

Araştırma makalesi

Coğrafi bilgi sistemleri kapsamında akıllı ulaşım sistemlerinde asimetrik gezgin satıcı problemine R programlama dili TSP, MAPSAPI ve LEAFLET paketleri ile çözüm yaklaşımı

Ufuk Çelik^{1,*}

¹ Yönetim Bilişim Sistemleri, Ömer Seyfettin Uygulamalı Bilimler Fakültesi,
Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye

* *Correspondence: ucelik@bandirma.edu.tr*

Özet: Gezgin satıcı problemi, kombinatoriyal optimizasyon kapsamında öncelikli olarak ulaşım sektöründe sıklıkla çalışılan önemli bir araştırma alanıdır. Belirli bir liste dâhilindeki her koordinatı bir kez ziyaret edip başlangıca geri dönen en kısa turu bulmak amaçlanır. Özellikle rota planlamada görülen asimetrik gezgin satıcı problemindeki farklılık ise koordinat çiftleri arasındaki mesafenin veya yolculuk süresinin eşit olmamasıdır. Gerçek hayatta özellikle büyük şehirlerde görülen tek yönlü yollar sebebiyle iki koordinat arasındaki mesafenin gidiş ve geliş farklı olması veya trafik sıkışıklığına bağlı olarak gidiş ve geliş arasında farklı sürelerin geçmesi maliyet ve zaman problemleri ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada otomatik rota planlamasında dikkate alınması gereken asimetrik gezgin satıcı problemi için R programlama dilinde geliştirilen bazı paketler kullanılmıştır. Problem çözümü için “TSP: Travelling Salesperson Problem” paketi, coğrafi bilgi sistemlerinde başvuru yön bulma, süre ve mesafe matrisleri oluşturmak ile koordinatları belirlemek için “mapsapi: 'sf-Compatible Interface to 'Google Maps' APIs” Google Haritaları ara yüz paketi ve görselleştirme için ise “leaflet” paketi kullanılarak interaktif bir Google haritası oluşturulmuştur. Probleme örneklem olarak Bandırma ilçesinde rastgele 10 adet koordinat alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tekrarlayan en yakın komşuluk (repetitive-nn) algoritması en kısa tur hesaplamasını gerçekleştirmiştir. Hesaplamalar tur mesafesi ve ayrıca tur süresi bazında yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: coğrafi bilgi sistemleri, akıllı ulaşım sistemleri, asimetrik gezgin satıcı problemi, en yakın komşuluk algoritması, R programlama dili

A solution approach to the asymmetric travelling salesperson problem in intelligent transportation systems within the scope of geographical information systems with R programming language TSP, MAPSAPI and LEAFLET packages

Abstract: The traveling salesperson problem is an important area of research that is frequently studied in the transportation sector, primarily within the scope of combinatorial optimization. It is aimed to visit each coordinate within a certain list once and find the shortest tour that returns to the beginning. The difference in the asymmetric traveling salesperson problem, especially seen in route planning, is that the distance or travel time between the coordinate pairs is not equal. Due to the one-way roads in real life, especially in big cities, the distance between the two coordinates is different in departure and arrival, or due to traffic congestion, different times between departure and arrival cause cost and time problems. In this study, some packages developed in R programming language are used for the asymmetric traveling salesperson problem that should be taken into account in automatic route planning. "TSP: Traveling Salesperson Problem" package for the problem, "mapsapi: 'sf-Compatible Interface to 'Google Maps' APIs" for creating direction finding, time and distance matrices used in geographic information systems and determining coordinates. An interactive Google map was created using the "leaflet" package for visualization. In the problem, randomly 10 coordinates were taken as the sample from Bandırma district. According to the results obtained, the repetitive-nn algorithm performed the shortest lap calculation. Calculations are made on the basis of lap distance the lap duration.

Keywords: Geographic information systems, intelligent transportation systems, asymmetric travelling salesperson problem, nearest neighbor algorithm, R programming language

* Corresponding author. Tel.: +0-266-7170117-4018 ; fax: +0-266-717-0117

E-mail address: ucelik@bandirma.edu.tr

ORCID: 0000-0003-3063-6272 (in hierarchical order)

Received 20 October 2020; accepted 16 November 2020

Peer review under responsibility of Bandırma Onyedi Eylül University.

