



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AKILLI SİSTEMLER MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TRAFİK SAYIMI LOKASYON PROBLEMİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI**

İSLAM DİRİ

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KARAKÖSE

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AKILLI SİSTEMLER MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TRAFİK SAYIMI LOKASYON PROBLEMİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İslam DİRİ

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2024

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KARAKÖSE danışmanlığında hazırlamış olduğum “TRAFİK SAYIMI LOKASYON PROBLEMİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

30.07.2024

İslam DİRİ



ÖN SÖZ

Bu çalışmayı, hayatımın her anında yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen rahmetli abim İlhan DİRİ' ye adıyorum. Anısını sevgi, saygı ve özlemle hayatımın sonuna kadar yaşatacağım.

Yüksek lisans sürecimde beni yönlendiren, tecrübe ve birikimini benimle paylaşan hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KARAKÖSE' ye teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin iyileşmesinde yapmış oldukları katkılardan dolayı Dr. Öğr. Üyesi Bayram DÜNDAR ve Dr. Öğr. Üyesi Esmâ BİRİŞÇİ' ye teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarak, her zaman benim yanımda duran, desteklerini hayatımın her alanında hissettiğim değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İslam DİRİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TRAFİK SAYIMI LOKASYON PROBLEMİ İÇİN YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

İslam DİRİ

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KARAKÖSE

Bartın-2024, sayfa: 29

Trafik sayımı, trafik akışını izlemek ve belirli bir süre boyunca bir istasyondan geçen araç nüfusunu ölçmek için kullanılır. Bu sayım bilgileri daha sonra başlangıç-varış seyahat tahmini yapmamızı ve böylece bir ulaşım ağında daha iyi uzun vadeli planlamaya sahip olmamızı sağlar. Ancak bu süreç çok fazla zaman, yatırım ve iş gücü gerektirebilir. Birçok araştırmacı, daha gerçekçi başlangıç-varış seyahat tahmini amacıyla mevcut kaynakların (örneğin emek, zaman, para) optimum kullanımına odaklanmaktadır. Bu nedenle, yönetici veya karar verici, trafik sayım istasyonlarının konumunu, başlangıç-varış çiftleri arasındaki seyahatlerin nasıl gerçekleştiği hakkında bilgi toplayacak şekilde seçer. Konumlama çabasının maliyetini en aza indirirken (yani, minimum sayma istasyonu sayısını bulma), sayım istasyonlarının en uygun yerini bulmayı amaçlayan bu problem literatürde trafik sayımı lokasyon problemi olarak bilinir. Trafik sayımı lokasyon problemleri literatüründe iki temel sorun ortaya çıkmaktadır. (1) Mevcut kesin çözüm yöntemleri düşük hesaplama performansına sahiptir ve bu nedenle yalnızca bir dizi küçük veya orta ölçekli ağa uygulanabilir. (2) Çözülebilecek sınırlı ağ kümesi, bu alandaki yeni sezgisel yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek için kullanılabilecek ölçüt kümesini tam olarak kısıtlar. Bu tezin motivasyonu, her iki sorunun çözümünde iyileştirme yapmanın, bu sorunların bir devletin veya ajansın kaynaklarını etkin bir şekilde yönetmek gibi önemli yönetsel kaygıları ele

alan büyük, gerçek hayat durumlarına uygulanmasına olanak sağlamada önemli bir adım olduğudur. Bu bağlamda, çalışmamız, tüm başlangıç-varış yolculuk çiftlerinin bağlantısını kesmeyi amaçlayan yeni ve etkili Tamsayı Programlama modelleri sunmaktadır. Tüm potansiyel yolların üretilmesine ihtiyaç duymadan başlangıç-varış çiftlerini izleyebilen bu çalışmadaki önerilen modellerin, iyi bilinen ulaşım ağları üzerinde test edilen kapsayıcı hesaplama deneylerimize göre problemi çözmek için gereken süreyi büyük ölçüde azalttığını gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu tezde önerilen modeller, kısa sürede en uygun çözümü geri getirmenin yanı sıra izlenebilirlik nedeniyle, trafik sayımı lokasyon problemi literatüründeki önemli boşluğu doldurmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Matematiksel modelleme, optimizasyon, tamsayılı programlama, trafik sayım lokasyon problemi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NEW SOLUTION APPROACHES FOR THE TRAFFIC COUNTING LOCATION PROBLEM

İslam DİRİ

Bartın University

Graduate School

Department of Intelligent Systems Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Gökhan KARAKÖSE

Bartın-2024, pp: 29

Traffic counts are used to monitor traffic flow and measure the vehicle population crossing a station during a certain period of time. This count information then allows us to make origin-destination trip estimation and thus have a better long-term planning in a transportation network. However, this process may demand great deal of time, investment and labor force. Many researchers focus on the optimal usage of available resources (e.g. labor, time, money) for the purpose of the more realistic origin-destination trip estimation. Hence, a manager, or decision maker, selects the location of traffic count stations such that they gather the information how the trips between origin-destination pairs took place. In this regard, the goal of this study is to effectively estimate all origin-destination trips while locating the minimum number of counting stations. This problem is known as traffic counting location problem in the literature, which aims at finding the optimal location of counting stations while minimizing the cost of location effort (i.e., locating the minimum number of counting station). Two main problems arise in traffic counting location problem literature: (1) the existing exact solution methods have poor computational performance and can thus be applied only to only a set of small or middle-sized networks. Moreover, (2) the limited set of networks that can be solved exactly restricts the set of benchmarks that can be used to assess the efficiency of new heuristic methods in this arena. The motivation

of this paper is that making improvement to the solution of both problems is an important step to allow these problems to be applied to large, real-life situations addressing such important managerial concerns as managing the resources of a government, or agency, effectively. In this regard, our study presents novel and effective Integer Programming models to solve traffic counting location problem, aiming disconnect all origin-destination trip pairs. We observed that the proposed models in this thesis, tracking origin-destination pairs without needing enumeration of all potential paths, greatly reduced the needed time to solve the problem according to our extensive computational experiments tested on well-known transportation networks. Therefore, due to the tractability as well as returning the optimal solution in a short time, the proposed models in this thesis fills the important gap in the traffic counting location problem literature.

Keywords: Integer programming, mathematical modelling, optimization, traffic counting station problem

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	x
EKLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
3. MATERYAL VE METOT	12
3.1. RsKM’ nin Yeniden Modellenmesi.....	15
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	19
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	24
KAYNAKLAR.....	26
EKLER	29
ÖZGEÇMİŞ	30

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
3.1: Düğüm i ve düğüm j arasındaki bağlantı tespiti	13
3.2: Düğüm i ve düğüm j arasında daha kompakt bir rota gösterimi	15
3.3: Örnek bir ulaşım ağı	17
4.1: Sioux Falls ağı	20



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
4.1: RtOM' nin Sioux Falls ağındaki performans ölçümü.....	20
4.2: İncelenilen ulaşım ağı örneklerine ait veriler.....	21
4.3: İncelenilen ulaşım ağlarına ait performans sonuçları.....	22



EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No
EK 1. RtOM' nin düğüm sensörü konumlandırılması ile ilgili revize modeli.....	29



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

s : saniye

KISALTMALAR

GA : Genetik Algoritma
KAM : Kısıt Azaltma Metodu
OĐ : Başlangıç / Bitim (Varış)
PM : Partikül Madde (PM)
RsKM : Rota Üretme İhtiyacını Ortadan Kaldıran (Rotasız) Kompakt Model
RsKM-1 : RsKM' nin Algoritma 1 İle Entegrasyonu
RtOM : Rota Tabanlı Optimizasyon Modeli
TM : Tamsayılı Programlama
TSLP : Trafik Sayım Lokasyon Problemi
TSKP : Trafik Sensörü Konumlandırma Problemi

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşım ağlarında, her yıl milyonlarca kişi yaralanmaktadır ve binlerce kişinin ölümüne neden olan trafik kazaları meydana gelmektedir (Dünya Sağlık Örgütü Raporu, 2023). Bu trajik olaylara ek olarak, karayolları ulaşım ağını kullanan araçlardan kaynaklanan ciddi miktarda küresel sera gazı ve CO₂ yayılımı olmaktadır. Yakın zamanda yayınlanan bir rapor, ulaşımın dünya çapında sera gazı emisyonlarının yaklaşık %14'ünden ve CO₂ emisyonlarının %23'ünden sorumlu olduğunu göstermiştir (Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2019). Buna ek olarak, partikül madde (PM) emisyonlarının önemli bir kısmı karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır ve bu durum çevre kirliliği sorunlarını daha da kötüleştirmektedir (Mutlu, 2019). Bu sorunların üstesinden gelmek ve sürdürülebilir ulaşımı sağlamak için geleneksel çözümler (örneğin, karayollarının genişletilmesi) yerine akıllı şehirlerin kurulmasını önemlidir. Akıllı şehirler, teknolojik gelişmelerle birlikte şehir hayatını daha verimli ve aktif bir şekilde kullanmayı amaçlamaktadır. Bu şehirler, etkin kaynak kullanımı, çevresel etkilerin azaltılması ile birlikte kaliteli yaşam standardı oluşturmayı hedeflemektedir. Akıllı şehirler, ilerleyen ve her alanda gelişen teknolojinin şehir yaşamına entegrasyonu sayesinde sürekli gelişen, yaşanılabilir ve etkin kullanılacak kentler oluşturmayı hedeflemektedir. Geleceğin yaşam alanlarını oluşturacak bu kentler, şehircilik yapısını temelden şekillendirecektir. Bu sayede yaşam kalitesi ve verim artacaktır. Trafikğin izlenmesi ve yönetimi bu noktada önemli bir role sahiptir. Trafik sayımı, trafik yoğunluğunu izlemek ve yeni çözümler sunmak adına oldukça önemli bir faaliyettir. Bu faaliyetin optimal bir şekilde gerçekleşmesi için doğru lokasyonların seçilmesi gerekmektedir. Literatürde trafik sayım sensörlerinin yer tespitine dair oluşan problem, Trafik Sayım Lokasyon Problemi (TSLP) olarak bilinmektedir. TSLP, bu seçimi doğru ve etkin bir şekilde gerçekleştirmek adına geliştirilmiş bir optimizasyon problemidir.

Karayollarına kurulan trafik sayım/izleme sistemleri, akıllı şehirler için gerekli olan akıllı ulaşım sistemlerinin temel bileşenleridir. Etkin bir şekilde konumlandırılmış sensörler, trafikğin etkin yönetimini, planlamasını ve akışını geliştirmek için kullanılabilecek gerçek zamanlı trafik bilgileri sağlar. Bu bilgiler, trafik kazaları ve trafik sıkışıklığı (Dünya Sağlık Örgütü Raporu, 2023), çevre ve gürültü kirliliği (Mutlu, 2019), zaman kaybı ve yaşam kalitesinin bozulması (Gürültü, 2022) gibi çeşitli sorunların izlenmesinde ve

yönetilmesinde katkı sağlar.

