

Veri GÜdümlü Kent Yönetimi: Otobüs Hatları için Gerçek Zamanlı Durak Yoğunluğu Engelleme ve Operasyon Destek Sistemi

Data Driven City Management: Real-Time Bus Bunching Prevention and Operation Support System for Bus Lines

Doç. Dr. Mehmet GÖKTÜRK

Gebze Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye
e-posta: gokturk@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-8030-8923

Bekir ÖZYURT

Kent Kart
e-posta: bekir.ozyurt@kentkart.com.tr
ORCID: 0000-0001-8307-5291

Öz

Bugüne kadar toplu taşımada nesnelerin interneti (IOT) verilerinin sefer zaman, pozisyon ve seyahat kalitesi bileşenlerinin toplu olarak değerlendirildiği sistemler ayrı ayrı mevcut olsa da yoğunlukla uygulamada yaygın kullanılmadığı, operasyonlarda proaktif müdahalenin ve veri odaklı çalışmanın öneminin tam olarak kavranmadığı görülmektedir. Uygulama süreçlerinde sorunların olduğu, literatüre dayalı çalışmaların yaygınlaşmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada kentsel otobüs operasyonunda durakların birden çok hat tarafından kullanılmasından oluşan yoğunlun azaltıldığı, otobüslerin durağa yığılması nedeniyle oluşan yol tıkanması ve trafiğin ortadan kaldırılmasına, yolcuların ileri geri koşuşturmasının engellenmesine yönelik yapılan tasarım ve çalışma incelenmektedir. Çalışmada bilimsel temellere dayalı, sürücü ve operatörün algısal özelliklerini dikkate alan, sürekli farkındalık temelli ve uzun vadeli planlamaya yönelik sefer kararlılığı sağlayan, durak kalabalığı giderici, durumsal farkındalık oluşturucu sistem tasarımı oluşturulmuştur. Geliştirilen modelde duraklara yaklaşan araçların nesnelerin interneti yaklaşımı ile izlenerek akıllı şoför etkileşimli sistem ile duraklarda birikmesine engel olacak yaklaşım kurgulanmıştır. Uzaktan izleme ve sefer planlama dikkate alındığında, literatürdeki ve prototip uygulamalar dikkate alındığında bu yaklaşımın durak büyüklüğünün azaltılmasına yardımcı olacağı, hatlar arasındaki varyasyonu azaltarak özel işletmeciler arasındaki gelir dağılımını da adil bir hale getireceği değerlendirilmiştir. Ayrıca operatörce aktif plan değişiklikleri ve müdahaleler için bir veri analiz zemini hazırlanmış olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şehir, Toplu Taşıma, Durak Yoğunluğu, Nesnelerin İnterneti, Trafik, Ulaştırma, İnsan Bilgisayar Etkileşimi.

Abstract

Although there are separate systems that evaluate the time, position and travel quality components of the internet of things (IOT) data in public transportation, it is seen that they are not widely used in practice and the importance of proactive intervention and data-oriented work in operations is not fully understood. It is understood that there are problems in the implementation processes and studies based on the literature are not widespread. In this study, the design and work done to reduce the density caused by the use of stops by more than one line in the urban bus operation, to eliminate the road congestion and traffic caused by the crowding of the buses to the stop, and to prevent the passengers from running back and forth are examined. In the study, a system design based on scientific foundations, taking into account the perceptual characteristics of the driver and operator, providing voyage regulation for continuous awareness and long-term planning, eliminating the stop crowd, and creating situational awareness was created. In the developed model, vehicles approaching the stops are monitored with the internet of things approach, and an approach is designed to prevent them from accumulating at the stops with the smart driver interactive system. Considering the remote monitoring and voyage planning, considering the literature and prototype applications, it has been evaluated that this approach will help reduce the size of the stops, reduce the variation between the lines and make the income distribution among private operator vehicles fair. In addition, a data analysis ground is prepared for active plan changes and interventions by the operator.

Keywords: Smart City, Public Transportation, Bus Bunching, Internet of Things, Traffic, Transportation, Human Computer Interaction.

Giriş

Modern kentlerin önemli problemlerinden biri olan toplu ulaşım, aynı zamanda kent yönetiminin ve kentteki görünür medeniyetin önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Toplu ulaşım günümüz kent yönetimi açısından çok boyutta çözülmesi gereken birçok problemi içinde barındırmaktadır. Bunlar metro sisteminin geliştirilmesi, yol ağının oluşturulması, konutların iş merkezlerinin, etkinlik merkezlerinin imar planlaması gibi çok yüksek bütçeli ve temel problemleri de içermektedir.

Toplu ulaşım sistemlerinin önemli bir bölümü birçok kentte lastik tekerlekli otobüslerden oluşmaktadır. Bu otobüsler, birçok nokta arasında hat tabanlı yolcu taşımayı ve buna ek olarak çoğu kez metro, tren, vapur gibi diğer ulaşım ağları ile entegrasyon görevini sağlamayı ve hedefleyerek işletilir. Başarılı bir kent ulaşım sisteminin anahtar kelimesi “planlama” ve “gerçekleme” olarak belirlenmektedir. Doğru planlanmış ve etkin çalışan bir toplu ulaşım sistemi o kentin yerel yönetiminin önemli başarısı olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan planlamanın, uygulanabilir bir planlama olması ve gerçekleştirilebilir olması beklenir.

Büyük kent yönetimlerinin toplu taşıma operasyonları karmaşık problemler içermektedir. Bunlar, otobüslerin teknik bakımından araç şoförlerinin psikolojik danışmanlıklarına kadar çeşitli boyutlarda olabilmektedir. Başarılı yönetilen modern bir şehirde toplu taşımanın başarılı operasyonu esas olarak kabul edilmektedir. Planlama, yürütme ve analiz safhalarında gerçekleşen toplu taşıma operasyonlarının yönetim süreçlerinde karar alıcıların nitelikli karar vermeleri sağlanmalı, tüm sürecin karar alıcılar tarafından tam olarak kavranması, alınan kararların etkin bir biçimde uygulanması gerekir. “Toplu taşıma”, otobüs, raylı sistem, deniz araçları ve diğer bileşenlerin bir araya gelmesi ile oluşturulan hibrit anlam ifade etmektedir. Bu çalışmada, “otobüs” temelli toplu taşıma araçlarının operasyonel yürütme sürecinde yaşanan bazı sorunlara gerçek zamanlı geri besleme yaklaşımı ile yenilikçi çözüm getirmek amaçlanmıştır.

Toplu taşıma sisteminin en önemli evresi planlamadır. Bu amaçla tüm seferlerin gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak tüm detayları barındıran planlama gerekmektedir ve bu plan dahilinde planların gerçekleşen verilerle karşılaştırılması ihtiyacı doğmaktadır. Planlanan seferlerin gerçekleşen seferlere uyumu, İngilizcede “Schedule Adherence” olarak tanımlanmaktadır. Kentsel sefer planlamaları çok farklı etkenlere, sosyoekonomik ve siyasi parametrelere, iş profiline ve çalışma saatlerine bakılarak yapılmaktadır. Birçok nokta arası farklı seferler birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de planlanmakta ve yürütülmektedir. Ancak planlanan seferlerin sefer hattı boyunca dış etkenler, trafik, yolcu inip binmeleri, sürücü kullanım hızı ya da trafik ışıklarına ard arda takılma gibi nedenlerle hat boyunca giderek artan bir varyasyona bağlı olarak hedeften sapmalar gösterdiği görülmektedir (Schmaranzer, Braune ve Doerner, 2021).