1. Giriş

Kombinatoriyal optimizasyon araştırması olan gezgin satıcı probleminin amacı bir liste dâhilinde verilen şehirleri yalnızca bir sefer ziyaret ederek en kısa yoldan turu tamamlamaktır. İlk olarak 1800’lerde Hamilton Döngüsü adı verilen bir oyunda matematiksel formülü tanımlanmıştır (Biggs et al., 1986). İlk uygulaması ise bir okul servisi için rota planlamasıdır (Lawler et al., 1985). 1950’lerde popüler bir araştırma konusu haline gelen gezgin satıcı problemi için başlangıçta tamsayı doğrusal program çalışmalar yapılırken 1960’larda asimptotik formüller ile daha basit çözümler üretilmiştir (Beardwood et al., 1959). Daha sonraları az yer kaplayan ağaç (minimum spanning tree) ve NP-tam ile NP-zorluk gibi çözümler üretilmiştir (Karp, 1972; Klarreich, 2013). 1980’lerde branch ve bound algoritması ile çok fazla sayıda şehir için problem çözümü sağlanmıştır (Padberg & Rinaldi, 1989). 1990’larda gezgin satıcı problemi performans testleri için örnek veri kütüphanesi kurulmuştur (Reinelt, 1991).

Günümüzde gezgin satıcı problemi için makine öğrenmesi algoritmaları optimum sonuçlar üretmektedir. Özellikle sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalar ile yapılan çalışmalar dikkat çekicidir (Rosenkrantz et al., 2009). Gerçek vaka örneklerine bakıldığında ise daha çok rota planlaması için çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Örneğin süt dağıtımı için en uygun rota planlaması (Urquhart & Viera, 2002), servis araçları için coğrafi bilgi sistemi destekli uygulama (Jayawant et al., 2016), siyasi partilerin miting gezileri planlaması (Ertuğrul & Özçil, 2016), yerel seyahat rotası için mobil uygulama (İlkuçar & Çetinkaya, 2018) gibi örnekler bunlardan bazılarıdır. Özellikle katı atık toplama için rota planlaması hakkında yapılan çalışmalar dikkat çekicidir (Chalkias & Lasaridi, 2009; Karadimas et al., 2007, 2008).

Klasik gezgin satıcı probleminde iki koordinat arasındaki mesafe aynı iken özellikle rota planlamada görülen asimetric gezgin satıcı probleminde şehir çiftleri arasındaki mesafenin veya yolculuk süresinin gidiş ve gelişte eşit olmamasıdır. Daha çok büyük şehirlerde görülen tek yönlü yollar sebebiyle iki koordinat arasındaki mesafenin gidiş ve gelişte farklı olması veya trafik sıkışıklığına bağlı olarak gidiş ve geliş arasında farklı sürelerin geçmesi maliyet ve zaman problemlerini ortaya

çıkarmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalara bakıldığında sezgisel algoritmaların kullanıldığı görülmektedir. Bir çalışmada TSPLIB kütüphanesi verileri ile meta-sezgisel algoritmalar balina, parçacık sürü ve gri kurt optimizasyonu algoritmalarının performansı incelenmiştir (Ahmed & Kahramanlı, 2018). Bulanık mantık ve karınca kolonisi ile melez bir yaklaşımda asimetric gezgin satıcı problemine bir çözüm aranmıştır (Aksaraylı & Pala, 2018). Problem için seyrek yönlü grafikler yöntemiyle iki belirleyici algoritma sunulmuştur (Kowalik & Majewski, 2020). Diğer bir çözümde ise evrimsel strateji algoritması denenmiştir (Karabulut, 2016). Tabu araması ve kanguru algoritması ile yapılan çalışmalarda diğer sezgisel yöntemlerdendir (Basu et al., 2017; Erdem & Keskinürk, 2011).

Coğrafi bilgi sistemleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda özellikle Google haritalar ile yapılan çalışmalar örneklendirilebilir (Chalkias & Lasaridi, 2009; Curtin et al., 2014; Jayawant et al., 2016; Jitt-Aer, 2018; Prasetyo et al., 2018; Santoso & Sanuri, 2019).

Her ne kadar istatistiksel programlama dili olsa da geniş kullanım alanı ile yaygınlaşan R programlama coğrafi bilgi sistemleri içinde çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda özellikle gezgin satıcı problemi için geliştirilen TSP paketi hem simetric hem de asimetric gezgin satıcı problemi için çözüm sunarken aynı zamanda Google haritalar ile oluşturulan mesafe matrisi verilerini ve TSPLIB kütüphanesi verilerini de analiz edebilmektedir.

Bu çalışmada otomatik rota planlamasında dikkate alınması gereken asimetric gezgin satıcı problemi için R programlama dilinde geliştirilen bazı paketler kullanılmıştır. Asimetric gezgin satıcı problemi için “TSP: Travelling Salesperson Problem” paketi, coğrafi bilgi sistemlerinde başvuru yön bulma, süre ve mesafe matrisleri oluşturmak ile koordinatları belirlemek için “mapsapi: 'sf- Compatible Interface to 'Google Maps' APIs” Google haritaları ara yüz paketi ve görselleştirme için ise “leaflet” paketi kullanılarak interaktif bir Google haritası oluşturulmuştur. Google haritalar üzerinden alınan bilgiler günün farklı saatlerine göre değişiklikler göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre hem süre hem de mesafe türünden en iyi rotayı, tekrarlayan en yakın

komşuluk algoritması en iyi rota planlamasını gerçekleştirmiştir.

