecek manyetik çivilerle takip edilmesi gereken yol algılanacak ve direksiyon kontrolü ile otobüs konvoyları metrobüs hattını tam otonom olarak takip edebileceklerdir. Bu aşamanın sonunda akıllı bir metrobüs ulaşım sistemi ortaya çıkmış olacaktır.

İş planının detaylarına geçmeden önce 48 aylık önerilen proje çalışması sonucunda elde edilecek akıllı bir metrobüs ulaşım sistemi için hatta ve otobüslerde yapılması gerekli değişiklikler aşağıdaki başlıklar altında anlatılmaktadır.

Kullanılan Otobüslerin Elektronik Kumandalı Hale Getirilmesi

Metrobüs hatlarında kullanılacak otobüslerin boyuna yönde kontrolünü sağlayan gaz ve fren sistemleri ve yanıl yönde kumandayı sağlayan direksiyon sistemi elektronik kumandalı (drive-by-wire) hale getirilmelidir. Elektronik kumandalı otobüslere eklenecek kontrol ünitesinin sağlayacağı komutlarla boyuna yönde hızlanma/yavaşlama ve yanıl yönde yolun takibi otomatik olarak yapılabilecektir. Şu anda kullanılan tüm otobüslerde gaz pedalı elektronik kumandalıdır. Küçük bir ara devre eklenmesi ile gaz girişi tamamen otomatik hale getirilebilir. Elektronik fren gücü dağıtımı özelliği olan otobüslerde fren kontrol sistemi üreticisinin freni elektronik kumandalı hale getirmesi mümkündür. Adaptif seyir kontrolü olan araçlarda sistemdeki radar sensöründen alınan bilgiler kullanılarak araç öndeki araçla takip zamanını otomatik olarak ayarlayabilecek şekilde gaza ve frene basabilmektedir. Ağır vasıtalarda çarpışma uyarı ve engelleme sistemi (collision warning and avoidance) mecburi hale gelecektir. Gaz ve fren sistemi müdahaleleri için en uygun çözüm mevcut otobüslere adaptif seyir kontrolü ve çarpışma uyarı ve engelleme sisteminin hazır bir çözüm paketi dahilinde eklenmesidir. Benzer şekilde direksiyon hareketleri de otomatik kumanda edilebilir hale getirilmelidir. Araçlar için şerit ihlali uyarısı ve otomatik şerit takip sistemleri hazır çözüm olarak mevcuttur. İlk aşamada hazır çözümler, daha sonraki aşamada genel amaçlı yerli teknoloji çözümler üretilecektir. Projenin üçüncü ve son aşamasında otobüslere bu tarz bir şerit uyarı/takip sistemi eklenmesi planlanmaktadır. Birinci aşamada araç konvoylarındaki otobüsler sürücüleri tarafından sürülecek ve yönlendirilecektir. Sürücüye takip etmesi gereken optimum hız önündeki bir ekran vasıtasıyla görsel olarak iletilecektir. İkinci aşamada konvoydaki takip eden araçlar sensörler ve araçlar arası haberleşme sistemi ile öndeki sürücülü aracı yarı otonom olarak takip etme özelliğine sahip olacaklardır. Yani araç hızları öndeki aracı takip edecek şekilde kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi ile sağlanacak, olası çarpışmalar çarpışma engelleme sistemi ile

engellenecektir. Takip eden araçların direksiyon kontrolü projenin birinci ve ikinci aşamalarında sürücüler tarafından gerçekleştirilecektir. Projenin üçüncü aşamasını sonunda direksiyon kontrolü de otomatik olarak yapılacaktır.

Otobüslerde Kullanılacak Sensörler ve Eyleyiciler

Metrobüs hattında kullanılacak otobüslere birçok değişik sensör ilavesi planlanmaktadır. Bunlar boyuna yönde otonom konvoy çalışması için kısa ve uzun menzilli radar sensörleri ve lidar sensörü, yola bakan kamera, GPS/INS sistemi şeklindedir. Radar ve lidar ile öndeki otobüsün konvoy takibi sırasında mesafe ölçümü yapılacaktır. Kamera bilgisi ile bu sensörlerden gelen bilgiler karşılaştırılarak hatalı durumların önüne geçilmeye çalışılacaktır. GPS/INS sistemi ile otobüslerin hat boyunca konumları denetlenecektir. GPS/INS sistemi ve araç elektronik kararlılık kontrolü (ESC: Electronic Stability Control) sistemindeki boyuna yönde ivmeölçerden gelen bilgiler otobüslerin daha yakın takip yapabilmeleri için kooperatif adaptif seyir kontrolü sisteminde kullanılacaklardır.