Sensörler ve video kameralarla gerçek zamanlı olarak karayolu ulaşım ağlarının izlenmesi halihazırda kullanılan bir teknolojidir. Ancak çoğu durumda, bu teknoloji yardımıyla büyük ulaşım ağının sadece bir bölümü izlenilmektedir. Sensörlerin ağ üzerinde stratejik olarak konumlandırılmasıyla birlikte ilgilenilen ulaşım ağındaki akışın tamamını veya önemli bir bölümünün doğrudan veya dolaylı olarak tespit edilebilecektir. Ancak, literatür de önerilen yöntemler sadece bir dizi küçük veya orta ölçekli karayolu ulaşım ağına veya büyük karayolu ulaşım ağlarının sadece küçük kısımlarına uygulanabilmektedir. Ayrıca, karayolu ulaşım ağının önemine binaen bu ağlarda hızlı ve etkin müdahale gerekliliği, karşılaşılan sorunların çözümlerinin kısa sürede elde edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu da altyapılardan merkezi idarelere etkin bir veri akışı kurulmasını, bu verilerin kontrol edilmesini ve üzerine titiz bir analiz yapılmasını gerektirmektedir.

Bu tezin amacı, akıllı ulaşım sistemlerinin en temel aşaması olan veri toplama sürecinin minimum kaynak kullanımı ile en verimli ve en hızlı şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, TSLP bu tez kapsamında irdelenecektir. TSLP, tüm başlangıç-bitiş (OD) yolculuklarının etkin bir şekilde izlenilmesi için en az sayıda kullanılacak trafik sayım sensörleri için en uygun lokasyonları bulmayı amaçlar. Başka bir deyişle, TSLP’ de verilen ağdaki tüm akışı izleyebilmek adına ulaşım ağındaki sensör konumlandırma maliyetini ifade eden sensör sayısını enazlamaya çalışılacaktır. Ulaşım ağının kontrolü, yönetimi ve planlamasında ağda konumlandırılacak sensörler için en uygun yerleşim noktaları, bu tez kapsamında TSLP’ yi makul bir süre içerisinde çözerek gerçekleştirecektir.

TSLP literatüründeki çalışmalarda iki problem ortaya çıkmaktadır. Birincisi, mevcut kesin çözüm yöntemleri düşük hesaplama performansına sahiptir ve bu nedenle yalnızca bir dizi küçük veya orta ölçekli ağı uygulanabilir. İkincisi, tam olarak çözülebilen ağların sınırlı olması, bu alandaki yeni sezgisel yöntemlerin verimliliğini değerlendirmek için kullanılabilecek üzerinde kıyaslama yapabilecek ağ kümesini kısıtlamaktadır. Bu tezin motivasyonu, her iki problemin çözümünde iyileştirme yapmaktır. Daha spesifik olarak, bu tez TSLP literatürüne aşağıdaki önemli katkıları sunmaktadır.

- Bu tezde, rota bazlı düğüm ve ayrıt üzerine optimal sensör yerleşimi yapabilecek tam sayılı programlama modelleri sunulacaktır. Bu modellerde önerilecek yöntem ile kısıt ve karar değişkeni azaltılması sağlanacaktır.
- Bu tezde ilk kez rota üretimi açıkça yapılmaksızın TSLP çözülecektir. Bu modelin üstünlüğü, literatürdeki yöntemlerin aksine, tüm OĐ çiftleri arasındaki yolların açıkça izlenmesi gerekliliğinin ortadan kaldırılmasında yatmaktadır.
- Bu tezde, yeni bir algoritma ile gereksiz kısıt kümeleri ortadan kaldırılacaktır. Böylece çözüm hızını daha da arttırılmış olacaktır.
- Bu tez ile literatürde yer alan birçok büyük ölçekli ağ için TSLP ilk kez çözülmüş olacaktır.

Bu tezin geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır. Literatür taraması bölümünde, bu tezin yeniliklerini ortaya koyarak TSLP literatürünü derinlemesine sunmaktadır. Materyal ve Metod bölümünde, TSLP için önerilen çözüm yöntemleri detaylı bir şekilde verilecektir. Bulgular ve Tartışma bölümünde, kapsamlı hesaplama deneylerine ait sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Son olarak, Sonuç ve Öneriler bölümünde, elde edilen sonuçların özetlenmesi ve gelecek çalışmalar ile ilgili öneriler bulunmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Etkili bir karayolu taşımacılığı sistemi, insanların ve malların güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasına olanak sağlar. Bu sistem ekonomik refahı güçlendirdiği gibi yerel, ulusal ve uluslararası ticaret faaliyetini de iyileştirmektedir. Ayrıca, güvenli yol standartlarının yükseltilmesiyle karayolunda trafik kazaları minimize edilerek güvenli yolculuk sağlanılmaktadır. Gomes (2015) modern teknolojilerin ve akıllı trafik yönetim sistemlerinin entegrasyonu ile trafik akışının daha iyi yönetildiğini ve böylece taşımacılığın zamanında ve kesintisiz gerçekleştiğini dile getirmektedir. Bu faktörlerle birlikte, karayolu taşımacılığı veriminin önemli ölçüde arttığı ve toplumsal kalkınmışlığın önemli bir ayağını oluşturduğu sonucuna varılmaktadır. Gomes (2015) tarafından da vurgulandığı üzere, bu alanda yapılan yatırımlar güvenliğin artırılmasında, seyahat sürelerinin ve işletme giderlerinin azaltılmasında hayati bir rol oynamaktadır. Yol ağlarındaki trafik akış düzenlerinin anlaşılması, trafik sensörlerinin yaygın kullanımını teşvik eden temel bir unsurdur. Bu sensörler, Fei, Mahmassani ve Murray-Tuite (2013) tarafından belirtildiği üzere, trafik izleme için uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Etkili bir karayolu taşımacılığı ağı sisteminin hangi faaliyetler ile geliştirilebileceğine dair önemli bilgiler içermektedir. Araştırmacılar, yol sensörlerinin tam zamanlı veri toplama yetenekleri neticesinde trafik yoğunluğunu ve tıkanıklığını tespit ederek etkin bir koordinasyon ile yönetilebildiğini belirtmektedir. Sensörler, trafik kontrolü, sinyal zamanlaması, olay tespiti ve araç kategorizasyonu dahil olmak üzere çeşitli trafik yönetimi uygulamaları için değerli veriler sağlarlar (Garber ve Hoel, 2014; Wang, 2013). Gentili ve Mirchandani (2012) trafik sensörlerini dört gruba ayırmaktadır: trafik sayımı, güzergâh takibi, görüntü tanıma ve araç tanımlama. Örneğin, güzergâh takibi sensörleri, trafik sayım sensörlerinin akış hacmi, hız gibi nokta verilerine ek olarak rota akışı gibi yol verilerinin çıkarımında kullanılmaktadır (Shan vd., 2018). Trafik sensörlerinin ulaşım ağının tüm bağlantı yollarına veya kavşaklara kurulması, sınırlı kaynaklar nedeniyle neredeyse imkansızdır (Bianco vd., 2001). Bu nedenle, karayolu ulaşım yetkilileri, sensörleri stratejik noktalara yerleştirerek maksimum düzeyde fayda sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle trafik akışının yoğun olduğu ana arterler, kritik kavşaklar ve kazaların en fazla meydana geldiği bölgeler sensör yerleşimi için öncelikli olarak seçilmektedir. Bu stratejik yaklaşım, kıt kaynakların optimal şekilde kullanılmasını sağlamakla kalmayıp trafik ağı yönetim sistemlerinin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Bianco vd. (2001) alternatif veri alma/toplama yöntemlerinin ve teknolojilerinin ulaşım ağındaki tartışmasız önemini altını çizmiştir. Örneğin, araçlardan

alınan GPS verileri, mobil cihazlardan toplanan anonimleştirilmiş datalar ve havadan görüntüleme teknikleri bu alanda yapılacak yenilikçi yaklaşımlar, trafik izleme ve yönetim kademelerinde faydalanılabilecek alternatif teknolojiler arasındadır. Bu alternatif yöntemler, mevcut sensörlerin sınırlamalarının üzerine çıkarak daha büyük alanlarda veri seti sunabilir ve ulaşım ağının daha yüksek verim elde edilmesini sağlayabilir.

Sonuç olarak, akış verilerini toplamak için hangi ağ ayrıtlarının ve düğümlerinin sensörlerle donatılması gerektiğini belirlemek önemlidir. Bu problem genel olarak, Trafik Sensörü Konumlandırma Problemi (TSKP) adlandırılmaktadır (Owais vd., 2019). Bu problem, karayolu ulaşım ağlarında trafik akışlarını izlemek, trafik yoğunluğu hakkında önceden öngörülebilecek bilgiler almak, yol durumu ve güvenliğini iyileştirmek gibi çeşitli hedefleri olan karmaşık ve bir o kadar da zor olan bir problemidir.

TSKP' yi çözmek için öncelikle bazı konularda bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bu faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Ağ Topolojisi: Ulaşım ağındaki yol ağı ve bu ağın topolojik yapısı, sensör konumlandırmada önemli bir faktördür. Hangi düğümlerin (yol kavşakları) ve ayrıtların (yollar) daha öncelikli olduğunu belirlemek adına ağın ayrıntılı analizi yapılmalıdır.
- Trafik Yoğunluğu: Trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler, elde edilen verilerin değerlendirilmesi problemin çözümüne önemli katkılar sağlamaktadır. Böylelikle, bahsi geçen bölgelere sensör konumlandırma işlemi öncelikli alanlar kategorisinde değerlendirilebilir.
- Bütçe Kısıtlamaları: Ekonomik manada sensörlerin maliyeti ve mevcut problemin çözümü için ayrılan bütçe, kullanılacak sensörlerin adedini ve yerleştirileceği yerleri etkileyebilir. Kıt bir bütçeyle optimal veri elde etme stratejisi uygulanabilir.
- Veri Kalitesi ve Kapsamı: Konumlandırılacak sensörlerin yerleri, elde edilecek verinin kalitesi ve kapsamına direk etki etmektedir. Mevcut ağın etkili ve verimli bir şekilde takip edilebilmesi için stratejik yerlere sensörler konumlandırılmalıdır.
- Sensör Tipleri ve Özellikleri: Çeşitli tarzdaki sensörler (örneğin, video kameralar, loop dedektörleri, GPS tabanlı sensörler) alternatif veri türleri ve hassasiyeti farklı farklı olanlar mevcuttur. İhtiyacı karşılayacak en uygun sensör tipleri seçilmelidir.