2. Veriler

Bu çalışmada asimetrik gezgin satıcı problemini örneklendirmek için Balıkesir ili Bandırma ilçesinden seçilen 10 adet farklı koordinatın Google haritalar ile adreslerinden enlem ve boylam koordinatları tespit edilmiş ve Tablo 1 ile gösterilen Excel verileri R dilinde bir “dataframe” olarak alınmıştır.

Tablo 1. Örnek alınan koordinatlar

Adres	Lon (enlem)	Lat (boylam)
A	40.35361117501268	27.969538994415778
B	40.3521353824361	27.968761153876184
C	40.35313696263715	27.970686979763872
D	40.352405197341945	27.971936889044738
E	40.35277967261562	27.973011466278013
F	40.35313696263715	27.97435624134376
G	40.35137090100705	27.97228557618318
H	40.35167751224675	27.9702524619452
I	40.351516445975285	27.967915269214643
J	40.35362589857307	27.97191176068755

Koordinatların seçiminde asimetrik gezgin satıcı problemi için özellikle tek yönlü yollar ve döner kavşaklar gibi yerler seçilmeye dikkat edilmiştir.

R programlama dilinde kodlar RStudio yazılımı ile geliştirilmiştir (Ihaka & Gentleman, 1996). Problemin çözümü için temel olarak R dili CRAN paketlerinden “TSP: Travelling Salesperson Problem” paketi kullanılmıştır (Hahsler & Hornik, 2007). Google harita ile entegrasyon için “mapsapi” paketinden yararlanılmıştır (Dorman, 2020). “mapsapi” paketi ile elde edilen koordinat, yön, mesafe gibi verilerin görselleştirilmesi için “leaflet” paketi kullanılmıştır (Cheng et al., 2019).

3. Metot

Bu çalışmada çözüm için üç farklı aşama bulunmaktadır. Öncelikle uzaklık matrisi oluşturulur. Arkasından matris verilerine göre gezgin satıcı algoritması ile en iyi rota bulunur. Son olarak rota görselleştirilir.

3.1. Koordinat verilerinden uzaklık matrisi oluşturulması

Tablo 1’de gösterilen Excel tablosundan alınan veriler R dilinde ‘dataframe’ şekline dönüştürülür. Bu dataframe verileri “mapsapi” kütüphanesi kullanılarak Google Haritalar entegrasyonu ile sürücü “driving” moduna göre her bir koordinatın birbirine olan uzaklıkları

“distance_m” parametresine göre metre cinsinden Şekil 1 ile gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	225	690	718	720	876	782	461	289	1097
B	493	0	427	494	495	651	683	199	190	872
C	337	561	0	262	264	420	403	494	626	716
D	591	424	254	0	229	386	168	309	461	654
E	761	985	677	616	0	156	756	847	1050	425
F	906	1131	822	761	1151	0	1112	993	1196	571
G	627	442	382	175	265	421	0	226	479	690
H	558	288	228	211	355	511	257	0	326	780
I	671	178	514	496	673	829	606	285	0	1050
J	336	560	252	191	192	348	331	422	625	0

Şekil 1. Metre cinsinden uzaklık matrisi

Saat 09:00 itibariyle yapılan analize göre koordinatlar arası trafikte geçiş süreleri Google Harita bağlantısı ile ‘duration_in_traffic_s’ parametresine göre saniye cinsinden elde edilen ‘dataframe’ Şekil 2 ile gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	37	189	164	158	210	184	104	45	286
B	140	0	162	126	121	172	176	77	37	263
C	95	133	0	80	75	127	124	167	141	223
D	168	127	83	0	77	129	58	99	144	254
E	268	285	263	233	0	51	280	321	296	177
F	301	341	322	292	287	0	297	379	347	236
G	173	156	134	54	81	133	0	77	173	259
H	195	106	85	72	126	178	94	0	124	283
I	203	63	189	177	184	236	184	104	18	295
J	91	129	86	56	54	106	103	143	137	0

Şekil 2. Süre (sn) matrisi (saat 09:00)

Görüldüğü üzere iki koordinat arasındaki mesafe ve süreler gidiş ve geliş göre farklı olup asimetriktir.

