



Journal of Turkish Operations Management

Yeşil iki-aşamalı araç rotalama problemi: Gerçek yol eğimini dikkate alan yakıt tüketimi hesaplaması

Ergül Kısa Toğrul^{1*}

¹Hitit Üniversitesi, Çorum

e-mail: ergultogrul@hitit.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-7755-5173>

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 26.05.2023

Revize: 22.02.2024

Kabul: 27.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Sürdürülebilirlik,
Lojistik,
Yeşil İki-Aşamalı Araç
Rotalama Problemi,
Yakıt Tüketimi,
Yol Eğimi

Özet

Lojistik faaliyetlerin gün geçtikçe daha da yoğunlaşması ile artan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları çevresel sürdürülebilirliğe yönelik kaygılar yaratmakta ve taşımacılıkta farklı amaçlar edinmeyi zorunlu hale getirmektedir. Böylece, rotalama problemlerinde maliyet, mesafe ve zaman gibi temel amaçların yanı sıra yakıt tüketimi veya emisyonların da gözetilmesi kritik hale gelmektedir. Yakıt tüketimini etkileyen önemli unsurlardan biri olan yol eğiminin göz ardı edilmesi veya yüzeysel olarak hesaba katılması gerçeklikten uzak sonuçlar doğurabilmekte ve yanıltıcı kararların verilmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada yakıt tüketimini en aza indirmek amacıyla ele alınan Yeşil İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (Y-2A-ARP) için gerçekçi ve detaylı yol eğimi hesaplamalarının yapıldığı karma tamsayı programlama modeli ortaya konmuştur. Çok kısa bir mesafede dahi eğimin oldukça değişebileceği gerçeği ile dağıtım ağında yer alan tüm yollar belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış, her bir parçanın eğim değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu ilgili değerler kullanılarak yapılmıştır. Türkiye’de bir ecza deposunun dağıtım ağının örnek alındığı çalışmada konunun uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin araçların toplam yakıt tüketimini nasıl etkileyeceğinin irdelenmesi amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yol eğimi ve hız faktörlerinin araçların yakıt tüketiminde oldukça etkili olduğunu ve göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Green two-echelon vehicle routing problem: Fuel consumption calculation considering real road grade

Article Info

Article History:

Received: 26.05.2023

Revised: 22.02.2024

Accepted: 27.03.2024

Keywords:

Sustainability,
Logistics,
Green Two-Echelon Vehicle
Routing Problem,
Fuel Consumption,
Road Grade

Abstract

With the intensification of logistics activities day by day, increasing energy consumption and greenhouse gas emissions create concerns about environmental sustainability and make it necessary to have different purposes in transportation. Therefore, in routing problems, it becomes critical to consider fuel consumption or emissions as well as basic objectives such as cost, distance or time. Ignoring or superficially considering the road grade, which is one of the important factors affecting fuel consumption, may lead to unrealistic results and misleading decisions. In this context, this study presents a mixed integer programming model for the Green Two-Echelon Vehicle Routing Problem (G-2E-VRP), which is considered to minimize fuel consumption, with realistic and detailed road gradient calculations. With the fact that the road grade can vary considerably even at a very short distance, all roads in the distribution network are divided into parts of certain lengths, the grade value of each part is calculated separately and the fuel consumption calculation is made using these relevant values. The applicability of the subject is shown in the study, which is taken as an example of the distribution network of a pharmaceutical warehouse in Turkey. In addition, sensitivity analyzes were performed in order to examine how the changes in grade and speed values will affect the total fuel consumption of the vehicles. The results show that road grade and speed factors are very efficient in fuel consumption of vehicles and should not be ignored.