TSKP, ulaşım ağındaki trafik yönetimi için önemli bir etkiye sahiptir. Daima gelişen ve hızına ulaşmada zorluk yaşadığımız teknolojik gelişmeler ile birlikte daha sofistike yöntemler geliştirilmektedir. TSKP, sensör türleri, hata olasılıkları, bütçe sınırlamaları ve kurulum hedefleri gibi faktörlerle birleştiğinde, kolayca tanımlanabilen ancak çözülmesi zor bir problem olarak ortaya çıkmaktadır (Salari vd., 2021). Gentili ve Mirchandani (2012) tüm sensör tipleri içerisinde trafik sayım sensörlerinin en yaygın kullanılan sensörler olduğunu belirtmektedir. Bu sensörler, trafik ulaşım ağında bulunan mevcut yolları kullanan araçların sayısını, hızını ve hatta türünü dahi belirlemek için kullanılır. Trafik sayım sensörleri, farklı yollarla uygulanabilir ve önemli fırsatlar sunar. Genel tercih edilen türler arasında manyetik indüksiyon döngü sensörleri, radar sensörleri, kızılötesi sensörler ve akustik sensörler bulunmaktadır.

Manyetik indüksiyon döngü sensörleri, yol yüzeyine gömülerek araçların manyetik alanını algılar ve geçişlerini kaydeder. Bu sensörler, dayanıklı uzun ömürlü olmaları ve yüksek hassasiyetleri en çok tercih edilebilen sensör olmalarını sağlamıştır. Radar sensörleri, radyo dalgaları kullanarak araçların hızını ve mesafesini ölçer, bu da özellikle yüksek hızlı yollarda kullanılmalarını sağlamıştır. Kızılötesi sensörler, ısıya duyarlılıkları sayesinde gece ve gündüz fark etmeksizin kullanılabilir ve genellikle yaya trafiğini de takip etmek için tercih edilir. Akustik sensörler ise ses dalgalarını kullanarak araçları tespit eder ve özellikle büyük şehirlerde gürültülü şehirlerde kullanılan sensör çeşididir.

Gentili ve Mirchandani (2012), trafik sayım sensörlerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, trafik yönetim sistemlerinin temel taşlarından biri haline geldiğini belirtmektedir. Bu sensörler, trafik kapasitesini izlemek, yolların durumunu analiz etmek, trafik yoğunluğunu tespit etmek ve geliştirilebilir ulaşım planlama faaliyetleri için miheng taşı niteliğinde veriler sağlamaktadır. Bununla beraber, gerçek zamanlı veri toplama kabiliyetleri sayesinde, trafik yönetim/koordinasyon yerlerinin anlık kararlar almasına ve öngördükleri müdahaleleri anında yapmasına fırsat tanımaktadır. Bu yaygın kullanım, trafik sayım sensörlerinin güvenilirlikleri, doğrulukları ve ekonomik durumlarla da bağlantı kurulabilir. Farklı ortamlara ayak uydurabilmeleri ve büyük veri seti sunabilmeleri, trafik yönetimi ve planlamasında kilit bir rol oynamalarına olanak sağlar.

TSLP kısaltmasının, TSKP' nin bir versiyonu olan trafik sayım (sensör) konum problemine

atıfta bulunmak için kullanıldığını bir önceki bölümde belirtmiştik. Başka bir deyişle, TSLP, TSKP' nin altında spesifik olarak trafik sayım sensörleri üzerine kurulmuş olan problemi temsil etmektedir. Hatırlayacak olursak TSLP, bir ulaşım ağındaki tüm trafik akışını takip etmek için sayım sensörlerinin optimum sayısını ve yerleşimini belirler. Burada, sayım sensörleri trafik akışını izlemek ve belirli bir süre boyunca belirli bir noktadan geçen araç nüfusunu ölçmek için kullanılır (Chen vd., 2007). Elde edilen sayım verileri daha güvenli, daha verimli ve çevre dostu bir ulaşım planının oluşturulmasını sağlar (Castillo vd., 2015). Ayrıca, sensörler aracılığıyla elde edilen veriler trafik akış sürelerini, trafikteki günlük ortalama araç sayılarını ortaya koyar. Bu ise, akış başlangıç ve varış noktaları arasındaki yolculukları temsil eden OD tablolarının tahmin edilmesine yardımcı olur. Buradaki OD akış tabloları, ulaşım ağındaki planlama ve operasyonlar için önemli bir girdi olan başlangıç ve varış düğümleri arasındaki yolculukların miktarını belirtir (Gentili ve Mirchandani, 2012; Wang, Gentili ve Mirchandani, 2012). Gentili ve Mirchandani (2012)' nin çalışmalarına göre, OD başlangıç/varış akış tabloları, trafik tahminleri, yol ağı optimizasyonu ve hacimsel planlama gibi değişik ulaşım yönetimi ve planlama adımlarında önemli görevler üstlenmektedir. Özellikle, kullanılan tablolar ulaşım ağı talebini analiz etmek, trafiğin yoğun olduğu yerleri belirlemek ve trafik akışını planlamak için başvuru tablolarıdır. Wang, Gentili ve Mirchandani (2012) OD akış tablolarının gerçek zamanlı trafik yönetimi ve stratejik ulaşım planlamasının yapılabilmesi adına bu tabloların öneminden bahsetmektedir. Yine bu tablolar, trafik yönetim merkezlerine, belirlenen yollar veya kavşaklar kullanılarak mevcut tıkanıklıkları öngören ve bunun için önlem alabilecek fırsatlar sağlar. Ayrıca, ulaşım altyapısının iyileştirilmesi ve genişletilmesi için ihtiyaç duyulan verilere ulaşım imkânı sağlayan kritik bir rol oynar. OD akış tablolarının doğruluğu ve güncelliği, verimli ve etkili bir ulaşım ağı yönetimi için kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, trafik sayım sensörlerinden ve bunun dışındaki farklı veri toplama yöntemlerinden toplanan veriler, bu tabloların yapılmasında ve güncellenmesinde en önemli etkiye sahiptir. Elde edilen bu veriler, ulaşım ağı sistemlerinin verimliliğini yükseltmek ve bu yolları kullananların deneyimlerini geliştirmek için önemli kararlarda başvurabilecekleri yardımcı kaynaklardır.

OD yolculuklarını takip etmek için anketler gibi geleneksel yöntemlerin kullanılması maliyetli, zaman alıcı ve emek yoğunudur. Bu nedenle, birçok araştırmacı sensör kullanımı gibi alternatif yöntemlere odaklanmıştır. OD matrislerinin doğruluğunun sensörlerden

toplanan verilerin kalitesine bağılı olduğunu ve sensörlerin miktarı ve konumlandırılmasından büyük ölçüde etkilendiğini belirtilmiştir (Larsson, Lundgren, & Peterson, 2010). Sensör yerleştirme konusunda TSKP' nin çeşitli versiyonlarına odaklanan birçok çalışma bulunmaktadır. Chootinan, Chen ve Yang (2005) OĐ çiftleri arasındaki akışları tahmin etmek için trafik sensörlerinin yerleştirilmesine yönelik iki amaçlı bir formülasyon geliştirmiş ve bağlantı kopukluğu sağladığı OĐ çiftlerinin sayısını maksimize etmek ile kullanılan sensör sayısını minimize etmek arasında denge kurmuştur. Bazı araştırmacılar, trafik yönetiminde bütçe kısıtlamalarına bağılı kalırken konum kurallarını en üst düzeye çıkarma zorluğunu ele almak için matematiksel formülasyonlar geliştirmiştir. Yim ve Lam (1998) kısıtlı sayıda sensörle takip edilen OĐ akışlarını maksimize etmeye odaklanan bir model sunmuşlardır. Bu model, kısıtlı sayıda sensör kullanılarak izlenen OĐ akışlarını maksimize etmeye yönelik bir model ifade etmektedir. Karayolu ulaşım ağı içinde az sayıda konumlandırılan sensörlerin optimal şekilde kullanılmasını ve böylece OĐ akışlarının (başlangıç ve varış noktaları arasındaki yolculukların miktarı) doğru ve etkili bir biçimde öngörülmesini amaçlar.

Model, kısıt ekonomisi ve az kaynak ile en yüksek veri doğruluğu ve kapsamını elde etmek adına stratejik sensör yerleşimi yapmayı en temel amaç olarak görmektedir. Yim ve Lam (1998) sensörlerin yerlerinin tespit edilmesi için optimal stratejik faaliyetlerin geliştirilmesi gerektiğini ve bu stratejilerin, karayolu ulaşım ağının iyileştirilmesi ve elde edilen verilerin doğruluğunun artırabileceğini belirtir. Modelin temel unsurları; stratejik sensör yerleşimi, veri entegrasyonu ve analiz, optimizasyon teknikleri ve model doğrulama ve kalibrasyon olmak üzere dört unsurdan bahsetmektedir.

Stratejik sensör yerleşimi, sensörlerin karayolu ulaşım ağlarında trafik akışını en iyi tespit edebilecek noktalarda konumlandırılması ve bu sayede trafik akışının yoğun olduğu arterler, ana kavşaklardaki akışı takip etmesini sağlar. Veri entegrasyonu ve analizi, Sensörler aracılığıyla toplanan verilerin entegre edilmesi, OĐ akışlarının öngörülerinde kullanılması sayesinde yolculuk süreleri, araç sayıları ve hız bilgilerine ulaşmayı sağlamaktadır. Optimizasyon teknikleri, matematiksel ve algoritmik yöntemler kullanılarak sensörlerden alınan verilerin en verimli ve aktif şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Eksik veriler tamamlanarak doğru öngörülerde bulunmasına olanak sağlar. Model doğrulama ve kalibrasyon, modelin doğruluğunu yükseltmek için gerçek trafik verilerinden

yararlanılarak karşılaştırma yapılır ve gereken kalibrasyonlar gerçekleştirilmeye çalışılır.

Yim ve Lam (1998) modelin az kaynakla dahi verimli trafik izleme ve yönetim analizleri ortaya koyabileceğini ve böylece karayolu ulaşım ağının genel verimliliğini ve güvenliğini yükseltebileceğini göstermektedir. Model, bilhassa büyük kentlerdeki karmaşık trafik ağlarının yönetimi adına aktif rol üstleneceği kabul edilir. Yang ve Zhou (1998) takip edilen rota akışını maksimize etmenin yanı sıra tüm OD çiftleri arasındaki akışların tamamının kapsamını sağlamak için bir model geliştirmiştir. Bu model, ulaşım ağındaki her bir OD başlangıç/varış çiftlerini izleyerek tüm ulaşım ağında bulunan yollara doğru ve verimli bir şekilde yönlendirme yapmayı hedeflemektedir. Modelin ana beş unsuru; kapsamlı sensör yerleşimi, rota akış maksimizasyonu, veri entegrasyonu ve analiz, matematiksel ve algoritmik yaklaşımlar, model doğrulama ve kalibrasyondur.