Aynı hatta planlanmış ardışıl seferler arasındaki planlanan zamansal uzaklığa “Sefer Aralığı” (Headway) denilmektedir. Örneğin iki sefer arasında 20dk, değer birçok sosyolojik, demografik, ekonomik ve politik değişkenler ışığında planlama operatörü tarafından belirlenir. Yerel yönetimlerin uzun yıllardan bu yana temel performans hedeflerinden biri bu nedenle “sefer aralığı kararlılığı” (headway stability), yani değişkenliğin en aza indirilmesi olmuştur. Başarılı bir operasyonda bu değerdeki stabilite, kalite göstergesi olarak algılanmakta ve müşteri memnuniyetini artırmaktadır (Gkiotsalitis ve Cats, 2021).

Öte yandan çok sefer tarafından paylaşılan güzergâhlarda yeni çözülmesi gereken ilginç problemler doğmaktadır. Birçok seferin farklı noktalar arasında belirli saatler arasında planlanması sürecinde anayolların bu seferler tarafından ortak kullanımı söz konusudur. Birçok durak farklı seferler tarafından ortak kullanılmaktadır. Yolcular, kendi kalkış ve varış noktaları arasında birden çok hatta çalışacağı varsayılan otobüslere hat gözetmeksizin binebilmektedir. Bunlar arasında örnek olarak İzmit Büyükşehir Belediyesi’nin D100 karayolu üzerinde durak paylaşımı yaptığı seferler örnek gösterilebilir (Şekil 1). Bu tür paylaşımlı hatlarda bazı çözümlerin ekspres durak noktaları ile sistemin verimini artırdığı görülmüştür.



Şekil 1. Farklı Hatların Durak Paylaşımı (KBB)

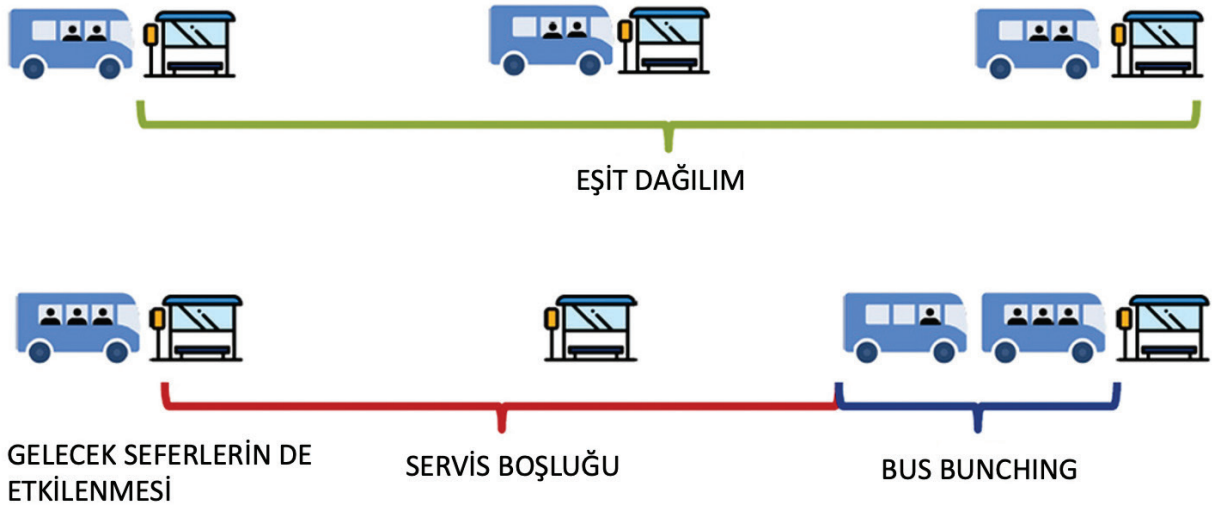
Birçok durumda çözülebilir olan problemlerin geç fark edilmesi ya da hiç fark edilememesi, mevcut kaynakların ve filo olanaklarının değerlendirilememesi nedeniyle müşteri memnuniyetsizliği ve taşınabilen yolcu sayısında azalma, seyahat sürelerinde gereksiz uzamalar yaşanabilmektedir. Dolayısı ile yönetsel olarak anlık ve geçmişe dönük bilgilerin operatör seviyesinde ve yönetim seviyesinde değerlendirilebilmesi büyük yararlar sağlayacak işlemlerdir. Bu çalışmada önerilen model, operatör seviyesinde ve yönetsel seviyede gerçek zamanlı sefer performans yönetimine odaklanmıştır (Gkiotsalitis ve Maslekar, 2018). Toplu taşıma ulaşım sistemlerinin yeni nesil akıllı teknolojiler ile iyileştirilmesi yaklaşımı ile otobüs hat performansının izlenmesi, tanımlanan belirli problemler açısından hizmet kalitesinin iyileştirilmesi çalışmanın ana nihai hedefidir (Furth ve Wilson, 1981).

Sefer Birleşmesi Problemi

Toplu taşımacılık literatüründe "Sefer Birleşmesi" (Bus Bunching) adı verilen otobüslerin "Sefer Aralığı Kararlılığı" sorunu nedeniyle durağa arka arkaya aynı anda yanaşması problemi oluşur (Andres ve Nair, 2017), (He, 2015). Bu durum çok sayıda sefer hattının paylaştığı güzergâhlardaki duraklarda daha da büyük sorunlara yol açabilmektedir. Gerek trafiği olumsuz etkilemesi, gerek yolcuların otobüsler arası koşuşturmasına yol açması, gerekse durakta bekleme ve sefer süresinin uzaması gibi birçok olumsuzluğa yol açmaktadır. Uzun süre durakta hiçbir otobüsün gelmemesi ardından birçok otobüsün arka arkaya durağa yanaşması müşteri kalite algısını olumsuz etkilemekte, durak alanının büyütülmesi ihtiyacını doğurmakta, öte yandan durak büyüdükçe yaya olan yolcuların istedikleri otobüsü bulmalarını zorlaştırmaktadır (Şekil 2).

Çoğu durumda durağa yanaşmak isteyen otobüsler geriye doğru trafiği tıkamakta, ikinci sıra park etme nedeniyle arkadan gelen diğer

araç trafiğini büyük ölçüde olumsuz etkilemektedir. Tek hatta yaşanan problemler yalnızca otobüsün vaktinde gelmemesi ve gecikme sonunda çok yakın aralı ile ya da arka arkaya gelmesi ile sınırlı iken çok hattın kullandığı ortak güzergâhlarda durum daha da kötü bir tablo oluşturmaktadır. Ayrıca Poisson süreci ile duraklarda biriken yolcuların aralık varyasyonundaki aşırı dalgalanma nedeniyle önde gelen otobüse fazla sayıda yolcu alınırken arkadaki otobüsün boş geçmesi gibi sorunlara yol açtığı da bilinmekte ve literatürde vurgulanmaktadır (Moreira, Gama, Mendes ve Freire, 2014). Bu dalgalanmanın özel halk otobüsü modeli ile çalışılan kentlerde serbest sahiplik olduğunda işletmecilere gelir adaletsizliği konusunda çok olumsuz dönüşü de olmaktadır. Geleneksel minibüs hatlarında belirli noktalarda "değnekçi" adı verilen ve minibüsleri gerektiğinde bekleten, sıra kontrol eden personelin temel geleneksel görevi bu düzeni sağlamaktır.



Şekil 2. Sefer birleşmesi (Bus Bunching) Problemi

Bu seferler kendi başlarına ayrı saatlerde olmakla birlikte ortak durakları kullanmakta oldukları güzergâh boyunca birbiri ardına tam bir anlık planlama ve koordinasyon olmaksızın seyahat etmektedir. Otobüslerin bir kısmı özel halk otobüsü ya da midibüsü olup gelir modelleri bakımından mali açıdan birbirinden izole çalışmaktadır.