Otobüsler Arası İletişim Sistemi

Projenin birinci aşamasında araçlara araçlar arası haberleşme modemi eklenecektir. Bu modem araçlar arası iletişimde standart olan IEEE802.11p protokolünü kullanacaktır. Otobüslere IEEE802.11p uyumlu modem, araçlar arası haberleşme yazılımı ve haberleşme antenleri eklenecektir. Projenin ikinci aşamasında otobüslere konvoy sürüşü için kooperatif adaptif seyir kontrolü(CACC) sistemi yerleştirilecektir.

Yola Eklencek Sensörler

Projenin 24 aylık ilk aşamasında yol boyuna yerleştirilecek kameralarla bir araç takip sistemi oluşturulacaktır. Projenin ikinci aşamasında ayrıca yol kenarına ve duraklara uygun aralıklarda yol kenarı modemleri (RSU: road side unit) eklenecektir. Bu ünitelerin ana görevi otobüslerle ve merkezi araç yönetim sistemi ile haberleşerek otobüs konvoylarının konum bilgilerini aktarmaktır. Ayrıca yol ile ilgili hız bilgileri de bu modemler ile otobüs konvoyuna aktarılacaktır.

Projenin üçüncü aşamasında yola metalik şerit ya da manyetik çiviler eklenmesi olasılığı değerlendirilecektir. Bu şekilde endüktif sensörler kullanılarak aracın yoldan ne kadar saptığı bilgisi okunup direksiyon kontrol sistemine gönderilebilir.

Akıllı Araç Sistemleri

Metrobüs hattındaki otobüslerde öncelikle piyasada mevcut olan ileri sürüş destek sistemlerinden yararlanılması planlanmaktadır. Bu sistemler düşük hızlarda da çalışan adaptif seyir kontrolü (ACC: Adaptive Cruise Control) ve çarpışma uyarı ve engelleme (CW/CA: Collision Warning /Collision Avoidance) sistemleridir. Bu sistemlerin dışında otobüslere kamera vasıtasıyla benzer bilgileri veren ucuz maliyetli Mobileye tarzı bir uyarı sisteminin de yedek sistem olarak eklenmesi planlanmaktadır. Bu sistemde kamera kullanılarak belirlenen öndeki otobüsün mesafesi ve yayalar dahil çarpışma riski bilgisi mevcuttur. Otobüslere araçlar arası (V2V: Vehicle to

Vehicle) haberleşme sistemi entegre edilerek kooperatif adaptif sürüş yapma özelliği de eklenecektir. Öndeki otobüs sürücüsü önündeki ek göstergede gösterilen tavsiye edilen hız profilini takip edecektir. Aynı konvoydaki diğer otobüsler bu lider otobüsü takip ederek duraklardan birbiriyle beraberce kalkacaklar ve kooperatif olarak ilerledikten sonra beraberce duracaklardır. Sabit takip zamanı ve yakın takip konvoy yöntemlerinin kullanılması planlanmaktadır. Duraklara ve metrobüs hattına otobüslerle haberleşmek için yol modemleri (RSU: Road Side Unit) eklenecektir. Takip eden otobüslerde direksiyon kontrolünün sürücüde olması fakat boyuna yönde kontrolün sürücü pedallara basmadığı sürece otomatik olarak yapılması planlanan ara çalışmalardan biridir.

Projenin üçüncü ve son aşamasında bir metrobüs hattı için komple bir akıllı ulaşım sistemi çözümünün geliştirilmesi düşünülmektedir. Bu çözümde öncelikle kullanılan elektronik kumanda, ACC, CACC, CW/CA, LKA(Lane Keeping Assistant) teknolojilerinin Türkiye içinde geliştirilip üretilmesi esas alınacaktır. Bu çözümde merkezi bir araç yönetim sistemi tarafından durak seviyesinde ve sistem/bölge seviyesinde planlama yapılacaktır.