Kapsamlı Sensör Yerleşimi: Ulaşım ağındaki tüm OD başlangıç/varış çiftleri arasındaki akışların takibinin sağlanması için sensörlerin stratejik noktalara yerleştirilmesi. Bu, yalnızca belirli ana yollar ve kavşaklar üzerindeki akışı değil, aynı zamanda yoğunluğun daha az olduğu yolların da takip edilmesini sağlar. Bu sayede, ulaşım ağı üzerindeki tüm akışlar detaylı ve kapsamlı şekilde takip edilerek veriler toplanır.

Rota Akış Maksimizasyonu: Sensörlerle verilerinin toplanması ve analizi esnasında, belirlenen rotalardaki trafik akışının optimize edilmesi ile trafik yoğunluğunun yüksek olduğu rotalarda veri doğruluğunu yükseltmek ve bu rotalardaki trafik yönetimini iyileştirmek için kullanılır.

Veri Entegrasyonu ve Analizi: Sensörler aracılığıyla toplanan verilerin entegre edilmesi, OD akışlarının öngörülerinde kullanılması sayesinde yolculuk süreleri, araç sayıları ve hız bilgilerine ulaşmayı sağlamaktadır.

Matematiksel ve Algoritmik Yaklaşımlar: Matematiksel ve algoritmik yöntemler kullanılarak sensörlerden alınan dataların en verimli ve aktif şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Eksik veriler tamamlanarak doğru öngörülerde bulunmasına olanak sağlar.

Model Doğrulama ve Kalibrasyon: Modelin doğruluğunu yükseltmek için gerçek trafik

verilerinden yararlanılarak karşılaştırma yapılır ve gereken kalibrasyonlar gerçekleştirilmeye çalışılır. Yang ve Zhou'nun geliştirdiği model, ulaşım ağlarında trafik akışlarını izlemek ve yönetmek adına daha kapsamlı bir yaklaşım ortaya koyarak, tüm ulaşım ağını daha etkili bir şekilde optimize edilmesini sağlar. Bu model, hususi olarak büyük ve karmaşık kentlerdeki trafik yönetimi için önemli bir vasıta ve hem yolculuk sürelerini minimize etmek hem de ulaşım ağındaki trafik sıkışıklığını minimize etmek amacıyla kullanılabilir.

Abreu vd. (2022) maksimum sayıda kullanılacak cihaz sayısı ve izlenen şeritlerle ilgili kısıtlamaları içeren TSLP' nin bir versiyonunu ele alan bir formülasyon sunmuştur. Daha spesifik olarak, onların modeli, sınırlı sayıda mevcut sensör ve izlenecek şerit sayısı göz önüne alındığında takip edilen OĐ çiftleri arasındaki akış miktarını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamıştır. Diğer araştırmacılar, ulaşım ağlarındaki tüm ayrıt akışlarını ölçmek için trafik sayım sensörlerinin en uygun şekilde yerleştirilmesine odaklanmıştır. Yaygın yaklaşımlar, düğümlerdeki girdi-çıkış akış hacimlerinin dengelenmesini üzerine kurulu, minimum sayıda sensör kullanılarak ağına ait bazı ayrıtlardaki akışları doğrudan tespit ederken (sensörlerin bulunduğu ayrıtlardaki akışlar doğrudan ölçülür), diğer ayrıtlar üzerindeki akış miktarları hakkında dolaylı yoldan çıkarımda bulunmaktadır (Gentili ve Mirchandani, 2011). Bu sensör yerleştirme problemi için Hu ve diğerleri (2009) link-rota ilişkisi insidans matrisine dayalı bir çözüm üretirken, Ng (2012, 2013) link-düğüm ilişkisi insidans matrisini kullanarak bir çözüm üretmiştir. Xu ve diğerleri (2016) ise bu problemi kısa sürede en iyi şekilde çözmek için yeni bir yöntem ortaya koymuştur.

Bu tez ile daha çok ilişkili çalışmalar, OĐ akış çiftleri arasındaki yolculuk akışlarını tespit etmek için sayım sensörlerinin optimum yerleşimine odaklanandır. Yang vd. (2001) bir ağdaki trafik sayım sensörlerinin optimum seçimi için tarama bazlı TSLP formülasyonlarını sunmuştur. Bu, TSLP için OĐ akış çiftleri arasındaki bağlantıları ayırma konseptini kullanan ilk çalışmadır. Burada, OĐ çiftleri arasındaki yolculuklar, yalnızca ağın ayrıtları boyunca konumlandırılmış sayım istasyonlarını içermeyen alternatif rotalar yoksa gözlemlenmiş olarak kabul edilir. İlgili makale, iki TSLP senaryosunu ele almaktadırlar: (1) mümkün olduğunca çok sayıda OĐ çifti arasındaki bağlantıyı koparmak için belirli sayıda sayım istasyonunun konumlandırılması (2) tüm OĐ çiftlerini arasındaki bağlantıyı koparmak için gereken en az sayıda sayım sensörünün belirlenmesi. Yang, Yang

ve Gan (2006), Yang vd. (2001) tarafından tanıtılan TSLP için tamsayı programlama (TM) formülasyonu sağlamıştır. Trafik sayımı için en uygun konumları belirlemek üzere en kısa yol kavramına dayalı bir sütun oluşturma metodolojisi geliştirmişlerdir. Ancak, her bir OĐ akış çifti için rotaların üretilmesi ve izlenilmesi, büyük ölçekli ağlarda rota sayısındaki üstel artış nedeniyle hesaplama açısından oldukça yoğun işlem yükü gerektirir ve birçok ağ için uygulanamazdır. Chen vd. (2007), gerekli hesaplama süresini azaltmak için bir Genetik Algoritma (GA) geliştirmiştir.

Yakın zamanda, Gonzalez vd. (2019) bu sorunun üstesinden gelmek için Dal ve Sınır ve Kümeleme Arama algoritmaları sunmuştur. Brezilya'da 24.000 yol bağlantısı, 20.000 kavşak ve 5600 belediyeden oluşan karayolu ağı üzerinde trafik sayım istasyonlarının yerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Belediyeler arasındaki yolculukları tahmin etmek için ağdaki trafik sayım istasyonlarının minimum sayısını ve en uygun konumlarını bulmaya odaklanmışlardır. Ağın büyüklüğü nedeniyle, ülkeyi eyalet sınırlarına göre bölümlere ayırmışlardır. Böylece önerdikleri yöntemler ile bu eyaletlerin bazıları çözebilir hale gelmiştir. Daha sonra, Viera vd. (2021), TSLP'yi çözmek için yeni bir küme kaplama tabanlı prosedür önermiş ve sunduğu yöntemlerin González vd. (2019) tarafından önerilen yöntemlere göre üstünlüğünü göstermiştir. Yaklaşımları, González vd (2019) tarafından birçok eyalet için optimum veya optimuma yakın çözümler sunmaktadır. Fakat, hesaplama testleri, 1.000-2.000 düğümlü ağlar ile temsil edilen bazı eyaletler için optimum sensör yerleşiminin iki saatlik bir zaman dilimi içinde oluşturulamadığını da göstermiştir. Genel olarak, literatürdeki çözüm yaklaşımlarında yer alan rota oluşturma ve rota işleme nedeniyle, bu yaklaşımlar düşük hesaplama performansına sahiptir. Dolayısıyla, literatürdeki yöntemler yalnızca bir dizi küçük veya orta ölçekli gerçek ulaşım ağına veya büyük ulaşım ağlarının bir dizi alt bölümlerine uygulanabilmektedir.

Yukarıdaki paragrafta bahsedilen rota tabanlı yöntemlerden farklı olarak bu tezde, ilk defa OĐ akış çiftleri arasında açıkça rota oluşturma ihtiyacını ortadan kaldıran yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tezdeki yaklaşım ile iç içe geçmiş bir yapı elde edilmekte ve rotalar özyinelemeli bir yaklaşımla takip edilmektedir. Dolayısıyla, buradaki yaklaşım büyük ağlar için bile hızlı bir şekilde optimum çözümler üretebilmektedir. Bu da potansiyel olarak bu çalışmayı TSLP literatüründeki gelecek çalışmalar için faydalı bir kıyaslama temeli haline getirmektedir.

3. METARYAL VE METOT

$G = (N, A)$ olarak gösterilen yönlendirilmiş bir ulaşım ağı olsun. Burada N düğümler kümesini ve A ayrıtlar kümesini temsil etsin. W , OĐ akış çiftlerini gösteren bir küme olsun. W' da $w = (s, t)$ olarak gösterilen her OĐ akış çiftinin bir başlangıç noktası (s) ve bir varış noktası (t) vardır. G ağındaki düğümlerin, ayrıtların ve OĐ çiftlerinin boyutu sırasıyla $|N|$, $|A|$ ve $|W|$ olarak tanımlansın. Ayrıca, G ağı üzerindeki $w \in W$ akış çiftlerinin kullanacağı rotalar $r \in R$ ile temsil edilsin. Bu notasyonlar dikkate alınarak, parametre δ_{ij}^{wr} ve karar değişkeni x_{ij} aşağıdaki gibi tanıtlır.

$$\delta_{ij}^{wr} = \begin{cases} 1, \text{eğer ayrıt } ij \text{ akış çifti } w' \text{nin } r \text{ rotası üzerindeyse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{eğer trafik sayım sensörü ayrıt } ij \text{ üzerine yerleştirilirse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

İlk olarak Yang vd. (2006) tarafından önerilen rota tabanlı optimizasyon modeli (RtOM) aşağıdaki gibidir.

$$\min \sum_{ij \in A} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{ij \in A} \delta_{ij}^{wr} x_{ij} \geq 1, \forall r \in R, w \in W \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall ij \in R \quad (3)$$

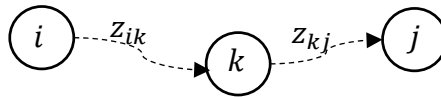
Amaç fonksiyonu (1), belirli bir ağıdaki tüm OĐ çiftlerini izlemek için gereken trafik sayım istasyonlarının sayısını en aza indirir. Kısıt kümesi (2), ağıdaki her bir OĐ çiftinin w rotasını en az bir trafik sayım sensörü tarafından izlenmesini sağlayarak ilgili OĐ çiftine ait tüm akışların izlenmesini mümkün kılar. Kısıt kümesi (3) değişkenlerin yapısını tanımlar. Burada, ağ büyüdükçe, RtOM' ye ait (2) numaralı kısıt kümesi üstel olarak artmaktadır ve bu ise birçok durumda problemi hesaplama açısından çözülemez duruma getirmektedir. Dolayısıyla, bu durum RtOM' nin ağlara ait optimal sensör yerleşimi sürecinde doğrudan uygulanabilmesini sınırlamaktadır. Bu sınırlamayı bir ölçüde gidermek için aşağıda tanıtılan yeni bir kısıt azaltma metodu (KAM) önerilmektedir. KAM' ın

adımları şunlardır:

- (1) $w = (s_1, t_1)$ akış çiftini seç,
 - (1) Düğüm s_1 ' in bir komşu düğümü hariç diğer tüm komşu düğümlerini ağdan çıkart
 - (2) (s_1, t_1) hariç tüm akış çiftleri (s, t) ' yi ağdan çıkart,
 - (3) Eğer s_1 düğümünden t_1 düğümüne bağlantı varsa, tüm döngüsel olmayan rotaları üret ve sakla,
- (2) Orjinal ağa dönüş yap
- (3) Tüm akış çiftleri $w' = (s, t)$ için (1) ve (2) adımlarını tekrar et.