Daha modern çözümlerde sefer yapan otobüslerin birbirleri arasındaki mesafenin korunması ve sefer programına daha uygun hizmet sağlanabilmesi için bazı ülkelerde bekleme noktaları ve sinyalizasyon sistemi oluşturulmaktadır. Bu bekleme noktalarında otobüsler planlanan saatin ilerisinde iseler beklemekte ve böylelikle plan varyasyonunu azaltmaya çalışmaktadır (Xuan, Argote ve Daganzo, 2011). Ancak bu durum, otobüsün içindeki yolcuların seyahat süresinin uzamasına ve beklemeden dolayı şikayet etmelerine yol açmaktadır. Literatürde yapılan simülasyon tabanlı çalışmalarda dinamik olarak sürücünün bilgilendirilerek araç hızının kontrolü ile problemlerin önemli ölçüde giderilebileceği gösterilmiş ve önerilmiştir (Eldeeb, Idris ve Parrott, 2018). Bazı çözümlerde ise durakları incek yoksa gerekirse pas geçme talimatlarının oluşturulması da yer almaktadır.

Toplu taşıma konusunda gerçek zamanlı filo yönetimi çalışmaları son 5 yıldan bu yana dikkat çekmektedir. Daha önceki dönemlerde uluslararası düzeyde yerel yönetimlerce yapılmış çalışmalara bakıldığında otobüslerin sefer planına uygunluğu ana başarı kriteri olarak tanımlanmakta olup stabilitenin sağlanması için trenlerde olduğu gibi sinyalizasyon sistemi ya da görevliler aracılığı ile duraklar arası bekleme noktaları oluşturulması denenmiştir (Ceder, 2016). Ancak bu yaklaşım sefer süresini uzattığı gibi otobüse zaten binmiş yolcuları “neden bekliyoruz” şeklinde şikayetlerde bulunmalarına yol açtığı belirtilmiştir (An, Fu, Huang, Cheng ve Liu, 2020). Son dönem makalelerine bakıldığında gerçek zamanlı planlamanın simülasyon çalışmalarında hem durakta inme binme süresini durağın verimli kullanılması sayesinde azalttığı hem de “sefer birleşmesi

(bunching)” probleminin giderilmesi nedeniyle tercih edilmesi üzerinde durulmaktadır.

Farklı ülkelerin otobüs yönetim sistemleri verileri üzerinde güncel verilerle yazılmış olan bilimsel makalelerde bu tekniklerin kullanılması gerektiği üzerinde durulmaktadır. Güncel bilimsel çalışma ve popüler literatürde büyük kentlerde bilinen yaygın kullanılan bir çözümden bahsedilmemektedir (Gkiotsalitis ve Alesiani, 2019). Mevcut çalışmaların makine öğrenmesi ya da istatistiksel modellere daha çok yöneldiği ve simülasyon çalışmaları ile desteklendiği gözlenmektedir (Shang, Huang ve Wu, 2019).

Veri gösterimi açısından literatüre, Türkiye ve dünyadaki örneklerle bakıldığında çoğu yerde liste bazlı gösterimin yaygın olduğu ve operatörlerin bu değerleri kullanarak karar verdiği görülmektedir. Gösterilen değerler kırmızı turuncu ve yeşil gibi ayrı renklerde işaretlenerek geç kalındığı operatöre ifade edilebilmektedir. Bu sayede çok sayıda hattın sefer tamamlama performansı üzerinde bir yorum yapılabilir. Bu amaçla hat boyunca durakları ele alan uzamsal gösterim tercih edilir.

Halihazırda birçok belediye kent haritası üzerinde otobüsleri gösteren coğrafi bilgi sistemleri ile ilk başta donatılmaktadır (Automatic Vehicle Locator - AVL). Bunun gerçekleştirilmesi, harita bilgisinin sağlayıcılardan kolaylıkla elde edilmesi, yolların çizilmesi gibi gereksinimlerin oluşmaması, otobüslerin pozisyonlarının ek katmana çizilmesi ile sürecin kolaylıkla görüntülenebilmesi nedeniyedir (Hranac, Kwon, Bachmann ve Petty, 2011).

Toplu taşıma operasyonları son tüketiciye yönelik olmadıkları için genellikle veri görüntüleme bölümleri eksik olarak sahada çalışmaktadır. Yukarıda belirtildiği üzere harita üzerinde gösterimlerle yetinilmektedir. İdeal yapıda başarılı veri görselleştirme sisteminin bulunması önemli bir faktör olmaktadır.

Model

Önerilen çözüm modelinde araçlardaki yeni nesil IOT cihazlardan gelen büyük veri kullanılarak sürücüyü durumsal farkındalık ve sürüş modülasyonu bilgileri ulaştırılarak durağa diğer araçlarla fiziksel çakışma yapmayacak şekilde erişmesi sağlanır. Sefer planı, yolcu sayısı ve duraktan binen yolcu bilgileri, araç pozisyonu, geçmiş değerlerden makine öğrenmesi ile yapılan çıkarsama, trafik değişkenleri ve diğer araçların pozisyonu verileri kullanılır.

Problem, tek bir hatta olabileceği gibi daha önemli olarak paylaşımlı yolların çok hat tarafından kullanıldığı duraklarda daha belirgi ve kontrolü zor bir yapı sergiler (Şekil 3).

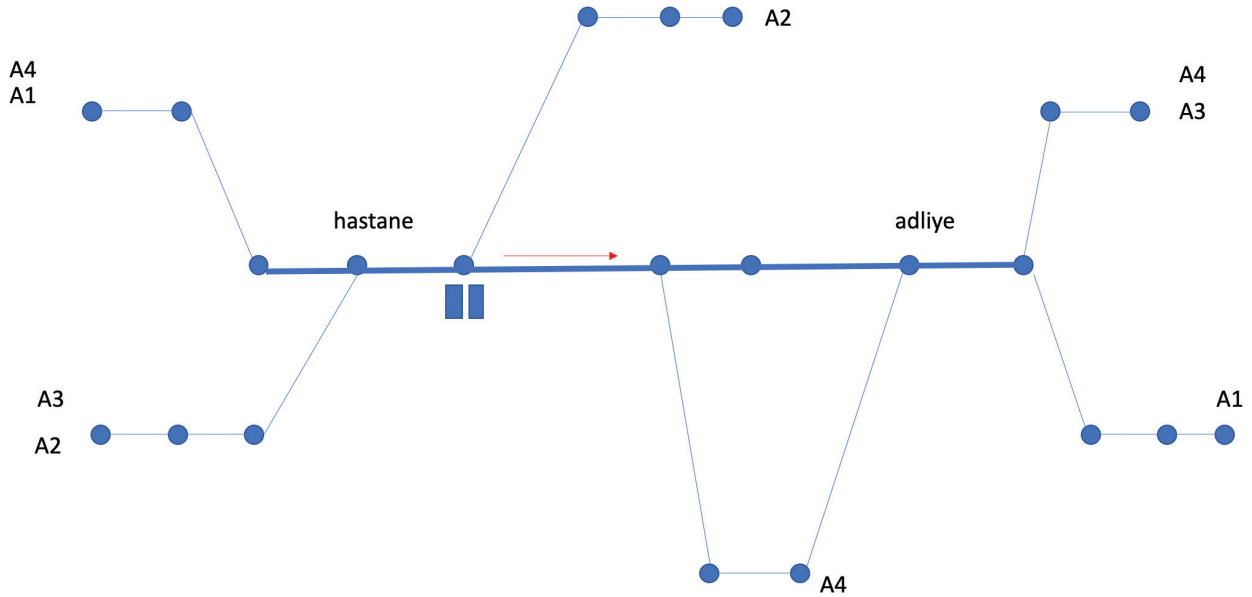
Sefer zaman stabilitesi çok uzun yıllardan bu yana toplu taşıma hizmet kalitesi bakımından tarife bağlılığı ile başabaş değerlendirilen bir değişkendir. Bir duraktan belirli aralıklarla geçmesi planlanan otobüslerin durak varış sürelerindeki varyasyon sefer zaman stabilitesini belirlemektedir. Modelin uygulanması ile sefer zaman stabilitesinin iyileştirilmesi yönünde gelişme ve tarife bağlılık değerde yükselme oluşması beklenir. Tarife bağlılık derecesi sefer zaman stabilitesi yanında kalkış zamanlarının planlaması ve uygulanabilirliği ile ayrıca değişken olarak ilgilidir (Pi, Egge, Whitmore, Qian ve Silbermann, 2018).