3.2. Gezgin satıcı problemi çözümü

Şekil 2’de görüldüğü üzere gezgin satıcı probleminde n adet şehir (A’dan J’ye) arasındaki mesafeler d isimli matriste $d(i,j)$ ve $i, j = 1...n$ tanımı ile diyagonal elemanlar $d(i,j)=0$ şeklinde saklanıyorsa bir tur, döngüsel permütasyon ile $\pi \{1,2,...,n\}$ elemanları ile $\pi(i)$ dizisi bir şehirden i şehrine takip etmesi olarak tanımlanabilir. Gezgin satıcı problemi burada permütasyon (π) değerinin minimumu yani tur uzunluğunu bulmaktır.

$$\sum_{i=1}^n d(i, \pi(i)) \quad (1)$$

Simetrik mesafe matrisinde $d(i,j) = d(j,i)$ iken asimetrikte eşit değildir. Doğrusal programlama problemi olarak farklı bir denklem ile gösterilse;

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

sonuç değerinin minimize edilmesi amaçlanır. Çözüm matrisi $X=x_{i,j}$ alt turların bir çözüm matrisini temsil eder. 0 veya 1 olabilen $x_{i,j}=1$ ise çözüm bir alt tur içindedir.

TSP paketinde tur uzunluğunu minimum yapmak için kullanılan algoritmalar tekrarlayan en yakın komşuluk algoritması ile en yakın, en uzak, en ucuz ve keyfi (nearest, farthest, cheapest and arbitrary) şeklinde birkaç farklı ekleme (insertion) algoritmalarıdır (Hahsler & Hornik, 2007).

En yakın komşuluk algoritması bir liste içindeki hedef koordinatlar arasından rastgele seçilen bir koordinat ile tura başlar (Altman, 1992). Ardından algoritma her zaman turdaki elde edilen son koordinata, henüz ziyaret edilmemiş en yakın koordinatı ekler. Bütün koordinatlar tamamlandınca algoritma sonlanır. TSP

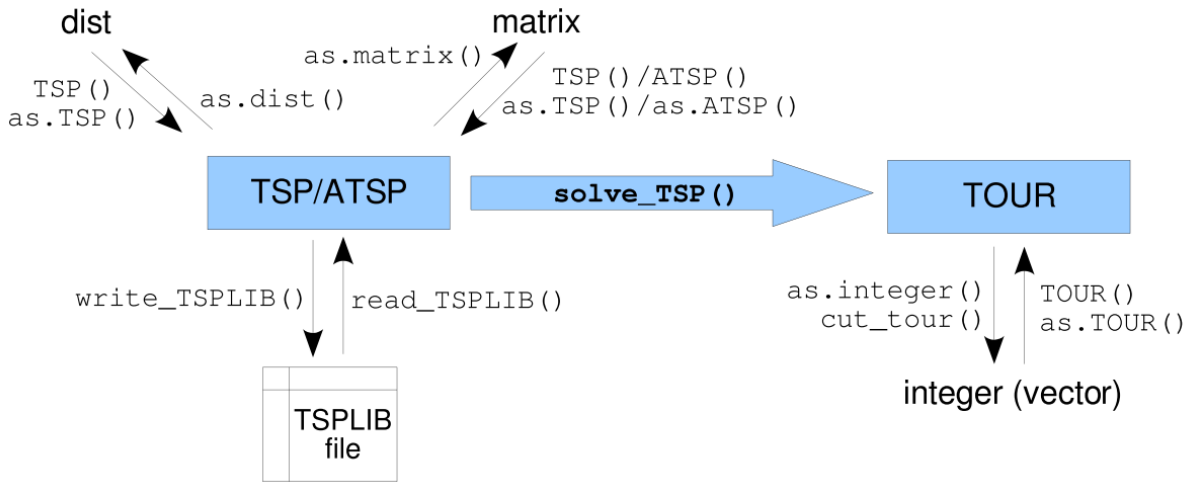
paketinde ayrıca tekrarlayan en yakın komşuluk (repetitive-nn) algoritması bulunmaktadır. Bu yöntemde algoritma her bir koordinatı başlangıç olarak ele alır ve tekrarlayarak en iyi turu bulur.

Tüm ekleme (insertion) algoritmaları rastgele bir şehirden oluşan bir turla başlar ve ardından her adımda henüz tura çıkmamış bir şehri seçer. Bu şehir, iki farklı şehir i ve j arasındaki mevcut tura, ekleme maliyeti (yani turun uzunluğundaki artış) fonksiyonu;

$$d(i, k) + d(k, j) - d(i, j) \quad (3)$$

en aza indirgenecek şekilde eklenir.

Pakette bulunan ekleme algoritmaları turun içinden seçilen k şehri için sırasıyla en yakın, en uzak, en ucuz ve rastgele olacak şekilde kullanılabilir.