Hesaplama testlerimize göre, KAM' ın RtOM' deki oluşturulan kısıt (2) sayısını önemli ölçüde azaltmasına rağmen, birçok olası rotanın hala açıkça üretilmesi ve işlenmesi gerekmektedir. Bu durum, KAM' ılı RtOM' nin özellikle büyük ölçekli ağlara uygulandığında hala verimsiz bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Bununla ilgili sonuçlar “Bulgular ve Tartışma” bölümünde sunulacaktır. Bu nedenle, bu tezde ayrıca rotaların önceden üretilmesini gerektirmeyen alternatif bir yaklaşım önerilecektir. Bunun için yeni bir karar değişkeni z_{ij} ' yi aşağıdaki gibi tanımlıyoruz.

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, i \text{ ve } j \text{ düğümleri arasında en az bir rota varsa} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$



Şekil 3.1: Düğüm i ve düğüm j arasındaki bağlantı tespiti

Tanım gereği, Şekil 3.1' deki ağda $z_{ij}=1$ ' dir. Özellikle, i düğümünden k düğümüne en az bir rota varsa (yani, $z_{ik}=1$) ve k düğümünden j düğümüne en az bir rota varsa (yani, $z_{kj}=1$), o zaman i düğümünü j düğümüne bağlayan en az bir rota olmalıdır (yani, $z_{ij}=1$ olmalıdır), bu da matematiksel olarak denklem (4)' te gösterilmiştir.

$$z_{ik} + z_{kj} \leq z_{ij} + 1, \forall i, j, k \in N: i \neq j \neq k \quad (4)$$

RtOM' de her rotaya en az bir sensör yerleştirilmesi amaçlamaktayız. Dolayısıyla, bu sensörlerin yerleştirildiği ayrıtların ağdan çıkarılması OĐ akış çiftleri arasındaki bağlantının kesilmesine yol açacaktır. Buradan hareketle, bazı i düğümlerinden bazı j düğümlerine giden akışı kesmek için (yani, $z_{ij} = 0$ olması için), aşağıdaki gibi bazı ij ayrıtları seçilir.

$$1 - x_{ig} \leq z_{ig}, \forall ig \in A \quad (5)$$

Toparlayacak olursak, bu tezde önerilen açıkça rota üretme ihtiyacını ortadan kaldıran (rotasız) kompakt model (RsKM) aşağıda verilmektedir.

$$\min \sum_{ij \in A} x_{ij} \quad (6)$$

$$z_{ik} + z_{kj} \leq z_{ij} + 1, \forall i, j, k \in N: i \neq j \neq k \quad (7)$$

$$1 - x_{ij} \leq z_{ij}, \forall ij \in A \quad (8)$$

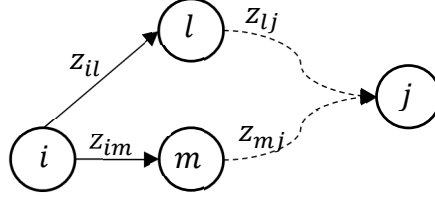
$$z_{st} = 0, \forall (s, t) \in W \quad (9)$$

$$x_{ij}, z_{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

RsKM' deki amaç fonksiyonu (6), ağ içindeki tüm OĐ akış çiftleri arasındaki bağlantıları kesecek trafik sayım istasyonlarının sayısını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Kısıt kümesi (7), yukarıda da açıklandığı gibi i düğümünden k düğüme giden en az bir rota varsa ve k düğümünden j düğüme giden en az bir rota varsa, i düğümünü j düğüme bağlayan en az bir rotanın da var olmasını zorunlu kılar. Kısıt kümesi (8), ij ayrıtının ağdan çıkarılmadığı sürece ilgili ayrıtın bağlı kalmasını garanti eder. Kısıt kümesi (9), OĐ akış çiftleri arasındaki tüm bağlantıların koparılmasını garanti eder. Son olarak, karar değişkenleri kısıt kümesi (10)' da ikili değişkenler olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, model RsKM' de $z_{ii}=1$ olmaktadır. Başka bir deyişle, her düğüm zaten kendisine bağlıdır varsayımı modelin doğru çalışması için gereklidir.

3.1. RsKM' nin Yeniden Modellenmesi

RsKM ile rotaların önceden oluşturulması ve işlenmesi gerekliliği ortadan kalkmıştır. Fakat, yönetilmesi gereken kısıt kümesi (7)' nin çokluğu ile ilgili bir sorun hala devam etmektedir. Bu sorunu çözmek için, bu bölümde daha kompakt bir kısıt gösterimi tanıtılacaktır.



Şekil 3.2: Düğüm i ve düğüm j arasında daha kompakt bir rota gösterimi

İlk olarak, tanım gereği, Şekil 3.2' deki ağ için $z_{ij}=1$ ' dir. Şekil 3.2' de, z_{im} im ayrıtı boyunca rotanın varlığını gösterebilir. Başka bir deyişle, Şekil 3.2 için, i düğümünden j düğümüne giden rotalar önce bazı im (veya il) ayrıtılarından geçer ve sonra m düğümünden (veya l düğümünde) j düğümüne ulaşır. Dolayısıyla, bazı m ve l düğümleri aşağıda verilen (11) numaralı eşitsizliği sağlamalıdır.

$$\max \{z_{im} + z_{mj}, z_{il} + z_{lj}\} \leq 1 + z_{ij} \quad (11)$$

Eşitsizlik (11), kısıt kümesi (12)' de gösterildiği gibi genelleştirilebilir. Ek olarak, RsKM'deki kısıt kümesi (7)' nin yerine aşağıda verilen kısıt kümesi (12) kullanılarak gereksiz birçok kısıtın üretilmesi önlenir. Böylece, RsKM' nin hesaplama performansı iyileştirilebilir.

$$z_{ik} + z_{kj} \leq z_{ij} + 1, \forall i, k \in A, j \in N \quad (12)$$

Algoritma 1, optimal çözümün üretilmesini engellemeksizin tehlikeye kısıt kümesi (12) içindeki gereksiz kısıtlamaları ortadan kaldırır. Algoritma 1, yukarıda verilen KAM ile benzer olmak ile birlikte, Algoritma 1 RsKM için kısıt azaltması yapmaktadır. Yukarıda verilen Algoritma 1' e ait adımlar şu şekilde açıklanır. Satır 1-3, algoritmaya ait genel girdileri vermektedir. Burada, satır 3' de verilen sembol ψ tüm OD çiftleri arasındaki

rotalarını izlemek için yeterli olan azaltılmış kısıt kümesini temsil etsin. Algoritma 1'in 5. satırında, ψ içindeki düğüm j' nin şimdi N yerine $\mathbb{D}$ ile tanımlanmaktadır. Bunun sebebi, buradaki düğüm j son ulaşılan düğümü temsil ettiğinden ve amaç varış düğümüne olan bağlantıları koparmak istenildiğinden, düğüm j 'nin $\mathbb{D}$ içinde olduğu rotaları izlemek yeterlidir. For döngü süreci, önce düğüm i ' yi seçerek başlar (4. satır) ve ardından i ' ye komşu k düğümü hariç tüm komşu düğümlerini ağdan kaldırır. Ardından, $\mathbb{D}$ içindeki tüm varış düğümlerini (10. ve 11. satırlarda) varış düğümü j hariç kaldırır. Eğer i ' den varış düğümü j' ye, k komşu düğümü aracılığıyla geçen en az bir rota varsa ve i düğümü j düğümünden farklıysa, üçlü (i, k, j) azaltılmış küme ψ' ya eklenir (13-17. satırlarda). Algoritma 1, orijinal ağı tekrar ziyaret eder (18. satırda) ve " i " ve " j " olarak etiketlenmiş yeni bir düğüm çiftini seçer ve süreci tekrarlar. Bu döngü, ağdaki tüm $i - j$ çiftleri incelenene kadar devam eder.