Durakta otobüs birleşmesi ise önceki bölümlerde de değinildiği üzere stabilitede gözlenen varyasyon nedeniyle aynı durağa aynı anda birden çok otobüsün yanaşması olarak tanımlanmıştır. Sefer birleşmesi (bus bunching) normal şartlarda tek güzergah için tanımlanır. Dolayısı ile ulusal olarak meşhur olmuş hat örnekleri arasında İstanbul 500T "Tuzla-Topkapı Cevizlibağ" hattı için çok sayıda çalışan otobüs barındıran uzun bir hatta tanımlandığında

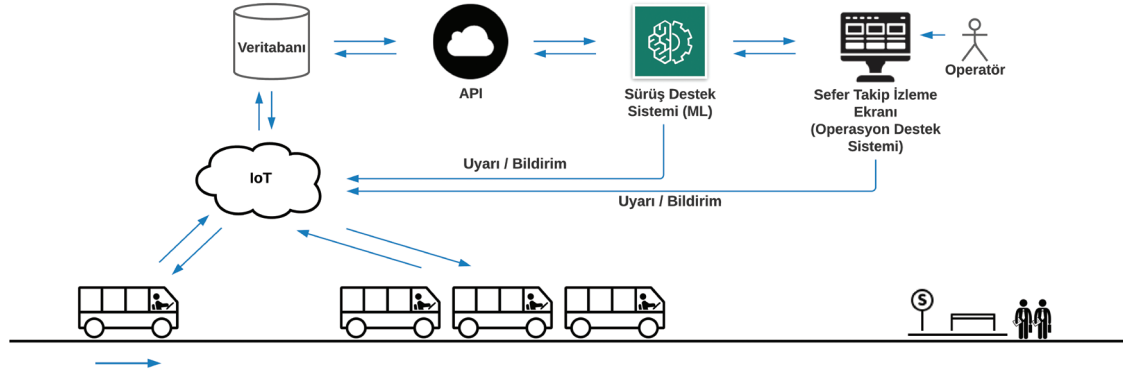
bir saat otobüs bekleyen bir yolcunun ardı ardına bir saatin sonunda iki otobüsü birden durakta görmesi şeklinde problem yaşanması otobüs birleşmesinin temel tanımıdır.

Birden çok sayıda hat aynı durakları en azından belli bir arter boyunca takip ettiğinde ise bu hatların yolcuları belli aralıklar için farklı güzergah yolcuları ile hem karışmakta hem de bu araçların binebileceği otobüs sayısı artmaktadır. Ancak sefer/otobüs/hat birleşmesi problemi ise kendini daha belirgin göstermektedir. Birçok hattın birden geçtiği bir durakta 5 dakikada bir otobüs geçmesi beklenirken 20 dakika hiçbir otobüs gelmeyip 21. Dakikada 5 otobüs birden gelebilmektedir. Hatların kalkış noktaları ve uç güzergahları farklı olduğu için bunun planlama ile senkronizasyonu mümkün değildir. Duraklardaki bu nedenle oluşan sorunların çözümü için durak büyütülmekte, direkler yapılarak belirli kodlu otobüslerin bu direklerin önünde durması sağlanarak yolcuların durmuş otobüsler arasında git gel yapmaması temin edilmeye çalışılmaktadır.

Ancak bu yaklaşımların da kendine ait sorunları vardır. Durağa yaklaşmış ve yeterli miktarda indirme bindirme alanına girememiş ancak durmak zorunda kalmış otobüs yolcuların talebi ile iniş kapılarını açmakta, bunu gören binecek olan yolcular biniş kapısının açılmasını talep etmekte ve bu nedenle durak dışı indirme ve bindirmeler mecbur hale gelmektedir. Bu süreçte asıl durakta beklemeye devam etmeyi tercih eden yolcu ise mağdur olabilmektedir. Otobüs birleşmesinin doğal sonucu ise poisson dağılımı ile gelen yolcu trafiğinin araçlara homojen ve adil olarak paylaştırılmamasıdır (Iliopoulou, Milioti, Vlahogianni ve Kepaptsoglou, 2020).



Şekil 3. Çok Hatlı Paylaşımlı Güzergah Modeli



Şekil 4. IOT yapısı kullanılarak sürücü algısal farkındalık sürüş kontrolü

Modele bağlı olarak önerilen gerçek zamanlı bilgilendirme arayüzü ile sürücüye, yaklaşmakta olduğu durakta bir yoğunluğa sebep olacak ya da sefer stabilitesini etkileyecek durum mevcut ise sürücü ekranında daha yavaş sürmesi için sürekli bildirim verilirken, durakta beklemekte yolcu almakta ya da indirmekte olan diğer sürücüye ise arkadan bir ya da birkaç otobüs daha gelmekte olduğu ve kalkış zamanının geldiği, mümkün olan en kısa zamanda kalkışın tamamlanması gerektiği bildirilmelidir. Trafik emniyeti açısından sürücülere “daha hızlı” kullanmaları yönünde bir baskı olmamakla birlikte kendi planlarına uyumluluk konusunda sabit geri besleme sinyali ile durumsal farkındalık yaratılacak ve bu “durum (status)” bilgisi olarak grafiksel kodlanmalı ve gösterilmelidir (Şekil 4).

Ortaya konan problemin ikinci boyutu operasyon yönetimidir. Sürecin takip edilmesi ve nitelikli bilgi akışının kolaylıkla özümzenerek değerlendirilmesi amacıyla büyük veri görüntüleme sistemi ile operatör seviyesinde destek sağlanarak seferlerin planlanan şekilde ve anlık sorunlardan arındırılmış bir biçimde yürütülmesi gereklidir.

Birçok ülkede, hızlı işgücü değişimi nedeniyle sürücü personelin becerileri yetersiz kalabilmekte, rotalara uyma, zamanlamaya dikkat edememe, disiplinsizlik gibi hizmet kalitesini oldukça kötü yönde etkileyen durumlar oluşmaktadır (Guihaire ve Hao, J2008). Sürücülerin ve operatörlerin elektronik sistemler aracılığı ile uyarılarak/desteklenerek sürüşlerinde düzeltme yapmalarının istenmesi ve gerektiğinde yavaşlamaya yahut beklemeye yahut devam etmeye yönelik bildirimlerde bulunulması ile ya da bazı durumlarda elde edilen raporlar sonucunda personel eğitimi ya da uyarı verilmesi bu nedenle önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ortaya konan model, uzun dönemli salınımları ve kronikleşen problemleri görüntüleyerek ve raporlar oluşturarak mevcut sorunların çözümü ve olası sorunlar için önceden çözüm geliştirilmesi ve hizmet kalitesinin artırılması için fırsat oluşturmaktadır.

Özel günler, trafik kazaları, terör ya da protesto olayları, farklı meteorolojik durumlar, küresel fuar, yarış, olimpiyat vb. etkinliklerde

olağan dışı durumlarda toplu taşıma operasyonlarına müdahale edilmesi ve operasyon hizmetinin gerektiğinde güçlendirilmesi veri odaklı yaklaşımla mümkün olacaktır.