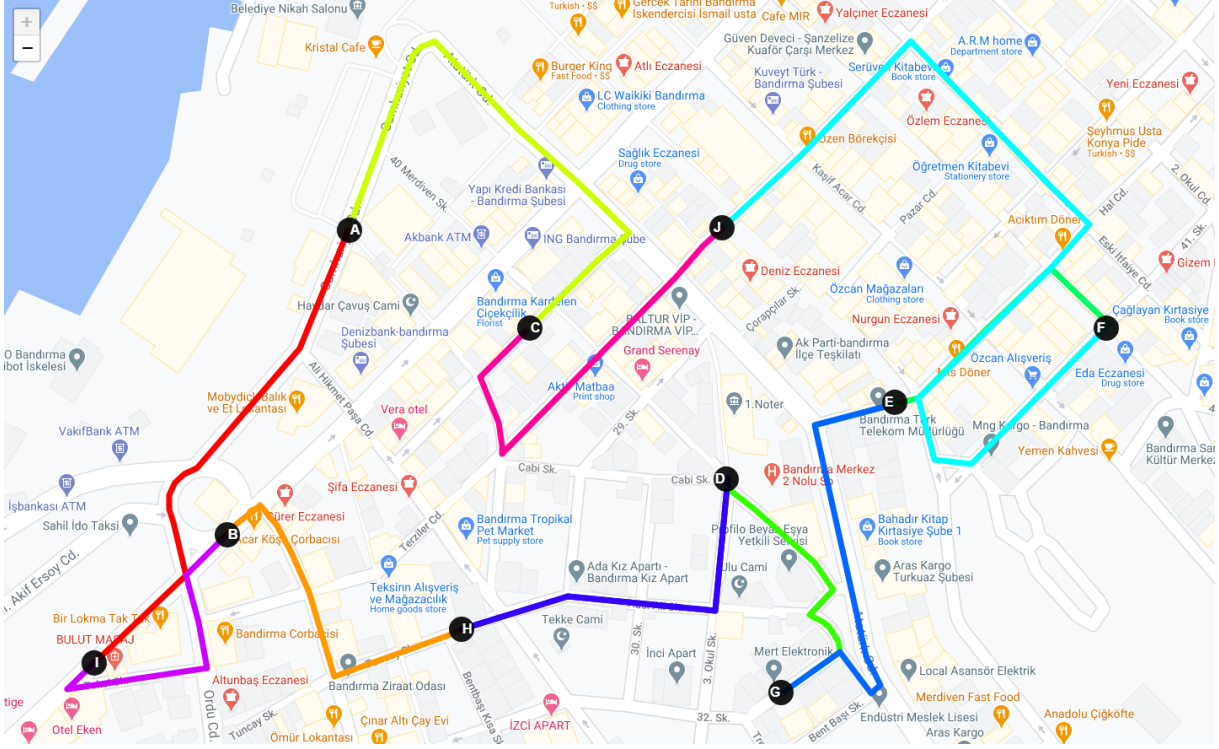
Şekil 3. TSP paketinde kullanılan fonksiyonlar (Hahsler & Hornik, 2007)

TSP paketi içinde bulunan fonksiyonlar arasındaki ilişki Şekil 3 ile gösterilmiştir. Şekil 1 ile gösterilen uzaklık matrisinden elde edilen veriler Şekil 3 ile gösterilen TSP paketinde 'as.dist' fonksiyonu ile alınır ve asimetrik olarak yeniden formüle (as.ATSP) edilir. 'solve_TSP' fonksiyonu ile tur uzunlukları her bir algoritma için hesaplanır ve en kısa tur (as.TOUR) bulunur. Elde edilen en iyi tur için 'mapsapi' kütüphanesinden Google Haritalar kullanılarak bulunan yönler 'leaflet'