Algoritma 1: Kısıt azaltma prosedürü

```

1:   $G = (N, A) \leftarrow$  Yönlü ağ (Düğüm, Ayrıt)
2:   $G_c = (N, A) \leftarrow$  Orjinal ağın kopyası
3:   $\psi = \emptyset \leftarrow$  Azaltılmış Küme,  $\mathbb{D} \leftarrow$  Varış düğümleri,  $N_i \leftarrow i$  düğümünün komşuları
4:  for  $i$  in  $N$ :
5:      for  $j$  in  $\mathbb{D}$ :
6:           $E_g = \emptyset$ 
7:          for  $k$  in  $N_i$ :
8:               $E_g = E_g \cup (i, k)$ 
9:               $G = G/E_g$ 
10:              $\mathbb{D}_j = \mathbb{D}/j$ 
11:              $G = G/\mathbb{D}_j$ 
12:             for  $\ell$  in  $E_g$ :
13:                  $G = G \cup \ell$ 
14:                 if  $i \neq j$ ,  $i$  ve  $j$  düğümü arasında en az bir rota varsa
15:                      $\psi = \psi \cup (i, \ell[1], j)$ 
16:                      $G = G/\ell$ 
17:              $G = G_c$ 
18:  çıktı  $\psi$ 

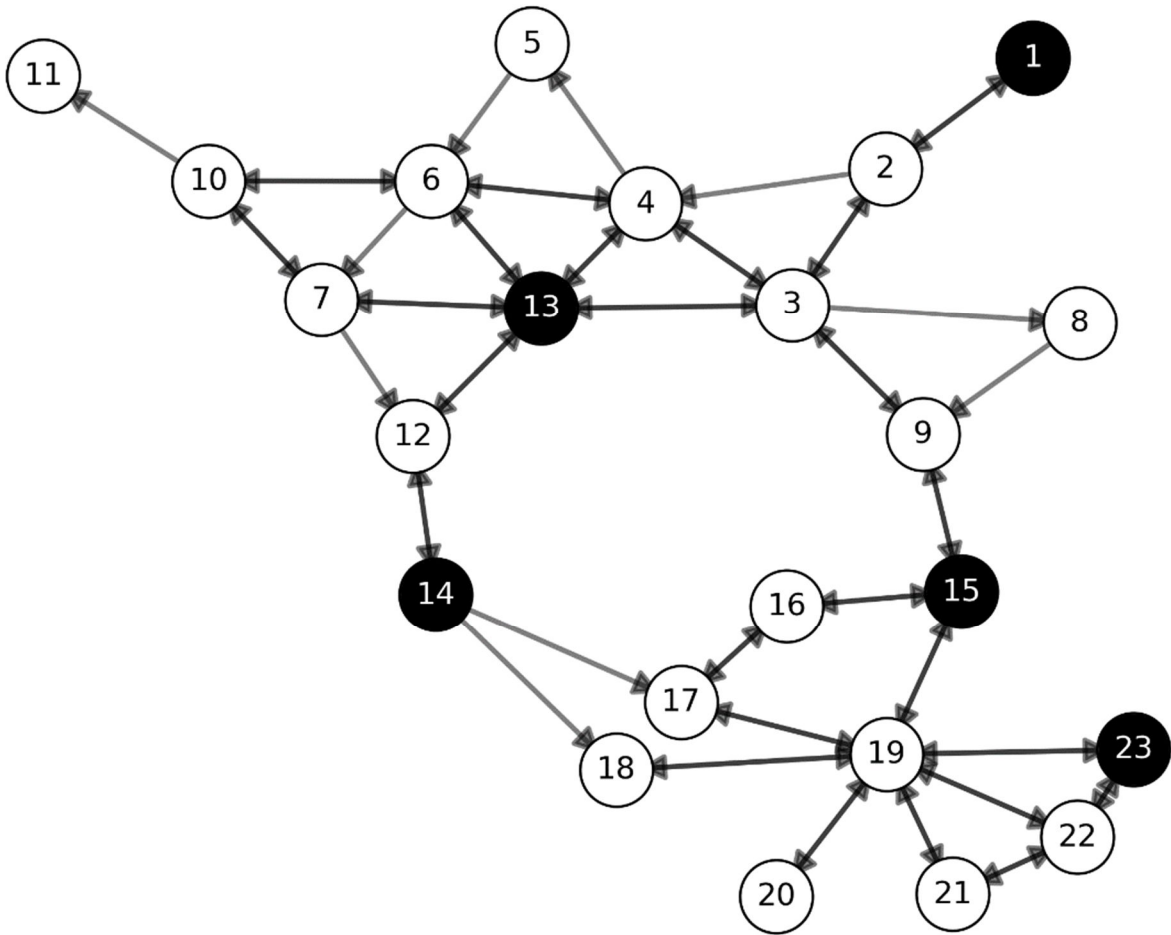
```

Algoritma 1'in kullanımıyla, kısıt kümesi (12) aşağıda verilen kısıt kümesi (13) şekilde yeniden yazılabilir:

$$z_{ik} + z_{kj} \leq z_{ij} + 1, \forall (i, k, j) \in \psi \quad (13)$$

Bu noktadan sonra, Algoritma 1 tarafından üretilen kısıtları içeren RsKM, RsKM-1 olarak

adlandırılacaktır. Algoritma 1 ile elde edilen kısıt azaltımı, Şekil 3.3' te gösterilen 23 düğüm ve 59 ayrıttan oluşan ağ kullanılarak gösterilecektir. Bu ağda beyaz fontlu siyah dolgulu düğümler talep düğümlerini (yani 1, 13, 14, 15 ve 23 numaralı düğümler), diğer düğümler ise başlangıç ve varış düğümü olmayan ara düğümlerini temsil etmektedir. Bu ağ için sırasıyla 10.626 kısıt (7) ve 1.357 kısıt (12) oluşturulmuştur. Algoritma 1 kullanıldığında ise sadece 108 adet kısıt (13) üretilmiştir. Başka bir deyişle, kısıt (7)' ye kıyasla % 98' den fazla kısıt sayısında bir azaltım sağlanmıştır.



Şekil 3.3: Örnek bir ulaşım ağı

Son olarak, hem RsKM-1' in optimal çözümü bulma süresini daha da hızlandırmak için $p_{ij} = 1 - z_{ij}$ olacak şekilde yeni bir karar değişkeni tanımlanmıştır. $p_{ij}=1$ olması, belirli bir ij ayrıtı için $x_{ij}=1$ olmasını gerektirir, bu da $x_{ij}=1$ olmadığı sürece $i - j$ rotasının kırılamayacağı anlamına gelir. O halde, ij ayrıtı kümesi için p_{ij}' yi x_{ij} ile değiştirmek optimalliği bozmaz. Kısıt kümesi (8) nedeniyle z_{ij}' nin daha önce $N \times N$ üzerinde

tanımlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu tür bir değiştirme i düğümünden j varış düğümü şeklinde tüm p_{ij} ' leri tanımlamasını sağlar (yani, p_{ij} $N \times \mathbb{D}$ üzerinden tanımlanabilir). Burada, kısıt kümesi (17)' nin tek ayrıtlı bağlantıları koparıırken, kısıt kümesi (16)' nin çok ayrıtlı rotaları koparılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, $x_{st} = 1, \forall (s, t) \in W \wedge A$ denklemi, bir ayrıtlı bağlanmış OD çiftleri arasındaki bağlantıyı kesmek için modele eklenebilir. Ayrıca p_{ij} karar değişkeninin esnetilmesi, optimalligi ihlal etmez. Başka bir değişle, p_{ij} karar değişkeni gevşetirse dahi optimal çözümde ikil yapısını (0 ya da 1) muhafaza eder. Yapılan hesaplamalı testler, bu değişikliklerin kullanılmasının çözüme daha hızlı bir şekilde ulaşıldığını göstermiştir. Yapılan bu iyileştirmelerden sonra RsKM-1' in tamamı aşağıda verilmiştir.

$$\min \sum_{ij \in A} x_{ij} \quad (15)$$

$$x_{ik} + p_{kj} \geq p_{ij}, \forall (i, k, j) \in \psi \quad (16)$$

$$x_{ij} \geq p_{ij}, \forall ij \in A \wedge j \in D \quad (17)$$

$$p_{st} = 1, \forall (s, t) \in W \quad (18)$$

$$x_{st} = 1, \forall (s, t) \in W \wedge A \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, p_{ij} \geq 0 \quad (20)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda, bir önceki bölümde verilen modellerin hesaplama testlerine yer verilecektir. Hesaplama testleri, 2.3 GHz hızında çalışan Intel i7-11800H işlemci ve 32 GB RAM ile donatılmış bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Adil ve tutarlı bir karşılaştırma sağlamak için tüm deneyler Python 3.10 programı üzerinden Gurobi çözücüsü kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama testi sırasında maksimum 3,600 saniye (s) CPU zaman sınırı uygulanmıştır. Eğer bir örnek bu sınır içerisinde başarılı bir şekilde çözülememişse, tablolarda ">" sembolü ile belirtilmiştir.

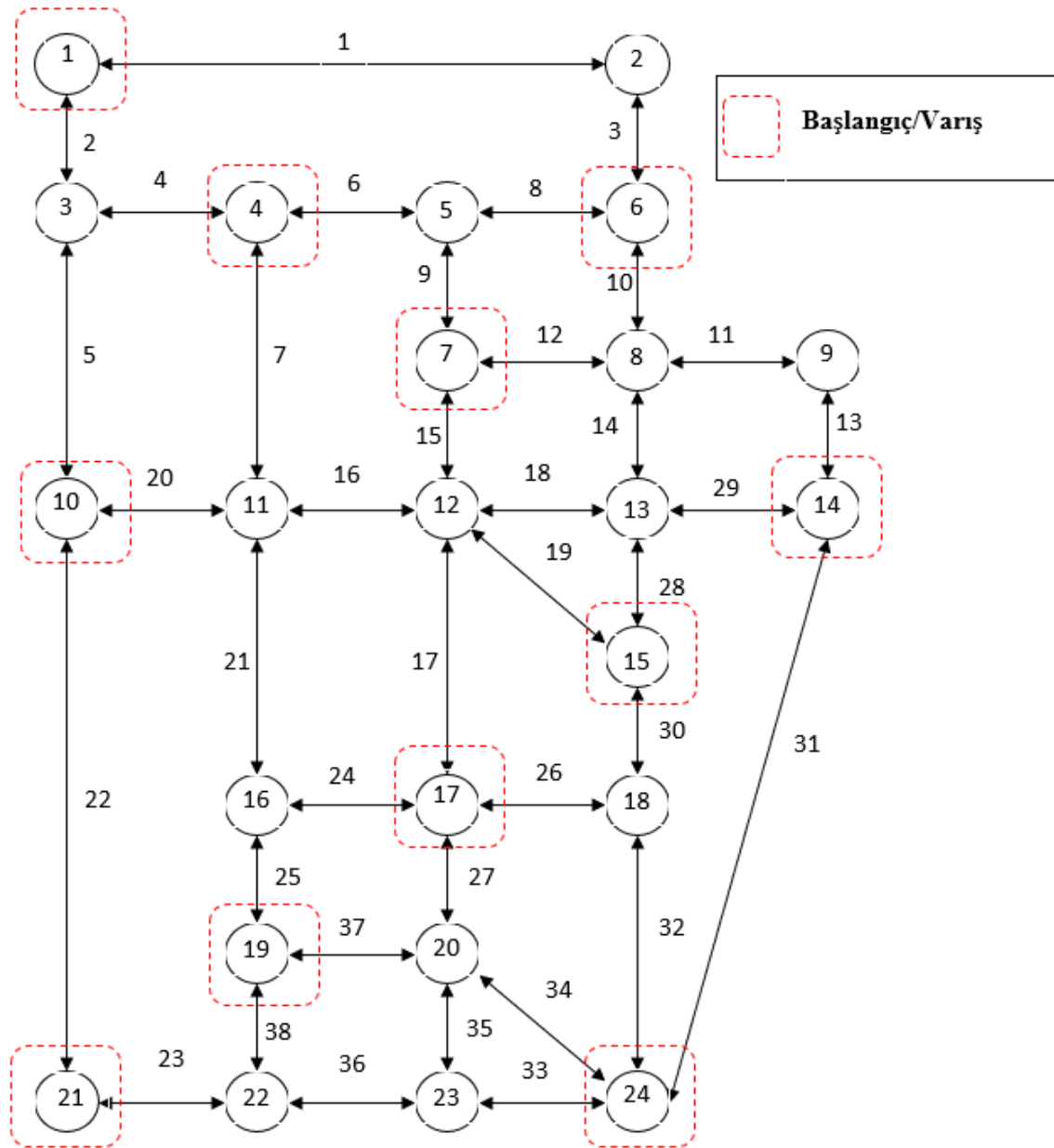
Bu tezde, modellere ait tüm hesaplama testleri Transportation Networks for Research Core Team (2024) tarafından üretilmiş literatürde sıklıkla kullanılan test ağları üzerinden yapılacaktır. İlk olarak, modeller RtOM ve RtOM' ye KAM uygulanmış hali küçük bir ağ olan "Sioux Falls" ağı üzerinden karşılaştırılacaktır. Şekil 4.1' de sunulan "Sioux Falls" ağı 24 düğüm ve 38 ayrıttan oluşmaktadır. Bu ağda, düğüm 1, düğüm 2, düğüm 4, düğüm 6, düğüm 7, düğüm 10, düğüm 14, düğüm 15, düğüm 17, düğüm 19, düğüm 21 ve düğüm 24' ün akışların hem üretildiği hem de sonlandığı OĐ düğümler olduğunu varsayalım. Örneğin, bu varsayım ile (2,19) bir akış çiftini göstermektedir. Model RtOM ve KAM' ı RtOM' ye ait sonuçlar Tablo 4.1' de verilmiştir. Tablo 4.1' de görüldüğü üzere ayrıtlar üzerine 22 adet sensör yerleşimi ile tüm akış çiftleri arasındaki akış miktarları ölçülebilir olmuştur. Ayrıca, KAM' ın RtOM' ye ait çözüm süresini önemli ölçüde düşürdüğü gözlenmektedir. Bu ise önemli ölçüde rota azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Spesifik olarak, Tablo 4.1' de verilmemekle birlikte bu küçük ağ için RtOM 182,492 rota üretmiştir. KAM' ı RtOM ise sadece 87 rota ile tüm akış çiftleri arasındaki rotaların izlenilmesine olanak tanımıştır.