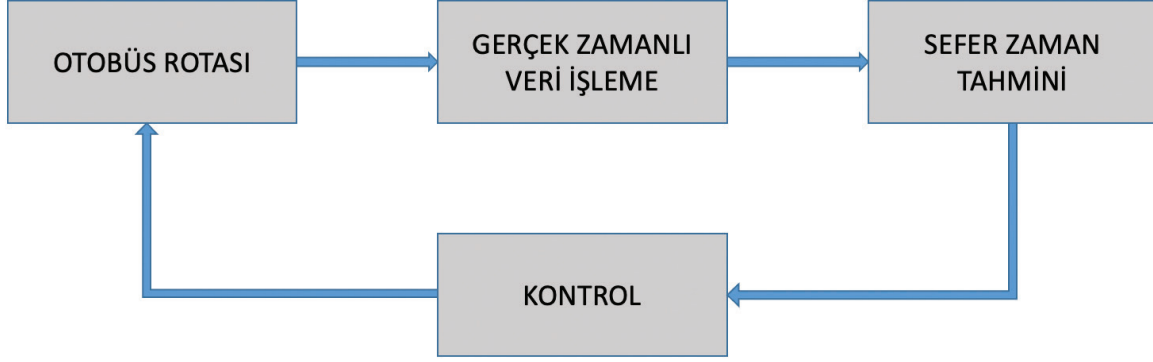
Modelde genel olarak aşağıdaki temel değişkenler parametrik olarak ele alınır:

- “Sefer Aralığı Kararlılığı” (headway stability),
- “Sefer Birleşmesi” (bus bunching),
- “Durak Kalabalıklaşması”,
- “Yolcu Dağılımı”
- “Tarife Bağlılığı” (schedule adherence)

Bu değişkenlerin işlenmesi amacıyla paylaşımlı duraklar içeren ana güzergahlarda bulunan duraklardaki yolcu davranışları binme ve inme noktaları detaylı olarak analiz edilir. Örneğin İzmit Bölgesi’nde D100 yolu üzerinde paylaşımlı durakların ve yolcu hedeflerinin bu perspektifte incelenmesi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada önerilen model, araçların gerçek zamanlı IOT cihazlarından gelen veriler değerlendirilerek izlenmesi sonucunda, yolcu sayısı, araç koordinatları ve tahmin edilen varış anına bağlı olarak durak kalabalığı kestirimi yapılarak buradan elde edilen çıkarım doğrultusunda arkadan gelen araçların sürücülerine durumsal farkındalık sağlayan gerçek zamanlı grafiksel bildirim verilmesine dayanmaktadır.

Literatürdeki birçok çalışmada önerilen ve simülasyonlarda başarılı olduğu gösterilen bu yaklaşım ile müşteri memnuniyeti artırılırken sefer süresi genel anlamda durak sıkışmalarının azalması nedeniyle kısaltılabilir. Tüm araçlarda bilete ve bazı araçlarda indi bindiye göre de halen veri alma olanağı mevcuttur ve daha da geliştirilmektedir, ayrıca mobil app üzerinden durakta bekleme süresi inilen ve binilen duraklar takip edilerek veri toplanabilmektedir (Sobral, Galvão ve Borges, 2019). Otobüslerin anlık olarak GPS verileri ve durağa erişim bilgileri, durakta bekleme süresi bilgileri veri havuzuna girilmektedir.



Şekil 5. Gerçek Zamanlı Kontrol Modeli

Birçok durumda çözülebilir olan problemlerin geç fark edilmesi ya da hiç fark edilememesi, mevcut kaynakların ve filo olanaklarının değerlendirilememesi nedeniyle müşteri memnuniyetsizliği ve taşınabilen yolcu sayısında azalma, seyahat sürelerinde gereksiz uzamalar yaşanabilmektedir (Chiraphadhanakul ve Barnhart, 2013). Dolayısı ile yönetsel olarak anlık ve geçmişe dönük bilgilerin operatör seviyesinde ve yönetsel seviyede gerçek zamanlı sefer performans görüntüleme ve uzun dönemli kademeli raporlama özellikleri ile söz konusu iyileştirici anlık ve uzun vadeli kararların alınması mümkün olabilir (Ibarra, Delgado, Giesen ve Muñoz, 2015), (Kurkcu, Miranda, Ozbay ve Silva, 2017). Bu problemlerin özel olarak çözümünde kullanılmak amacıyla otobüs hat performansının izlenmesi, raporlanması, yeni hatların planlaması için öngörülerde bulunulması, karar vericilerin hat planlamasını nitelikli bir biçimde sağlaması ve hem operatörün hem sürücünün durumsal farkındalık kazanabilmeleri için çok

fonksiyonlu bir toplu taşıma veri görselleştirme ve kontrol operasyon destek sistemi kullanılmalıdır (Mai, Backman ve Hranac, 2011), (Palomo, Guo, Silva, ve Freire, 2015).

Operatör seviyesinde çoğu kez sorunların yaşanmasına yol açan “algısal farkındalık” problemini çözmek amacıyla “dinamik büyük veri görselleştirme” tekniklerinin kullanılması uygun görülmektedir. Dinamik anlık veriler gerek operatörlerin HD seviyesindeki kişisel ekranlarına ve 4K çözünürlüğünde olan kontrol odası ekranlarına özel olarak tasarlanan veri görüntüleme arayüzü ile yerleştirilmelidir (Du, Brulé, Enns, Manjunatha ve Segev, 2015), (Stewart, Diab, Bertini, ve El-Geneydy, 2016). Operatörler hem kendi ekranlarından hem de büyük ekrandan sefer durumlarını tüm gün boyunca takip ederken aynı anda planlama değişiklikleri ve diğer birçok kararı verebilmeleri için fırsat yaratılır (Zeng, Fu, Arisona, Erath, Qu, 2014), (Anwar, Odoni ve Toh, 2016).

Planlama ve Gerçek Zamanlı Uygulama

Uluslararası literatürde Sefer Birleşmesi (Bus Bunching) ve Sefer Aralığı Kararlılığı (Headway Stability) olarak da tanımlanan ve son dönemde üzerinde önemle durulan durak yoğunluğuna ve sefer plan uyumluluğuna yönelik bu önemli sorunun kapsamlı matematiksel analiz ve algoritmik yaklaşımın IOT verileri ile birleştirilerek kullanılmasını gerektirmektedir (Wu, Li, Liu, Jin, Yao, Xie ve Ma 2020).

Bu çalışmada önerilen model, bulut tabanlı çok kullanıcıli yapıda geliştirildiği takdirde kolaylıkla farklı kamu ya da özel sektör tarafından işletilen toplu taşıma sistemlerine entegre edilebilir. Veritabanı arayüz hizmetleri ile farklı firmalar tarafından geliştirilmiş ve halen çalışmakta olan birçok sistemin entegrasyonu sağlanabilir. Sürücü geri besleme arayüzü mevcut sürücü operatör arayüzüne eklenecek grafik bileşenlerle sağlanır. Bu geri besleme “mesaj” şeklinde olmayıp sürekli durumsal farkındalık (situational awareness) yaratabilecek biçimde tasarlandığı için sürücü dikkatini dağıtmadan, yorgunluğa ve algısal yüke

neden olmamaktadır.

Belirli tek bir hat ele alındığında belirli yolcu kapasitesinin belirli güzergahtan alınarak hedef noktalara ulaştırılması amaçlanmaktadır. Duraklara gelecek olan yolcular genel olarak “Poisson” sürecinde bir yapı ile rasgele gelecek biçimde ele alınır. Seferler arasındaki süreye “T” olarak değer verildiğinde otobüslerin yoğunluk oranı “D” olasılık cinsinden hesaplanabilir. Bu yoğunluğa bağlı olarak inme binme sürelerindeki varyasyon ilişkilendirilerek T değerinin güzergahta gerçekçi olarak takip edilip edilemeyeceği ve servis kalitesi değerlendirilebilir. İstendiği takdirde farklı T değerleri seçilerek istenilen D değerine ulaşılmaya çalışılır. Bu, simülasyon ile de ayrıca gerçekleştirilebilir ve farklı senaryolar incelenebilir, karar destek sistemine evrilebilir. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla simülasyonlar yapılmış olup ve gerek otobüsler arası uzaklığın normalizasyonu gerekse durakların ardışıl otobüslerle meşgul edilmemesi üzerinde durulduğu görülmektedir.