1. Giriş

Tüm dünyada taşınan ürün miktarındaki ve trafikte seyreden araç hacmindeki artışlar, enerji ve çevre problemlerine yol açmaktadır. Böylece, çevresel emisyonların ve fosil yakıt tüketiminin azaltılması sürdürülebilir bir yaşam için kritik hale gelmektedir. Lojistik operasyonların da oldukça katkıda bulunduğu araç trafiği, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde büyük sıkıntılar doğurmaktadır, araçlar gürültü, kazalar, trafik sıkışıklığı ve hava kirliliği gibi negatif etkileri yüzünden insanların refahını bozmaktadır (Breunig, Schmid, Hartl ve Vidal, 2016). Doolan ve Muntean (2016)'nın çalışmasında aktarılan bilgilere göre, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde yaşayan çocukların lösemi ve diğer kanserlere yakalanma olasılığı altı kat daha fazladır. Ayrıca, trafikte zaman harcayan kişiler zamanla ilgili çok fazla stres yaşamakta, direksiyon başında geçirilen sürenin artması yüksek tansiyon ve obezite olasılığını da tetiklemektedir. Kentsel ve endüstriyel alanlarda hava kalitesinin araştırılması ve izlenmesi, halk sağlığını ve çevreyi korumak için hava kirliliği sorununun çözümüne yönelik atılan adımlardandır. Öte yandan, şehirlerdeki yerel makamlar, lojistik faaliyetlere emisyonları azaltılmış mümkün olduğu kadar çok aracı dahil etmek ve lojistik süreçleri şehir merkezindeki bölgelerden mümkün olduğunca uzağa taşımak için çaba göstermektedir. (Pamucar, Gigovic, Cirovic ve Regodic, 2016)

İki veya daha fazla kademeden oluşan ve taşıma sistemlerinin şehir içi trafik üzerindeki etkisini azaltma girişimi olarak ortaya atılmış olan çok kademeli dağıtım stratejisi, lojistik operasyonların çevresel ve sosyal etkilerini hafifletmede önemli bir role sahiptir (Li, Yuan, Lv ve Chang, 2016; Soysal, Bloemhof-Ruwaard ve Bektaş, 2015). Büyük kapasiteli araçları kentsel alanlardan uzak tutma hedefine ulaşmanın bir yolu, ürünün doğrudan müşterilere teslim edilmesinden ziyade ara depolar aracılığıyla çok kademeli dağıtım stratejilerini kullanmaktır (Perboli, Tadei ve Vigo, 2011). Ayrıca, çok kademeli dağıtım stratejileri araç kapasitelerinin her kademede verimli kullanılması nedeniyle önemli ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Dellaert, Dashty Saridarq, Van Woensel ve Crainic, 2016).

Araçların etkin bir şekilde rotalanması, ürünlerin taşınmasında operasyonların iyileştirilmesi, yakıt tüketimi ve çevresel emisyonların azaltılmasında önemli bir husustur. Tek kademeli sistemleri ifade eden Araç Rotalama Problemi (ARP) bir dizi kısıt altında optimal araç rotalarının bulunmasına yönelik kombinatoriyal optimizasyonda en çok çalışılan problemlerden biridir ve şu şekilde tanımlanabilmektedir (Liu, Tao, Hu ve Xie, 2017): Bir depo ve belirli talepleri olan bir dizi müşteri bulunmaktadır. Kapasitesi kısıtlı bir araç filosu rotasına depodan başlamakta, yükü müşterilere dağıtmakta veya müşterilerden toplamakta ve son olarak depoya geri dönmektedir. Her bir müşteri tek bir araç tarafından ziyaret edilmektedir. Araçlar, kapasitesini aşan müşterilere hizmet verememektedir. ARP'nin amacı, minimum maliyet ile en uygun rota setini elde etmektir. ARP'nin bir türevidir olan İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP) ise iki kademeli dağıtım sistemlerini ifade etmektedir. 2A-ARP'de dağıtım ürünün doğrudan merkezi depodan müşterilere teslim edilmesi yerine uydu olarak adlandırılan ara depolar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. İki aşamadan oluşan dağıtımın birinci aşamasında ürünler merkezi depodan uydulara getirilmekte ve burada düzenlenerek ikinci kademe araçlara aktarılmaktadır. İkinci aşamadaki dağıtım birinci aşamadaki araçlara nispeten daha küçük ve çevreye dost araçlar vasıtasıyla uydulardan müşterilere olacak şekilde yapılmaktadır. Bu sayede, büyük araçların şehir merkezlerine girişleri engellenmekte ve dağıtımın negatif etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır (Cuda, Guastaroba ve Speranza, 2015).