Ayrıca, bu tez kapsamında sadece ayrıtlara sensör yerleşimi problemi ele alınmaktadır. Fakat, modeller üzerine küçük bir değişiklik ile düğümlere sensör yerleşimi problemi de çözülebilir. Bu ise, sensör konumlandırılan düğüm kendisine gelen ve kendisinden çıkan tüm ayrıtlar üzerindeki akışı izleyebilecektir varsayımı üzerine modelin modifiye edilmesi ile yapılabilecektir. Tezdeki akışı bozmamak adına, EK 1' de düğüm üzerine kurulu RtOM modeli verilmekle birlikte, bu bölümde sadece "Sioux Falls" ağı için düğümlere sensör yerleşimi problemine ait bulgular kısa bir şekilde verilmiştir.

“Sioux Falls” ağı için sadece düğümlere sensör yerleşimi yapıldığı varsayalım. Bu varsayım üzerine sadece 8 adet düğüm sensörü ile tüm akış çiftleri arasındaki akışlar ölçülebilir olacaktır. Bu düğüm sensörlerine ait konumlar sırasıyla 4, 6, 7, 10, 13, 17, 19 ve 24 düğümleridir.

Tablo 4.1: RtOM’ nin Sioux Falls ağındaki performans ölçümü

Optimal Çözüm	Çözüm Süresi (s)	
	RtOM	RtOM+KAM
22	23	0.25



Şekil 4.1: Sioux Falls ağı

Tablo 4.2’ de bu tezde kullanılan tüm ağlara ait özelliklere yer verilmiştir. Sırasıyla, Tablo 4.2’ deki birinci sütun tezde kullanılan ağların sıra numaralarını içermektedir. İkinci sütunda ağların isimleri bulunmaktadır. Üçüncü sütunda OĐ akış çifti sayısı verilmiştir. Burada her bir OĐ düğümü hem başlangıç hem de varış düğümü olduğu varsayılmıştır. Dördüncü ve beşinci sütunlar sırasıyla ağlardaki ayrıt ve düğüm sayılarını vermektedir. Altıncı sütun ağdaki kısıt kümesi (12)’ nin sayısını vermektedir. Yedinci sütun ise Algoritma 1’ in kullanımı ile azaltılan kısıt sayısını, yani $|\psi|$ değerini göstermektedir. Bu ise RsKM-1’ deki kısıt kümesi (16)’ nin sayısı göstermektedir.

Tablo 4.2: İncelenilen ulaşım ağı örneklerine ait veriler

	Ağlar	OĐ	$ A $	$ N $	$ OĐ A $	$ \psi $	% Kısıt Azaltım
1	Sioux Falls Network (Directed)	13	76	24	988	438	55.67
2	Berlin-Friedrichshain	23	523	224	12,029	9,548	20.63
3	Berlin-Tiergarten	26	766	361	19,916	16,839	15.45
4	Berlin-Prenzlauerberg-Center	38	749	352	28,462	20,844	26.77
5	Berlin-Mitte-Center	36	871	398	31,356	24,573	21.63
6	Anaheim	38	914	416	34,732	30,605	11.88
7	Terrassa-Asymmetric	55	3,264	1,609	179,520	169,008	5.86
8	Berlin-M-P-F-C	98	2,184	975	214,032	170,924	20.14
9	Barcelona	110	2,522	1,020	277,420	244,495	11.87
10	Winnipeg	147	2,836	1,052	416,892	375,752	9.87
11	Winnipeg-Asymmetric	147	2,535	1,057	372,645	322,015	13.59
12	Chicago-Sketch	387	2,950	933	1,141,650	982,700	13.92
13	Hessen-Asymmetric	245	6,674	4,660	1,635,130		
14	GoldCoast, Australia	1,068	11,140	4,807	11,897,520		
15	Berlin-Center	865	28,376	12,981	24,545,240		
16	Birmingham-England	898	33,937	14,639	30,475,426		
17	Philadelphia	1,525	40,003	13,389	61,004,575		
18	Chicago-Regional	1,790	39,018	12,982	69,842,220		
19	Sydney, Australia	3,264	75,379	33,837	246,037,056		

Örnek olarak, “Anheim” ağını ele alalım. Bu ağda 34,732 adet kısıt (12) üretilmiştir. Algoritma 1’ in kullanımı ile bu kısıt sayısı 30,605’ e düşürülmüştür ve bu sayı RsKM-1’de üretilen kısıt (16) sayısını ifade etmektedir. Yüzdelik olarak bakarsak kısıt sayısında, yaklaşık % 12’ lik bir azaltım sağlanmıştır. Kısıt sayısında en az azaltım yaklaşık % 6 ile “Terrasa Asymmetric” ağında sağlanmışken, en fazla azaltım yaklaşık % 56 ile “Sioux Falls Network (Directed)” ağında sağlanmıştır. Zaman sınırlaması altında çözüm üretilen ağlarda (yani 1 numaralı ağdan 12 numaralı ağa kadar), kısıt

sayısındaki ortalama azaltım ise yaklaşık olarak % 20 şeklinde gerçekleşmiştir. Tablo 4.2’ de boş bırakılan kutucuklar çözüm bulunamadığını ifade etmektedir. Başka bir deyişle 3,600 s zaman dilimi içerisinde Algoritma 1 bir çözüm döndürememiştir ve dolayısıyla $|\psi|$ değeri elde edilememiştir.

Tablo 4.2’ de verilen ağlar “Sioux Falls Network (Directed)” ağı hariç hiçbirisi hem RtOM hem de KAM’ lı RtOM kullanılarak çözülememiştir. Spesifik olarak, verilen zaman dilimi içerisinde her iki model içinde rotalar açık bir şekilde üretilip çözülememiştir.

Tablo 4.3: İncelenilen ulaşım ağlarına ait performans sonuçları

	Ağlar	Amaç Fonk.	CPU süre (s)		Toplam CPU süre (s)
			Algoritma 1	RKM-1	
1	Sioux Falls Network (Directed)	41	0.10	0.10	0.20
2	Berlin-Friedrichshain	78	3.84	0.46	4.30
3	Berlin-Tiergarten	82	12.09	1.80	13.89
4	Berlin-Prenzlauerberg-Center	113	16.37	1.66	18.03
5	Berlin-Mitte-Center	112	20.52	2.24	22.76
6	Anaheim	59	23.61	2.55	26.16
7	Terrassa-Asymmetric	153	638.35	126.45	764.80
8	Berlin-M-P-F-C	319	490.62	31.72	522.84
9	Barcelona	278	490.21	36.29	526.50
10	Winnipeg	291	950.95	39.36	990.31
11	Winnipeg-Asymmetric	274	833.15	30.34	863.49
12	Chicago-Sketch	387	1942.16	32.10	1974.26
13	Hessen-Asymmetric		>		>
14	GoldCoast, Australia		>		>
15	Berlin-Center		>		>
16	Birmingham-England		>		>
17	Philadelphia		>		>
18	Chicago-Regional		>		>
19	Sydney, Australia		>		>

Tablo 4.3’ de Algoritma 1 ve bunun neticesinde kurulan RsKM-1’ e ait ayrıntılı hesaplama sonuçları verilmektedir. Tablo 4.3’ te verilmemesine rağmen, “Sioux Falls Network (Directed)” ağından sonra en küçük ağ olan “Berlin-Friedrichshain” ağı için, model RsKM ile çözülmeye çalışılmıştır. RsKM’ de 11,089,343 adet kısıt (7) üretilmiştir ve 3600 s’ lik zaman dilimi içerisinde bu model çözülememiştir. Dolayısıyla, Tablo 4.3’ te RsKM ile alakalı bir sütun açılmamıştır. Tablo 4.3’ teki üçüncü sütunda RsKM-1 modeline ait amaç fonksiyonu değerlerini, sütun 4, 5 ve 6’ da ise sırasıyla Algoritma 1’ e ait hesaplama

süreleri, RsKM-1' e ait hesaplama süreleri ve toplam hesaplama süreleri verilmektedir. RsKM-1 ile 19 tane gerçek ulaşım ağından 12 tanesine optimal çözüm bulunmaktadır. Görüldüğü üzere ağ büyüdükçe çözüm süresi genel olarak artmaktadır. “Hessen-Asymtetric” ağı ve altındaki ağlar için 3,600 s süre dilimi içerisinde Algoritma 1 ile çözüm üretilenmemiştir. Dolayısıyla, bunlara karşı gelen amaç fonksiyonu değerleri ve RsKM-1' in çözüm süreleri boş bırakılmıştır. Çözüm bulunan ağlara baktığımızda ise, çözüm süresinin önemli bölümünü Algoritma 1' den kaynaklanmaktadır. Algoritma 1' deki çözüm süresinin fazlalığı rotanın varlığının ve yokluğunun tespitinde kısayol algoritması kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, ağ büyüdükçe ve OD akış çifti sayısı arttıkça işlem yükünün artması dolayısıyla Algoritma 1 için çözüm süresinin artması beklenen bir durumdur. Ek olarak, aynı yorumları RsKM-1 içinde genel olarak yapabiliriz. Başka bir ifade ile OD akış çifti sayısının artmasıyla ve ağın büyümesiyle işlem süresi genel olarak artması beklenen bir durumdur. Fakat çözüm sürelerindeki farklılıklar bu iki parametre ile her zaman açıklanamaz, ağın yapısı, kullanılan çözücünün özellikleri bu süreyi farklılaştırabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Trafik sayımı ile belirli bir süre boyunca bir noktadan geçen araç nüfusunu ölçülür. Bu sayım bilgileri daha sonra başlangıç-varış seyahat tahmini yapmamızı ve böylece bir ulaşım ağında daha iyi uzun vadeli planlamaya sahip olmamızı sağlar. Ancak bu süreç çok fazla zaman, yatırım ve iş gücü gerektirebilir. Bu tez kapsamında, daha gerçekçi başlangıç-varış seyahat tahmini amacıyla mevcut kaynakların (sensörlerin) optimum kullanımına odaklanılmaktadır. Burada, sensör konumlama çabası maliyetini en aza indirilirken, bu sensörlerin en uygun yerini bulmayı amaçlayan TSLP çalışılmıştır. TSLP literatüründeki çözüm yöntemleri düşük hesaplama performansına sahip olduğundan yalnızca bir dizi küçük veya orta ölçekli ağa uygulanabilir. Bu tez kapsamında sunulan modelleme ile daha önce çözülemeyen birçok büyük çaplı ağ artık çözülebilir hale gelmiştir.