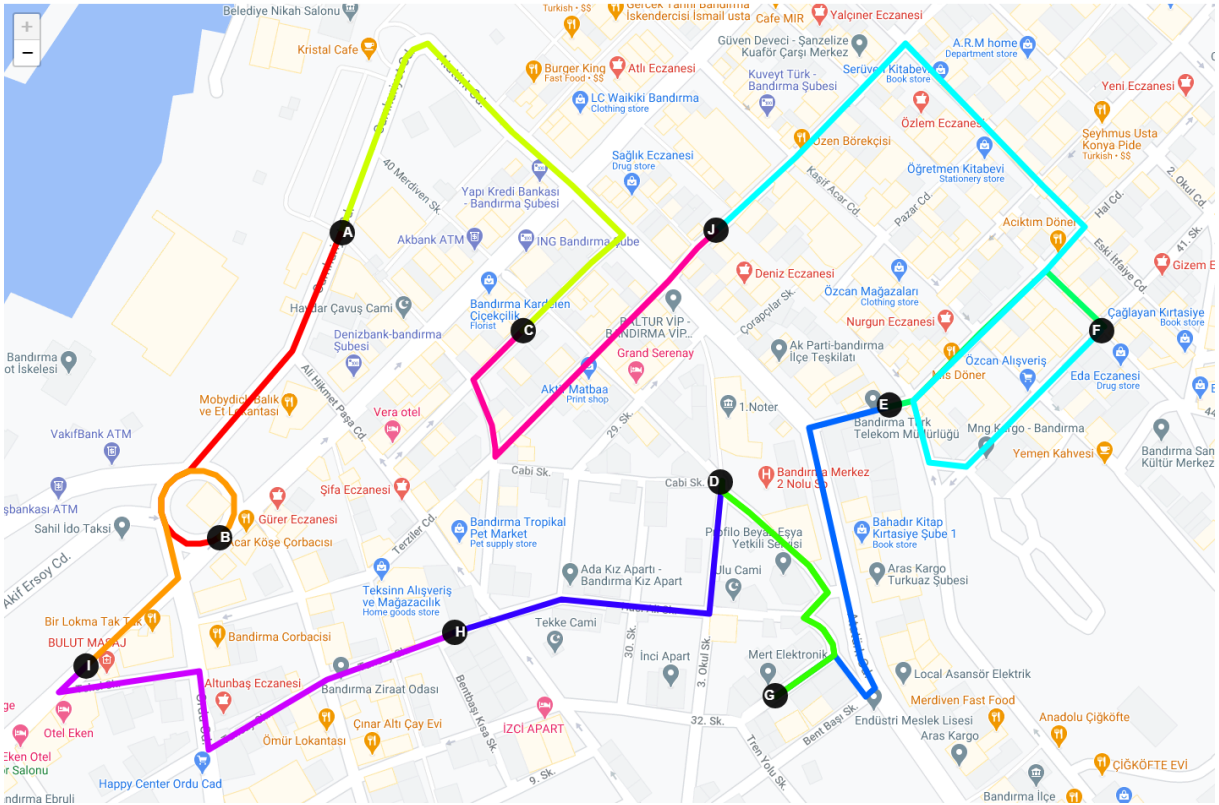
kütüphanesi ile interaktif Google haritası olarak ekranda gösterilir.

3.3. Verilerin görselleştirilmesi

Bu aşamada elde edilen yön verileri ile "leaflet" kütüphanesi sayesinde Google Haritalar üzerinden mesafeye göre hesaplanan rota Şekil 4 ile gösterilmiştir. Şekil 5'te ise süreye göre çıkartılan rota gösterilmiştir. 'leaflet' kütüphanesi büyültme ve küçültme gibi özelliklerle interaktif haritalar oluşturur.



Şekil 4. Mesafeye göre hesaplanan rota görselleştirilmesi



Şekil 5. Süreye göre hesaplanan rota görselleştirilmesi (saat 14:00)

Haritada koordinatlar siyah bir daire ile koordinat adları ise beyaz renkle görselleştirilmiştir. 'leaflet' kütüphanesi javascript tabanlı bir kodlamasına sahiptir. 'leaflet' kütüphanesi mapsapi kütüphanesinden

gelen verileri kullanarak Google Haritalar ile entegre bir şekilde interaktif harita özelliklerini barındırmaktadır. Harita üzerinden fare ile gezinti yapılarak detaylı bilgiler alınabilir. Ayrıca büyültme veya küçültme yapılabilir.

4. Bulgular

Bu çalışmada coğrafi bilgi sistemlerinde kullanılan bir çok ticari yazılımın aksine açık kaynak kodlu bir programlama dili olan R dilinde geliştirilmiş “TSP: Travelling Salesperson Problem” paketi kullanılmıştır. Bu paket aynı zamanda asimetric gezgin satıcı problemi içinde destek sağlamaktadır. Yapılan analizde hem süre hem de mesafe türünden en iyi rotayı, tekrarlayan en yakın komşuluk “repetitive-*nn*” algoritması tespit etmiştir.

Mesafeye göre gerçekleştirilen analizde en iyi rota için toplam tur uzunluğu 2626 metre olarak bulunmuştur. Denenen tüm metotlar içinde tekrarlayan en yakın komşuluk algoritması (repetitive-*nn*) aşağıda verilen en iyi rotayı bulmuştur.

En iyi rota = I-B-H-D-G-E-F-J-C-A-I

Saat 09:00 itibariyle süreye göre hesaplanan rota planlanmasında trafikte geçen bir turun toplam süresi 857 saniye olarak bulunmuştur. Denenen algoritmalar arasından tekrarlayan en yakın komşuluk metodu aşağıda gösterilen en iyi rotayı bulmuştur.

En iyi rota = A-B-I-H-D-G-E-F-J-C-A

Süreye göre yapılan hesaplamada Google Harita üzerinden alınan bilgiler algoritmanın çalıştığı zamana göre hesaplanmaktadır. Bu sebeple Tablo 2 ile sonuçları gösterilen günün farklı saatlerinde yapılan analiz sonuçlarında trafiğe göre değişiklikler saptanmaktadır.