Rotalama çalışmalarında genellikle temel amaç mesafeyi veya süreyi minimize etmektir (Li, Liu, Jian ve Lu, 2018; Rao, Liu ve Wang, 2016; Soysal, Çimen ve Demir, 2018). Her ne kadar en kısa mesafe rotasının yakıt tüketimini ve emisyonları da en aza indireceği düşünülse de bu durum her zaman geçerli değildir. En kısa mesafe rotası, aracın yokuşları tırmanması için daha fazla enerji gerektiren ve bu süreçte daha fazla emisyon üreten dik yol eğimlerine sahip yol bölümlerini içerebilmektedir. Ayrıca, güzergahta yoğun şekilde sıkışık yollar bulunabilmektedir. Bu da yolda daha fazla zaman harcanmasına ve daha yüksek yakıt tüketimine neden olabilmektedir. Öte yandan, en kısa süreli bir rota, daha az sıkışık yollarda olsa da, aracın daha uzun mesafeler kat etmesine neden olabilmektedir. Daha uzun mesafeler için yüksek hızlarda seyahat etmek, daha düşük hızlarda daha doğrudan bir rotaya kıyasla daha yüksek yakıt tüketimi (ve emisyon) ile sonuçlanabilmektedir (Scora, Boriboonsomsin ve Barth, 2015). Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliğin artan önemi nedeniyle, rotalama problemlerinde toplam yakıt tüketimini en aza indiren, Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından ortaya atılan Yeşil ARP (YARP) oldukça dikkat çekmiş ve birçok araştırmacı tarafından çalışmalarına konu edilmiştir. YARP, filo operasyonlarındaki enerji tüketimini azaltmak için yakıt tüketimini en aza indirmeyi veya biyodizel, etanol, hidrojen, metanol, doğalgaz, elektrik gibi alternatif yakıtlarla çalışan araçları benimsemeyi amaçlamaktadır (Asghari ve Al-e-hashem, 2021; Erdelic ve Caric, 2019).

Demir, Bektaş ve Laporte (2014), araçların yakıt tüketimini etkileyen faktörleri araç, çevre, trafik, sürücü ve operasyonlar olmak üzere beş sınıfa ayırmaktadır. *Araç faktörleri* aracın boş ağırlığını, aracın şeklini, motor boyutunu/türünü, motor sıcaklığını, şanzımanı, yakıt tipini; *çevre faktörleri* yol eğimini, kaplama türünü, ortam sıcaklığını, rakımı, rüzgar koşullarını; *trafik faktörleri* hızı, hızlanmayı/yavaşlamayı, trafik sıkışıklığını; *sürücü*

faktörleri sürücü agresifliğini, vites seçimini, rölanti süresini; *operasyon faktörleri* filo boyutunu/karışımını, yükü, boş kilometreleri ve duraklama sayısını içermektedir. Söz konusu faktörlerden bazılarının dikkate alınması, modellenmesi veya ölçülmesi zor ve zahmetlidir. Yol eğimi de bu faktörlerden bir tanesidir. Yol eğimi, yükseklik değişiminin yatay mesafeye oranı olarak tanımlanmaktadır (Fan, Song, Zhu, Wu, Zhai ve Yu, 2022).