Bu tez kapsamında sunulan modellemenin üstünlüğü akış çiftleri arasındaki rotaları açık bir şekilde üretme ihtiyacının ortadan kaldırılmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, TSLP literatüründe bu tez kapsamında çözümü bulunmuş ağlar ile aynı boyuttaki ağlar için sensör yerleşimi problemini çözecek matematiksel modeller bulunmamaktadır. Bu ise bu tezin literatüre kattığı önemli bir yeniliktir ve TSLP literatüründeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca literatürdeki rota bazlı modele (RtOM' ye) KAM uygulayarak, *küçük boyuttaki ulaşım ağları* için daha önce direkt olarak uygulanamayan bu model, KAM ile artık uygulanabilir olmuştur.

TSLP çözümü için geliştirilmiş olan RsKM-1' de, Algoritma 1 ile önemli ölçüde kısıt azalma sağlanmıştır. Fakat, Algoritma 1 aynı zamanda çözüm süresi önemli ölçüde arttırmaktadır. İleriki çalışmalarda, bu algoritma üzerinde iyileştirmeler yapılarak RsKM-1 modeli daha hızlı şekilde çözümlenmesi planlanılmaktadır. Ayrıca RsKM-1 modelindeki ikili karar değişkenleri esnetilerek, Dal- Sınır Algoritması ile çözümü araştırılacaktır.

Hesaplama testlerine ek olarak, bu tez kapsamında önerilen modeller ülkemizdeki ulaşımında akıllılaşma sürecine katkılar sunmaktadır. Spesifik olarak, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı' nın 2020-2023 Akıllı Ulaşım Sistemleri raporunda, Eylem Planları 1.4 ve 1.5' te şehirler ve şehirler arasında trafik akışlarının izlenmesiyle elde edilen verilerin işlenerek insanların daha hızlı, güvenli ve konforlu ulaşım sağlanmasının amaçlandığı

belirtilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021). Eylem Planı 1.4. İl Trafik Kontrol Merkezlerinin Kurulması' nı içerirken, Eylem Planı 1.5 ise Karayolu Trafik Kontrol Merkezlerinin Kurulması' nı içermektedir. Bu tez ulaşım ağında trafik akış verilerini tespit edebilecek sensörlerin sayısının ve lokasyonlarının optimal şekilde kısa sürede belirleyerek belirtilen eylem planlarının gerçekleştirilmesine katkı sunabilecektir.



KAYNAKLAR

- Bianco, L., Cerrone, C., Cerulli, R. ve Gentili, M. (2014). Locating sensors to observe network arc flows: exact and heuristic approaches. *Computers & Operations Research*, 46, 12-22.
- Castillo, E., Grande, Z., Calviño, A., Szeto, W. Y. ve Lo, H. K. (2015). A state-of-the-art review of the sensor location, flow observability, estimation, and prediction problems in traffic networks. *Journal of Sensors*, 2015(1), 903563.
- Chen, A., Pravinongvuth, S., Chootinan, P., Lee, M. ve Recker, W. (2007). Strategies for selecting additional traffic counts for improving OD trip table estimation. *Transportmetrica*, 3(3), 191-211.
- Chootinan, P., Chen, A. ve Yang, H. (2005). A bi-objective traffic counting location problem for origin-destination trip table estimation. *Transportmetrica*, 1(1), 65-80.
- de Abreu, V. H. S., González, P. H., Mauri, G. R., Ribeiro, G. M., Orrico, R. D., Júnior, N. F. R. C. ve Abramides, C. A. (2020). Network sensor location problem with monitored lanes: Branch-and-cut and clustering search solution techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106827.
- Fei, X., Mahmassani, H. S. ve Murray-Tuite, P. (2013). Vehicular network sensor placement optimization under uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 29, 14-31.
- Garber, N. J. ve Hoel, L. A. (2014). Traffic and highway engineering (s. 1248). Canada: Cengage Learning. ISBN 978-0-495-08250-7.
- Gentili, M. ve Mirchandani, P. B. (2011). Survey of models to locate sensors to estimate traffic flows. *Transportation Research Record*, 2243(1), 108-116.
- Gentili, M. ve Mirchandani, P. B. (2012). Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 227-255.
- Gomes, G. (2015). Análise comparativa das características de tráfego calculadas pelo HCM-2010 e pelo microssimulador Aimsun para uma área de estudo em Santa Catarina. Doutora Tezi, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil, 177.
- González, P. H., Clímaco, G., Mauri, G. R., Vieira, B. S., Ribeiro, G. M., Orrico Filho, R. D., Simonetti L., Perim L.R. ve Hoffmann, I. C. S. (2019). New approaches for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, 132, 189-198.
- Hu, S. R., Peeta, S. ve Chu, C. H. (2009). Identification of vehicle sensor locations for link-based network traffic applications. *Transportation Research Part B*:

Methodological, 43(8-9), 873-894.

- International Energy Agency (IEA). (2019). *World Energy Outlook 2019*. Eriřim Tarihi: 02 řubat 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>
- Larsson, T., Lundgren, J. T. ve Peterson, A. (2010). Allocation of link flow detectors for origin-destination matrix estimation—A comparative study. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(2), 116-131.
- Mutlu, A. (2019). Balıkesir şehir merkezinde trafik kaynaklı hava kirliliği seviyelerinin analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 152-168.
- Ng, M. (2012). Synergistic sensor location for link flow inference without path enumeration: A node-based approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6), 781-788.
- Ng, M. (2013). Partial link flow observability in the presence of initial sensors: Solution without path enumeration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 51, 62-66.
- Owais, M., Moussa, G. S. ve Hussain, K. F. (2019). Sensor location model for O/D estimation: Multi-criteria meta-heuristics approach. *Operations Research Perspectives*, 6, 100100.
- Salari, M., Kattan, L., Lam, W. H., Esfeh, M. A. ve Fu, H. (2021). Modeling the effect of sensor failure on the location of counting sensors for origin-destination (OD) estimation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103367.
- Shan, D., Sun, X., Liu, J. ve Sun, M. (2018). Optimization of scanning and counting sensor layout for full route observability with a bi-level programming model. *Sensors*, 18(7), 2286.
- T.C. Çevre ve şehircilik Bakanlığı. (2021). 2020-2023 Ulusal Akıllı şehirler Stratejisi ve Eylem Planı. Eriřim Tarihi: 02 şubat 2024. <https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/EylemPlani.pdf>
- Transportation Networks for Research Core Team. (2024). Transportation Networks for Research. Eriřim Tarihi: 02 řubat 2024 <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>.
- Vieira, B. S., Ferrari, T., Ribeiro, G. M., Bahiense, L., Orrico Filho, R. D., Abramides, C. A. ve Júnior, N. F. R. C. (2020). A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, 160, 113641.
- Wang, N. (2013). Locating counting sensors in traffic network to estimate origin-destination volumes. Doktora Tezi, Arizona State University, Arizona, USA, 169.

- Wang, N., Gentili, M. ve Mirchandani, P. (2012). Model to locate sensors for estimation of static origin–destination volumes given prior flow information. *Transportation Research Record*, 2283(1), 67-73.
- World Health Organization (WHO). (2023). *Global status report on road safety 2023: summary*. World Health Organization.
- World Health Organization (WHO). (2024). *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment: version with International Classification of Health Intervention (ICHI) codes*. World Health Organization.
- Xu, X., Lo, H. K., Chen, A., & Castillo, E. (2016). Robust network sensor location for complete link flow observability under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 88, 1-20.
- Yang, H. ve Zhou, J. (1998). Optimal traffic counting locations for origin–destination matrix estimation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(2), 109-126.
- Yang, H., Gan, L. ve Tang, W. H. C. (2001). Determining cordons and screen lines for origin-destination trip studies. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 85.
- Yang, H., Yang, C. ve Gan, L. (2006). Models and algorithms for the screen line-based traffic-counting location problems. *Computers & Operations Research*, 33(3), 836-858.
- Yim, P. K. ve Lam, W. H. (1998). Evaluation of count location selection methods for estimation of OD matrices. *Journal of Transportation Engineering*, 124(4), 376-383.

EKLER

EK 1: RtOM' nin düğüm sensörü konumlandırılması ile ilgili revize modeli

Aşağıda verilen optimizasyon modeli PtOM' ye ait tüm karar değişkenlerini ve kısıtlarını kullanmaktadır. Bu modele ait yeni karar değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonu (1.1) düğüm sensör sayısını minimize etmektedir. Kısıt kümesi (1.2) daha önce açıklanmıştır. Kısıt kümesi (1.3) düğüme yerleştirilen sensör kendisine bağlı tüm ayrıtların izlenebileceğini garanti eder. Son olarak kısıt kümesi (1.4) karar değişkenlerinin yapısını gösterir.

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{ eğer sensör } i - \text{ düğümü üzerine yerleştirilirse} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\min \sum_{ij \in A} y_i \quad (1.1)$$

$$\sum_{ij \in A} \delta_{ij}^{wr} x_{ij} \geq 1, \forall r \in R, w \in W \quad (1.2)$$

$$x_{ij} \leq y_i + y_j, \forall ij \in A \quad (1.3)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in A, i \in N \quad (1.4)$$