Dolayısıyla ile uygulamaya geçmesi hedeflenen bir sistemde büyük veri niteliği taşımakta olan ve sürekli olarak çoğu sistemde saniyede bir kez tüm araçlardan toplanan pozisyon, müşteri sayısı ve yolculuk kalitesi parametrelerinin birleştirilerek Sefer Aralığı Kararlılığı ve Sefer Birleşmesi problemleri üzerinde ağırlıklı olarak yoğunlaşması beklenir.

Planlama, gerçek zamanlı çalışma ve optimizasyon bakımından bakıldığında NP-Complete olan problemin çözümü özel sezgisel yaklaşımlar ya da genetik algoritmalar gibi özel çözümler gerektirmektedir. Özellikle tek bir hattın “Sefer Birleşmesi” problemine odaklanmak yerine çoklu hatların problemine odaklanma yönüne gidilmesi bu sayede durak kalabalıklığının da ortadan kaldırılması mümkün olur.

Modelin sahada gerçekleşmesi amacıyla öncelikle tüm otobüslerden yüksek zamansal ve mekansal çözünürlükte verilerin toplanması ve sistem gerçek zamanlı büyük veri havuzunda toplanması gerekmektedir. Bu veri havuzu iki amaçla kullanılmalıdır. Bunların birincisi geçmiş verilerde gözlenen sıkışmalardır ve bunlar otomatik olarak tesbit edilerek etiketlenir. Sıkışma, bir durakta ya da durak çevresinde durak tipine göre bir, iki ya da üçten fazla otobüsün bulunması olarak tanımlanmaktadır. Öte yandan “Sefer Aralığı Kararlılığının” iyileştirilmesi için aynı anda otobüslerin plana uygunluğu ve aralarındaki mesafenin sabitleştirilmesi hedefi ile başarı puanlaması sözkonusu toplanmış verileri üzerinde ele alınmalıdır.

Veri havuzunun gerçek zamanlı kullanımında ise elde edilmiş makine öğrenmesi modeline bağlı olarak anlık biçimde her otobüsün durak sıkışmasına olan olasılık uzaklığı değeri elde edilir. Bu değer belirli bir değeri aşması durumunda sürücünün ekranında “uyumlu”, “ağır ol”, “durakla”, “gecikme” anlamlarına gelen ve analog renkli gösterim ile sürekli desteklenen farkındalık sinyali oluşturulur. Ayrıca farkındalığın artırılması amacıyla bir sonraki durak hakkında mevcut otobüs yoğunluğu kalabalık otobüs ikonu ile anlık olarak sürücüye bildirilmesi yapılır (Berrebi, Hans, Chiabaut, Laval, Leclercq, Watkins, 2018).

Çözüm amacıyla istatistiksel yöntemlerden nonlineer programlamaya kadar pek çok farklı tekniğin hedeflere ve eldeki verilere uygun olarak kullanıldığı gözlenmiştir. Problemin simülasyon üzerinde olmaması ve gerçek zamanlı bildirim yapılabilmesinin mümkün olması şartı nedeniyle öğrenilmesi ve sınıflandırması çok yüksek kaynaklar isteyen algoritmalar yerine öğrenme sonunda elde edilen modelin hızlı sınıflandırma sağlayan bir strateji ile kullanımı gerçek zamanlı kullanım için öngörülmektedir. Bu bağlamda doğrusal regresyon, karar ağacı ya da Naive-Bayes türünde daha hızlı çalışan makine öğrenme algoritmaları ile temel yapay sinir ağı yaklaşımları test edilmelidir.

Otobüslerin birbirleri arasındaki uzaklığın aralarında birer yay varmış ve bunlar birbirini F kuvveti ile itiyormuş gibi varsayım yapılarak problemin formüle edilmesi literatürde gözlenmiştir. Bu yaklaşım ile birçok yay ve nesnenin arka arkaya bağlı olduğu ve plan dışı hızlanma ve yavaşlamaların yayda oluşan “kuvvet” ile karşılaştığı analogisi yararlı görülmüştür. Bu sistemin eldeki

verilere bağlı olarak çözümlenmesi ile kuvvet değerinin kabul edilen limit dışına çıkması durumunda uyarı modu değiştirilir.

Modelde yalnızca sürücülerin bilgilendirilmesi değil operatörün bilgilendirilmesi ve anlık olarak izleme yapabilmesi özelliği yer alır. Bu nedenle operatörün algısal özümlemesi için verilerin görselleştirilmesi ve gerekli müdahale olanaklarının sağlanması, analitik çalışmaların yapılabilmesi için bir ortam hazırlanır. Bu nedenle çok sayıda veri ve sadeleştirme gereksinimi, anlık akan veriler birçok karmaşık problemi içinde barındırmaktadır (Yu, Mishra ve Lin, 2006).

Öncelikle araç pozisyon bilgilerinden elde edilen coğrafi koordinatların harita şablonu üzerinde işaretlenmiş durak ve yol koordinatları ile karşılaştırılarak ilgili taşıtın yolun tam olarak hangi noktasında olduğunun ve bu noktanın sefer zaman ekseninde hangi noktaya karşılık geldiğinin tespiti gerekmektedir. İdeal doğrusal olan bir güzergâhta sefer zaman eksenini hareket eksenine birebir üst üste bulunmakta iken, özellikle sokakları dolaşan, U ya da S tipinde güzergâhlar izleyen toplu taşıma araçlarında coğrafi uzaklıkların doğrudan yolculuk sefer zaman eksenine adaptasyonu mümkün değildir. Bu nedenle önceden yapılmış sefer güzergâh örnekleme ile sürekli olarak karşılaştırma yapılması ve en yakın güzergâh noktasına yakınsama ile seferin iki durak arasında tam olarak hangi noktada bulunduğu ve durakta sayılıp sayılmayacağı belirlenir.

Modelde n ($i=1..n$) adet durak içinde bulunan $D(i)$ ve $D(i+1)$ duraklarının arasında m ($j=1..m$) adet güzergâh örnekleme $P_j(x,y)$ noktaları önceden kaydedilmiş güzergâh bilgisi olarak sistemde yer alır. Sefer sırasında $Q_t(x,y)$ verileri en yakın P noktasına atanmalıdır.

Bu amaçla verilen $Q_t(x,y)$ ile en tüm $[P]$ kümesi içinden en yakın olanın bulunması işlemi yapılır. Bu süreçte doğrusal arama gibi yöntemler yerine güzergâhın ardışıl olması dikkate alınır ve başlangıç noktasından itibaren en son eşleştirilen noktadan sonraki noktalar test edilerek ilerlenir. U ya da S tipindeki güzergâhlar ardışıklık özelliği taşımayan noktalar gelen $Q_t(x,y)$ değerine daha yakın görülebilirse de ardışıklık kistasının aynı anda uygulanması ile doğru noktanın eşleştirilmesi mümkün olur. Bunun ardından $D(i)$ ve $D(i+1)$ arasında doğrusallaştırılmış ölçekte sefer zaman ekseninde karşılık gelen nokta doğrusal enterpolasyon ile bulunabilir.

Durakta bekleme süresi (dwell time) yine pozisyon değişiminin durması ve yeniden başlaması arasında geçen süre olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında literatürde “Gevşek Zaman” (slack time) olarak tanımlanan plandan sapma değeri de durağa gelme anının plana karşılaştırması yapılarak elde edilebilir ve sefer plan uyum katsayısı belirlenebilir.