Tablo 2. Süreye göre hesaplanan rota planlaması sonuçları

Saat	Süre	Rota
09:00	857	B-I-H-D-G-E-F-J-C-A-B
10:00	850	G-D-C-E-F-J-A-B-I-H-G
14:00	889	A-B-I-H-D-G-E-F-J-C-A
23:00	852	D-G-E-F-J-A-B-I-H-C-D

Elbette gündüz ve gece trafiği arasında veya hava durumuna göre rota süresinde farklılıklar olacaktır. Hatta rota üzerinde meydana gelen bir gecikme olması durumunda rota tamamen değişecektir. Gecikme bilgileri de Google üzerinden aktarıldığı için sürelerde değişim olacaktır. Dolayısıyla rota değişecektir.

Coğrafi bilgi sistemleri kapsamında Google Harita servisleri çok önemli avantajlar

sağlamaktadır. Süreye göre hesaplanan rota planlamasında Google, trafik verilerini anlık olarak değerlendirdiği için daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Gündüz veya gece arasında rota süreleri değişmekte, hava durumu veya kaza gibi beklenmedik olaylarda rota planlaması farklılaşmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada 10 farklı koordinat arasında hesaplanan rota planlamasında tekrarlayan en yakın komşuluk algoritması ile en iyi sonuç elde edilmiştir. Çalışmada R dilinde hazırlanan “TSP: Travelling Salesperson Problem” paketi kullanılmıştır.

Özellikle büyük şehirlerde tek yönlü veya çıkmaz yollar gibi yerlere göre hesaplanması gereken rotalarda ortaya çıkan asimetric uzaklık matrislerinin gezgin satıcı problemi ile çözümünde bu çalışmada kullanılan R programlama dili iyi bir alternatif olmaktadır.

R programlama dili paketleri sayesinde sadece biri istatistik dili olmaktan çıkıp veri madenciliğinden coğrafi bilgi sistemlerine birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılır olmuştur. Araştırmacılar için iyi bir geliştirme platformunu ücretsiz bir şekilde sunması ise diğer bir avantajdır.

Asimetric gezgin satıcı problemlerinin çözümünde sezgisel metotlar gibi karmaşık yöntemlerin aksine en yakın komşuluk algoritması kullanılması birçok araştırmacı için kolaylık sağlamaktadır. İlerideki çalışmalarda R programlama dili ile geliştirilen paketler ile çözümler geliştirmek daha da tercih edilir olacaktır.

Bu çalışmada yöntemin geçerliliğini göstermek adına az sayıda (10) adet farklı koordinatlar seçilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda farklı gezgin satıcı problemi örnekleri üzerine daha fazla sayıda koordinatlarla çalışmak özgün değeri yüksek farklı çalışmalar olacaktır.

Kaynaklar

Ahmed, O. M. A., & Kahramanlı, H. (2018). Meta-Heuristic Solution Approaches for Traveling Salesperson Problem. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 6(3), 21–26. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijamec/issue/39103/458948>