Araç Yönetim Sistemi

Projenin ilk aşamasında mevcut metrobüs hattında kullanılan temel araç yönetim sisteminin işlevleri genişletilecek kapsamlı bir metrobüs hattı otobüs konvoyları ve yolcu takip ve optimizasyon sistemi araç yönetim sistemi olarak devreye alınacaktır. Bu kapsamda yol boyunca yerleştirilecek kamera sistemi kullanılarak elde edilen otobüs konvoyu konum bilgileri işlenerek hat boyunca otobüslerin çalışma performansı incelenecek ve raporlanacaktır.

İş Planı

Önerilen proje 9 iş paketinden oluşan bir plan ile devreye alınacaktır. İş planının detayları aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Detay literatür araştırması ve analizler ile hedeflerin doğrulanması ve detaylandırılması
Bu iş paketinde mevcut örnekler ve mevcut metrobüs hattı detaylı olarak incelenecek, modellenerek verimlilik ve yakıt sarfiyatı analizleri yapılacaktır. Hedefler belirlenecek ve yapılacak çalışmanın detayları ortaya çıkarılacaktır.
- 2- Kapasite artışına yönelik optimizasyon ile araç yönetim sistemi oluşturulması
Bu iş paketinde kapasite artışı için optimizasyon çalışmaları yapılacaktır. Bu optimizasyon çalışmaları, hat yönetim sistemi ile bütünleştirilerek ve geliştirilerek devreye alınacaktır.
- 3- Yakıt sarfiyatı ve karbon salımı optimizasyonu ile global optimizasyonun sağlanması
Bu iş paketinde mevcut otobüslerin verileri ve simülasyon modelleri kullanılarak yakıt sarfiyatı ve karbon salımı hesapları yapılacaktır. Bu hesaplar optimizasyon çalışmalarında kullanılarak optimum çözümler elde edilecektir.
- 4- Araç Fren, gaz, direksiyon otomasyon sistemi geliştirilmesi

7. BÜTÇE ÖNGÖRÜSÜ VE YATIRIMLARIN AÇIKLANMASI:

Bu çalışma kapsamında yapılması gereken yatırımlar öncelikle otobüs ve otobüs konvoyu ve durak/yol ve sistem/bölge kapsamında ele alınmıştır. Çalışmaların yapılması için iki otobüs satın alınması ve bu otobüslerin otonom hale getirilmesi planlanmıştır. Otobüslerde LİDAR, radar, kamera sistemi, araç kontrol bilgisayarı, haberleşme sistemi, RFID sistemi, GPS ve fren, direksiyon ve gaz kumanda sistemleri gibi sistemler öngörülmüştür.

Proje yönetimi ve araştırma çalışmaları ağırlıklı olarak Okan Üniversitesi araştırmacıları tarafından yürütülecektir. Endüstriyel çalışmalarına yönelik olarak ilgili endüstriyel firmalardan ve mühendislik firmalarından destek alınması öngörülmektedir.

Sistemin araç üzerinde testi öncesi tüm donanım simülasyonlarının yapılabilmesine yönelik olarak Okan Üniversitesine simülasyon sistemi alınması öngörülmüştür.

ARGE çalışmaları başarıya ulaştıktan sonra metrobüs hattında uygulama yatırımlarının yapılması gereklidir. Bu yatırımlar, geliştirmenin sonuçları ile ilişkili olduğu için bu aşamada bir rakam tahmini yapılmayacaktır.

Tablo 7.1 de ARGE harcamaları öngörülere ve metrobüs hattında uygulamaya yönelik kalemler listelenmiştir.