Bu çevrimden elde edilen verilerin makine öğrenmesi yöntemi ile işlenmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca doğru gösterim teknikleri ile operatör seviyesinde algılanabilir bir büyük veri gösterimi yapılması gerçekleştirilir (Torre, Del Ser, Laña, Ildia, Bilbao ve Campos, 2018). Bu yaklaşım ile her seferin plana, rotaya ve diğer seferlere yakınsaması aynı anda operatöre gösterilir. Kullanıcının

genel olarak zaman-mekân değişkenlerini aynı anda anlayıp yorumlaması ile ve bunu aynı anda birçok sefere paralel olarak bakarak yapılabilmesi genel olarak hedeflenir.

Geliştirilen yaklaşım ile uç ölçekli veri analitiği kullanılarak otobüs hatlarından IOT teknolojisi ile toplanan verilerin hizmet kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılması söz konusudur. Bu veriler denetimli makine öğrenmesi yaklaşımı ile model oluşturulmuş ve kullanılarak istenmeyen durumların oluşumunun önlenmesi mümkün olur. Gerek sürücünün sürüş kararlarını almasında gerekse operasyon merkezi operatörünün yönetimsel kararlar alması ve müdahalesinde, gerekse üst düzey revizyon kararlarının alınmasında etkili olacak veri görselleştirme ve uyarı bildirim özellikleri operatöre sağlar.

İmplementasyon seviyesinde öte yandan akıllı şehirler kapsamında heterojen yapıdaki veri sağlayıcılarla birlikte çalışma özelliğine sahip olan ve "akıllı ulaştırma sistemleri" alanındaki çalışmalar ile uyum göstermektedir.

Model ile sonuç olarak büyük veri, toplu ulaşımda otobüs perspektifinde yorumlanmakta ve işlenmekte ve anlamlandırılmaktadır. Tüm toplu taşıma otobüs seferlerinde mevcut olan araç içi cihazlardan toplanan büyük verinin işlenip anlamlandırılması ile operasyonel sürücü ve operatör destek mekanizması elde edilmektedir.

Modelin çalışması için öngörülen büyük veri kavramı sayılarla örneklendirecek olursa; Gaziantep genelinde gerçekleşen tüm seferlerden "sadece bir günde" elde edilen veriler ele alındığında aşağıdaki rakamlar ortaya çıkmaktadır:

- Toplam GPS nokta sayısı: 9,821,743,
- Sefer etkinliği: 847,052,
- Sefer sayısı: 12,212,
- Durak giriş çıkışı: 396,387,
- Toplam yolcu sayısı: 300,544.

Sadece bir gün için toplanan veriler bu büyüklükte olup, modelin gerçek zamanlı çalışması gerektiğinde bu verilerin analiz modelleme ve gerçek zamanlı geri besleme ve raporlamada kullanılması gerekmektedir.

Gelişen teknoloji, her alanda aktif rol oynarken, şehirlerin barındırdığı çevresel problemler, kalabalıklaşan ve karmaşıklaşan yapının düzenlenmesi ihtiyacına yönelik geliştirilen akıllı şehir sistemlerinde de yerini almıştır. Akıllı şehir olgusunu oluşturabilmek için karşılaşılan her sorun ve ona getirilecek çözümler büyük önem taşır. Şehir içi yaşanabilecek problemleri toplu taşıma ile ilişkilendirerek, birlikte incelenecek olursa; artan araç sayısı ile yoğunlaşan trafik toplu ulaşımı da etkilemektedir. Bunun için büyük veri analizlerinden sağlanacak olan, trafik verileriyle elde edilen operasyonel destek sistemi sayesinde durak trafiğinin yoğunluğuna göre sefer modülasyonu mümkün olurken, sefere çıkacak olan araca anlık olarak iletilen bilgi ile seferlerin verimliliği iyileştirilebilecektir.

Sonuç ve Tartışma

Modern kentlerin mevcut toplu taşıma sorunları sürekli üzerinde odaklanması gereken problemler olarak ortaya çıkar. Son yıllarda otomobil sahipliğinin de artması ile daha önceden otomobili olmayanların sadece kullanmakta oldukları toplu taşıma olanaklarının herkes tarafından kullanılması politikası güdülmektedir. Bunun için hizmet kalitesi ve hızının daha önceden olmayan ölçülerde iyileştirilmesi beklenmektedir.

Bu çalışmada üzerinde durulan model ile toplu taşımda kullanılan otobüslerin duraklarda birikmesinin engellenmesine ve sefer aralıklarının regülasyonuna, bu sayede durakta bekleyen yolcu sayısının azaltılmasına ve hizmet kalitesinin iyileştirilmesine yönelik bir gerçek zamanlı sürücü etkileşim ve operasyon yönetim sistemi oluşturulmasına yönelik prensipler ortaya konmuştur. Bu sayede, ilk bakışta iyi olduğu sanılan ancak durakta toplam bekleyen yolcu sayısını artıran ve otobüsler arası yoğunluk dengesini olumsuz etkileyen sürücülerin olması gerekenden evvel duruşa gelmeleri problemi ortadan kaldırılabilmektedir. Özellikle ortak kullanılan duraklarda birçok ayrı hat otobüsünün ardı ardına yanaşarak hatta yolu tıkamak sureti ile durak

dışı yolcu indirmek ve bindirmek zorunda kalması problemi bu yaklaşım sayesinde çözülebilir.

Bu çalışma ile otobüslerin arasındaki mesafenin korunarak durak kalabalıklığının engellenmesine ek olarak ayrı kazanımlar da hedeflenmektedir. Sahadan toplanan akıllı ulaşım verilerinin ciddi olarak ele alınarak gerçek zamanlı bir biçimde operasyon kararlarını verebilmesi için bir gösterim altyapısı oluşturulması önem taşımaktadır. Birçok noktada hizmet verilen sektörlerin önemli bölümünde büyük veri analizinin yapılamadığı, görselleştirme ve operasyonel seviyede yararlanma oluşmadığı gözlenmektedir.

Çeşitli performans ölçütlerini doğru ve etkili bir şekilde analiz etme yeteneği, bir ulaşım kuruluşunun hizmet standartlarına ne kadar iyi olabildiğini belirlemesi için oldukça önemlidir. Kent içi ulaşım kurumları, ayrıntılı ve doğru bilgiler içeren ulaşım operasyonlarının performans verilerini oluşturulması ve görüntüleme yöntemlerini anlamaya ve kullanmaya büyük ilgi duymaktadır. Bu tür veriler, yalnızca bir rota boyunca olası sorunlu alanların belirlenmesinde değerli olmayıp hizmet güvenilirliğini artırmak

in için de etkili stratejiler geliştirilmesinde kullanılabilir. Bu nedenle, iyi geliştirilmiş görselleştirme yöntemlerinin büyük miktarda veriyi ve karmaşık performans ölçümlerini kapsamlı bir yapıda aktararak göstermesi paha biçilmez yararlar sağlayabilmektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinin bir parçası olarak gözetim, izleme ve yönetim sistemi ile toplu taşıma kuruluşlarının işletim verimliliği ve hizmet güvenilirliğinin test edilmesi ve analizi için gelişmiş operasyonel veriler toplanması kritik öneme sahiptir.

Akıllı kent perspektifinde ulaşım sağlayıcılar, otobüs hatlarındaki hareketlerin ve mevcut planların detaylı analizini yapabilecek ve operasyonun iyileştirilmesinde ve sorunların giderilmesinde kullanılacak bir görselleştirme ve karar destek sistemine sahip olmalıdır. Seferlerin plana uygunluğu, planın kendi içinde tutarlılığı, hattın kalabalıklığı, kaynakların değerlendirilmesinde adaletin sağlanması, özel gün ve etkinliklerde, felaket durumlarında dayanıklı toplu taşıma hizmeti verilebilmesi bu sayede elde edilecek kazanımlar arasındadır (Zhang, Wen, Lu, Li ve Lei 2020).