- Aksaraylı, M., & Pala, O.** (2018). A Proposed Approach For Solving Asymmetric Travelling Salesman Problem by Fuzzy Ant Colony Optimization Algorithm. *Journal of Transportation and Logistics*, 3(1), 25–34. <https://doi.org/10.26650/JTL.2018.03.01.03>
- Altman, N. S.** (1992). An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression. *The American Statistician*, 46(3), 175–185. <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475879>
- Basu, S., Sharma, M., & Ghosh, P. S.** (2017). Efficient preprocessing methods for tabu search: an application on asymmetric travelling salesman problem. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 55(2), 134–158. <https://doi.org/10.1080/03155986.2017.1279897>
- Beardwood, J., Halton, J. H., & Hammersley, J. M.** (1959). The shortest path through many points. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 55(4), 299–327. <https://doi.org/10.1017/S0305004100034095>
- Biggs, N., Lloyd, E. K., & Wilson, R. J.** (1986). *Graph Theory, 1736-1936*. Clarendon Press. <https://books.google.com.tr/books?id=XqYTk0sXmpoC>
- Chalkias, C., & Lasaridi, K.** (2009). A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: The case study of Nikea, Athens, Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(10), 640–650.
- Cheng, J., Karambelkar, B., & Xie, Y.** (2019). *leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript "Leaflet"* (R package version 2.0.3). R-CRAN. <https://cran.r-project.org/package=leaflet>
- Curtin, K. M., Voicu, G., Rice, M. T., & Stefanidis, A.** (2014). A Comparative Analysis of Traveling Salesman Solutions from Geographic Information Systems. *Transactions in GIS*, 18(2), 286–301. <https://doi.org/10.1111/tgis.12045>
- Dorman, M.** (2020). *mapsapi: 'sf'-Compatible Interface to "Google Maps" APIs* (R package version 0.4.7). <https://cran.r-project.org/package=mapsapi>
- Erdem, Y., & Keskindürk, T.** (2011). Kangaroo Algorithm and Travelling Salesman Problem Application. *Stanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(19), 51–63.
- Ertuğrul, İ., & Özçil, A.** (2016). Siyasi Parti Mitinglerinin Gezgin Satıcı Problemi Yaklaşımı ile Analizi. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 4(4), 223–238. <http://www.siyasetekonomiyonetim.org/index.php/senyad/article/view/485>
- Hahsler, M., & Hornik, K.** (2007). TSP - Infrastructure for the Traveling Salesperson Problem. *Journal of Statistical Software*, 23(2), 1–21. <https://doi.org/10.18637/jss.v023.i02>
- Ihaka, R., & Gentleman, R.** (1996). R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299–314.
- İlkuçar, M., & Çetinkaya, A.** (2018). Mobil Telefon ve Google Harita Destekli Yerel Seyahat Rotası Optimizasyonu: Burdur Örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(1), 64–74. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.356320>
- Jayawant, Y. A., Joshi, N., & Vyawahare, S.** (2016). Service Scheduling Using an Agent Based Model with GIS Integration. *INCOSE International Symposium*, 26(s1), 193–203. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2016.00324.x>
- Jitt-Aer, K.** (2018). *The integration of Geographic Information Systems and Capacitated Vehicle Routing Problem for humanitarian logistics : a case study of preparedness for a tsunami in Phuket, Thailand*. University of Portsmouth.
- Karabulut, K.** (2016). An Evolutionary Strategy Algorithm for the Asymmetric Travelling Salesman Problem / Asimetrik Gezgin Satıcı Problemi İçin Bir Evrimsel Strateji Algoritması. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 561–568. <https://doi.org/https://10.18466/cbayarfbe.280728>
- Karadimas, N. V., Doukas, N., Kolokathi, M., & Defteraïou, G.** (2008). Routing optimization heuristics algorithms for urban solid waste transportation management. *WSEAS Transactions on Computers*, 7(12), 2022–2031.
- Karadimas, N. V., Papatzelou, K., & Loumos, V. G.** (2007). Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm. *Waste Management & Research*, 25(2), 139–147. <https://doi.org/10.1177/0734242X07071312>
- Karp, R. M.** (1972). Reducibility among Combinatorial Problems. In R. E. Miller, J. W. Thatcher, & J. D. Bohlinger (Eds.), *Complexity of Computer Computations* (pp. 85–103). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9

Klarreich, E. (2013). *Computer Scientists Find New Shortcuts for Infamous Traveling Salesman Problem*. WIRED.

<https://www.wired.com/2013/01/traveling-salesman-problem/>

Kowalik, Ł., & Majewski, K. (2020). *The Asymmetric Travelling Salesman Problem in Sparse Digraphs*. 1–26. <http://arxiv.org/abs/2007.12120>

Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Kan, A. H. G. R., & Shmoys, D. B. (1985). *The Travelling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization* (1st ed.). John Wiley & Sons Ltd. <https://books.google.com.tr/books?id=qbFIMwEACAAJ>

Padberg, M., & Rinaldi, G. (1989). A Branch-and-Cut Approach to a Traveling Salesman Problem with Side Constraints. *Management Science*, 35(11), 1393–1412. <http://www.jstor.org/stable/2632284>

Prasetyo, S. E., Utomo, A. B., & Hudallah, N. (2018). Implementation of Google Maps API 3 with Haversine Algorithm in the Development of Geographic Information System Boarding House Finder. *Proceedings of the 7th Engineering International Conference on Education, Concept and Application on Green Technology, Eic 2018*,

227–233.

<https://doi.org/10.5220/0009008902270233>

Reinelt, G. (1991). TSPLIB—A Traveling Salesman Problem Library. *ORSA Journal on Computing*, 3(4), 376–384. <https://doi.org/10.1287/ijoc.3.4.376>

Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E., & Lewis, P. M. (2009). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. In *Fundamental Problems in Computing* (Vol. 6, Issue 3, pp. 45–69). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9688-4_3

Santoso, H., & Sanuri, R. (2019). Implementasi Algoritma Genetika dan Google Maps API Dalam Penyelesaian Traveling Salesman Problem with Time Window (TSP-TW) Pada Penjadwalan Rute Perjalanan Divisi Pemasaran STMIK El Rahma. *Teknika*, 8(2), 110–118. <https://doi.org/10.34148/teknika.v8i2.187>

Urquhart, M. E., & Viera, O. (2002). A Vehicle Routing System Supporting Milk Collection. *OPSEARCH*, 39(1), 46–54. <https://doi.org/10.1007/BF03398669>