NO	HARCAMA	TL
1	ARGE HARCAMALARI	
1.1-	İnsan kaynakları	1.550.000
1.2-	Yazılım ve Donanım Geliştirilmesi teknik destek	400.000
1.3-	Haberleşen sistemler teknik destek	300.000
1.4-	Mekatronik sistemler teknik destek	300.000
1.5-	Mekatronik sistemlerin prototipleri	200.000
1.6-	Yönetim sistemi yazılım geliştirmesi	300.000
1.7-	İki adet otobüs alımı	500.000
1.8-	Araç üstü duyargalar ve bilgisayarlar(3 Seri)	350.000
1.9-	Sabit duyargalar	150.000
1.10-	Donanım simülasyon sistemi	250.000
1.11-	Sistem optimizasyon yazılımı	30.000
1.12-	Araç Testleri	250.000
1.12-	Diğer	70.000
	ARGE Toplam	4.650.000
2	METROBÜS HATTI YATIRIMLARI	
2.1-	Araç üstü sistemler (300 araç için)	
2.2-	Duraklardaki sistemler(45 durak)	
2.3-	Yönetim Sistemi donanım	
2.4-	İnşaat işleri	
2.5-	Köprü geçiş sistemi	
	Hat yatırımı	

Tablo 7.1- ARGE Harcama Öngörülere ve Uygulama Yatırımları

8. OLASI PROJE ORTAKLARI

Proje İstanbul Okan Üniversitesi koordinatörlüğü ile yürütülecektir.

Kullanılacak otobüslerin boyuna yönde elektronik kumandalarının ve boyuna yönde hızlanma/yavaşlama kontrollerinin sağlanması için otobüs üreticilerinden adaptif seyir kontrolü ve çarpışma uyarma ve engelleme sistemli otobüslerin sağlanması, mevcut otobüslere de bu sistemlerin eklenmesi düşünülmelidir. Türkiye’de üretilen Mercedes, Mann, Temsa, Otokar vb. otobüslere bu özelliklerin üretici firma tarafından kolaylıkla eklenebileceği öngörülmektedir. Bu sistemleri sağlayan yan sanayi şirketleri Wabco, Knorr Bremse vb. şirketlerdir. Direksiyon sistemleri ile ilgili çalışmaları yapan ana yan sanayi şirketleri ZF ve TRW şirketleridir. Öncelikle bu firmalardan seçilen ana üretici vasıtasıyla hazır bir elektronik kumandalı direksiyon çözümü temin edilmesi, denemelerin yapılması öngörülmektedir. İlk aşamalarda ana üretici ve ilgili yan sanayiden boyuna yönde otomasyon yönünde destek alınması, daha sonraki aşamalarda ise bu ürünlerin Türkiye’de yapılabilmesini sağlayacak teknoloji geliştirme çalışmalarının yürütülmesi planlanmaktadır. Çalışmaların başarılı ve hızlı bir şekilde sonuca oluşturulması aşağıda belirtilen alanlarda destek alınması yararlı olacaktır,

- Simulasyon ve mekatronik çözümlerin mühendislik çalışmalarına yönelik bir mühendislik firması desteği
- Tasarlanan kontrol kartı ve gömülü yazılımların , prototip hazırlaması , endüstriyellemesine dönük teknik faaliyetler için bir elektronik ve yazılım firması
- Mekatronik sistemlerin prototip hazırlaması ve endüstriyellemesine yönelik teknik çalışmalar için bir otomotiv yan sanayi
- Otobüse yönelik adaptasyonlar için bir otobüs ve ilgili mühendislik firması
- Haberleşen sistemlere yönelik yazılım ve donanım endüstriyellemesi teknik faaliyetlerine yönelik bir firma
- Yönetim Sistemi yazılımına yönelik bir yazılım firması

Türkiye’de yukarıda belirtilen konulara yönelik firmalar mevcuttur. Bir çoğu ile iletişim kurulmuştur. Böyle bir projede yer alabileceklerdir.

Projenin genel koordinasyonu ve tüm araştırma çalışmaları Okan Üniversitesi tarafından yürütülecektir. Gereken durumlarda uygun diğer üniversitelerden destek alınabilecektir.