Halihazırda model geliştirme aşamasında olup yazılımsal geliştirmesi devam eden bu çalışmanın hedef faydalanıcı kitlesi kullanıcı olarak akıllı toplu taşıma sistem yöneticileri ve sistem operatörleridir. Sistem operatörleri, anlık olarak tüm toplu taşıma seferlerinin sağlıklı bir biçimde hizmet kalitesinden ödün verilmeksizin gerçekleştirilebilmesi ile görevlidirler. Gerek sürücü gerekse operasyonda çalışan personelin halihazırda yapmış oldukları işin rutin yapısı ve yüksek sayıda veriyi aynı anda değerlendirip yorumlama gereksinimleri nedeniyle yeterli performansta çalışamadıkları ve hizmet kalitesindeki aksamaların olduğu belirtilmektedir. Sürücülerin diğer otobüsler hakkında ve yaklaşmakta oldukları durak hakkında bilgileri sadece görme ile sınırlı olup tarife uyumluluğu da sadece önceden tanımlanmış saatlerin uygulaması ile belirlenmiştir.

Yeni önerilen yaklaşım ile sürücü personelin izleme ve geri besleme ile yönlendirilmesi, gerektiğinde hafif yavaşlaması ve beklemesinin temin edilerek sefer aralarındaki sürelerin stabilitesinin ve durak yoğunluğunun azaltılmasının sağlanması hedeflenmektedir. Bu süreç operasyonda da izlenerek operasyonel aşamalarında problemlerin tesbiti ve zamanında doğru kararların alınması sağlanabilir.

Organizasyon yapısı dikkate alındığında toplu taşıma idareleri, belediyeler, operatör alt yükleniciler bu modelden fayda sağlayacak yazılımları satın alarak ya da geliştirerek işletecek birinci seviye kurumlardır. Ancak bunların vermiş oldukları toplu ulaşım hizmeti dikkate alındığında müşteri olan yolcular doğrudan etkilenecek ve asıl memnuniyeti sağlanacak olanlar bireylerdir. Müşteri memnuniyetinin artması ile toplu taşıma kullanım oranı artarken elde edilecek zaman tasarrufu ve iyileşen yaşam kalitesinin ülkenin diğer alanlarında pozitif etki yapması beklenir.

Kaynakça

- Schmaranzer, D., Braune, R., & Doerner, K. F. (2021). Multi-objective simulation optimization for complex urban mass rapid transit systems. *Annals of Operations Research*, 305(1), 449-486.
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaptation under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*, 41(3), 374-392.
- Gkiotsalitis, K., & Maslekar, N. (2018). Multiconstrained timetable optimization and performance evaluation in the presence of travel time noise. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(9), 04018058.
- Furth, P. G., & Wilson, N. H. (1981). Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 818(1981), 1-7.
- Andres, M., & Nair, R. (2017). A predictive-control framework to address bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 123-148.
- He, S. X. (2015). An anti-bunching strategy to improve bus schedule and headway reliability by making use of the available accurate information. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 17-32.
- Moreira-Matias, L., Gama, J., Mendes-Moreira, J., & Freire de Sousa, J. (2014, October). An incremental probabilistic model to predict bus bunching in real-time. In *International Symposium on Intelligent Data Analysis* (pp. 227-238). Springer, Cham.
- Eldeeb, G., Idris, A. O., & Parrott, L. (2018). Agent-based Approach to Modelling Bus Bunching and Dispersion under the Influence of Demand Variability 2. *Transit*, 15(16), 17.
- An, Q., Fu, X., Huang, D., Cheng, Q., & Liu, Z. (2020). Analysis of adding-runs strategy for peak-hour regular bus services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 143, 102100.
- Gkiotsalitis, K., & Alesiani, F. (2019). Robust timetable optimization for bus lines subject to resource and regulatory constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 128, 30-51.
- Guihaire, V., & Hao, J. K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251-1273.
- Shang, H. Y., Huang, H. J., & Wu, W. X. (2019). Bus timetabling considering passenger satisfaction: An empirical study in Beijing. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 1155-1166.

- Ibarra-Rojas, O.J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38-75.
- Xuan, Y., Argote, J., & Daganzo, C. F. (2011). Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1831-1845.
- Berrebi, S. J., Hans, E., Chiabaut, N., Laval, J. A., Leclercq, L., & Watkins, K. E. (2018). Comparing bus holding methods with and without real-time predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 87, 197-211.
- Wu, W., Li, P., Liu, R., Jin, W., Yao, B., Xie, Y., & Ma, C. (2020). Predicting peak load of bus routes with supply optimization and scaled Shepard interpolation: A newsvendor model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102041.
- Mai, E., Backman, M., & Hranac, R. (2011). Visualizing bus schedule adherence and passenger load through marey graphs. In 18th ITS World Congress TransCore ITS America ERTICO-ITS Europe ITS Asia-Pacific.
- Palomo, C., Guo, Z., Silva, C. T., & Freire, J. (2015). Visually exploring transportation schedules. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(1), 170-179.
- Du, F., Brulé, J., Enns, P., Manjunatha, V., & Segev, Y. (2015). MetroViz: Visual analysis of public transportation data. arXiv preprint arXiv:1507.05215.
- Hranac, R., Kwon, J., Bachmann, M., & Petty, K. (2011). Using marey graphs to visualize transit loading and schedule adherence (No. 11-0350).
- Stewart, C., Diab, E., Bertini, R., & El-Geneidy, A. (2016). Perspectives on transit: Potential benefits of visualizing transit data. *Transportation Research Record*, 2544(1), 90-101.
- Kimpel, T. J. (2007). Data visualization as a tool for improved decision making within transit agencies (No. TNW2006-14). *Transportation Northwest (Organization)*.
- Zhang, L., Wen, H., Lu, J., Li, S., & Lei, D. (2020). Vulnerability assessment and visualization of large-scale bus transit network under route service disruption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102570.
- Yu, D., Mishra, S., & Lin, J. (2006). Visualization of bus schedule adherence using GIS. In *Applications of Advanced Technology in Transportation* (pp. 159-164).
- Ceder, A. (2016). *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior*. CRC press.
- Chiraphadhanakul, V., & Barnhart, C. (2013). Incremental bus service design: combining limited-stop and local bus services. *Public Transport*, 5(1), 53-78.
- Zeng, W., Fu, C. W., Arisona, S. M., Erath, A., & Qu, H. (2014). Visualizing mobility of public transportation system. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 20(12), 1833-1842.
- Sobral, T., Galvão, T., & Borges, J. (2019). Visualization of urban mobility data from intelligent transportation systems. *Sensors*, 19(2), 332.
- Anwar, A., Odoni, A., & Toh, N. (2016). Busviz: Big data for bus fleets. *Transportation Research Record*, 2544(1), 102-109.
- Pi, X., Egge, M., Whitmore, J., Qian, Z. S., & Silbermann, A. (2018). Understanding transit system performance using avl-apc data: An analytics platform with case studies for the pittsburgh region. *Journal of Public Transportation*, 21(2), 19-40.
- Torre Bastida, A. I., Del Ser, J., Laña, I., Ildardia, M., Bilbao, M. N., & Campos Cordobés, S. (2018). Big Data for transportation and mobility: recent advances, trends and challenges. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(8), 742-755.
- Kurkcu, A., Miranda, F., Ozbay, K., & Silva, C. T. (2017, June). Data visualization tool for monitoring transit operation and performance. In *2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)* (pp. 598-603). IEEE.
- Lock, O., Bednarz, T., & Pettit, C. (2021). The visual analytics of big, open public transport data—a framework and pipeline for monitoring system performance in Greater Sydney. *Big Earth Data*, 5(1), 134-159.
- Iliopoulou, C. A., Milioti, C. P., Vlahogianni, E. I., & Kepaptsoglou, K. L. (2020). Identifying spatio-temporal patterns of bus bunching in urban networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 365-382.