9. EKONOMİK KAZANÇ

Otonom metrobüs projesi başlıca aşağıdaki konularda kazanç sağlayacaktır. Bu kazançların bazıları için yaklaşık getiriler, metrobüs hattında yıllık 45 milyon km yapıldığı öngörülerek hesaplanabilir,

- Yakıt Sarfiyatı kazancı: Yukarıda yakıt sarfiyatı kazancının yaklaşık simülasyonlar ile % 5 civarında olacağı tahmin edilmişti. Daha detaylı bir hesap ve optimizasyon çalışması ile bu rakam % 10 a da ulaşabilir. Bu bir senelik bir çalışmada yaklaşık 4 milyon TL ye karşılık gelmektedir.
- Karbon Emisyon Kazancı: Senelik yaklaşık 3,000 t luk bir kazanç olacaktır.
- İşçilik Kazancı: Sistem yalnız konvoyun en önündeki araçta şoför ile çalıştırılabildiğinde, sürücü sayısı yarıya veya üçte bire inebilir. Hattın daha hızlı çalışması ile günlük yolcu sayısı 700,000 olduğu göz önüne alındığında, toplamda önemli bir zaman katkı olacaktır.
- Kapasite Artışı: Hesaplar en az % 45 kapasite artışı ortaya koymaktadır. Bu kapasite metro kapasitelerine oldukça yaklaşmaktadır. Benzer bir kapasiteli sistemi oluşturmanın maliyeti oldukça fazladır.

10.TEŞEKKÜR

Fizibilite çalışması Ocak- Mart 2013 arasında İstanbul Kalkınma Ajansı desteği ile gerçekleştirilmiştir. İstanbul Kalkınma Ajansına ve Kalkınma Bakanlığına teşekkür ederiz.

Proje çalışmaları sırasında İETT İşletme Planlama Müdürü Sayın Köksal Altunkaynak ve İETT Ulaşım Planlama Daire Başkanlığı metrobüs danışmanı Sayın Büşra Buran'ın metrobüs hattı bilgilendirme destekleri, yön göstermeleri ve hızlı iletişimleri için teşekkür ederiz.

11. REFERANSLAR

[1] Wright, L., Hook, W., Bus Rapid Transit(BRT) Planning Guide, Institute for Transportation and Development Policy(ITDP), 2007

[2] Willumsen, L.G.,Lillo, E., Bus Rapid Transport and Urban Development,Proceedings of the 24.Southern African Transport Conference (SATC 2005), Pretoria, South Africa, April 2005

[3] Szasz, P.A.,Montans, L.C., Godoy,A.R.,Comonor II- Coordinated Bus Convoys at Rangel Pastena and Celso Garda Av.,CET Technical Bulletin 22, Sao Paulo, 1979

[4] Sotelo, J.,Vilela, D., Leonel, M., AFTS -Automated Flexible Transportation System: a new concept for urban mass transportation, 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings Dearborn (MI), USA October1-3, 2000

[5] J.G. Bender, “An Overview of Systems Studies of Automated Highway Systems”, IEEE Trans. On Vehicular Technology, 1991

[6] Mizuma, T.,Nakamura, H., Safety Evaluation On Automatically Operation Bus System By Its Technologies, IEEE ISIE 2001, Pusan, Korea

[7] T.Robinson, E. Chan, E. Coelingh, “Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme, Pusan, Korea, 2010

[8] C.A.J. Fletcher, G.D.H. Stewart, “Bus drag reduction by the trapped vortex concept for a single bus and two buses in tandem”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 24, Issue 2, September 1986, Pages 143-168.

[9] Improving Performance Tire and Passenger Vehicle Fuel Economy, Transportation Research Board Special Report 286, Washington D.C., 2006.

[10] <http://www.greencarcongress.com/2007/07/platooning-redu.html>

[11] Nylund, N., Erkkilä, K., Hartikka, T., Fuel Consumption and Exhaust Emissions of Urban Buses: Performance of the New Diesel Technology, VTT Technical Research Centre of Finland, 2007.

[12]http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/australia/corporate_australia/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/f/Diesel_EmissionReduction.pdf

[13] Genta.G., Morello, L., *The Automotive Chassis, Volume 1:Components Design*, Springer Mechanical Engineering Series, 2009.

[14] Avcılar-Söğütlüçeşme Metrobüs Hattının Değerlendirilmesi ve Geliştirilmesi Önerileri, 2012, Okan Üniversitesi, Karsan için hazırlanan rapor,

[15] Vukan R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*,2007,John Wiley&Sons

[16] Transit Capacity and Quality of Service Manual – 2nd Edition, TCRP Report 100, Transportation Research Board, 2003