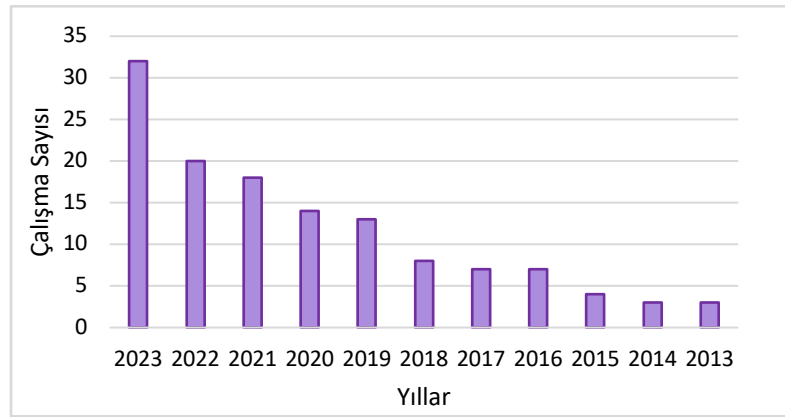
Gerçekleştirilen detaylı literatür incelemesi sonucunda rotalama problemlerine yönelik yapılan kimi çalışmaların yakıt tüketimini hesaplamada önemli unsurlar olan mesafeyi, aracın hızını ve yükünü dikkate aldığı görülmektedir. Ancak, diğer bir önemli husus olan yol eğiminin çalışmalarda ya dikkate alınmadığı, ya ortalama bir değer baz alındığı ya da yolun düz olduğu varsayımı ile 0 olarak hesaba katıldığı gözlemlenmektedir. 2A-ARP'de yakıt tüketimini veya emisyonları minimize etmeyi amaçlayan çalışmalarda yolun eğimini gerçekçi ve detaylı bir şekilde dikkate alan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, Y-2A-ARP olarak adlandırılan, araçların toplam yakıt tüketimini minimize etmek amacıyla 2A-ARP ele alınmaktadır. Mesafenin, hızın, yükün ve yol eğiminin dikkate alındığı yakıt tüketimi hesaplamasında makul doğruluk ve yüksek uygulanabilirlik elde etmek için bir çözüm geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda, çok kısa bir mesafede dahi eğimin oldukça değişebileceği gerçeği ile tüm dağıtım ağında veya yol boyunca tek bir eğim değeriyle hesaplama yapmak yerine, dağıtım ağında yer alan tüm yollar belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış, her bir parçanın eğim değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu ilgili değerler kullanılarak yapılmıştır. Türkiye'de bir ecza deposunun dağıtım ağının örnek alındığı çalışmada konunun uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin araçların toplam yakıt tüketimini nasıl etkileyeceğinin irdelenmesi amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma şu bölümlerden oluşmaktadır. İlgili literatür incelemesi Bölüm 2'de verilmektedir. Bölüm 3'te 2A-ARP'den bahsedilmekte, Y-2A-ARP tanımı, matematiksel modeli ve yakıt tüketimi hesaplaması detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Bölüm 4'te uygulama tasarımı, Bölüm 5'te ise uygulamaya yönelik analizler ve bulgular paylaşılmaktadır. Son bölümde, sonuç ve öneriler aktarılmaktadır.

2. Literatür incelemesi

ARP, lojistik alanında bir dizi aracın optimum veya optimuma yakın rotalarının bulunmasına yönelik oldukça sıklıkla çalışılan problemlerdendir. Literatürde çeşitli amaç (mesafe, araç sayısı, süre, yakıt tüketimi minimizasyonu vb.) ve kısıtları dikkate alan birçok ARP türüne ve çözüm yöntemine rastlamak mümkündür. Rotalama çalışmalarında genellikle temel amaç mesafeyi veya süreyi minimize etmektir (Li ve diğ., 2018; Rao ve diğ., 2016; Soysal ve diğ., 2018). Ancak, kaynakların sınırlı olması, çevresel kirliliğin önüne geçme gerekliliği vb. nedenler işletmeler için birer itici güç olmuş, insanların lojistiğe bakış açıları değişmiş, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonunun en aza indirilmesi zamanla zorunluluk haline gelmiştir. Böylece, klasik rotalama probleminin bir uzantısı olarak, nispeten yeni bir araştırma alanı olan YARP *Erdoğan ve Miller-Hooks (2012)* tarafından ortaya atılmıştır. YARP, filo operasyonlarındaki enerji tüketimini azaltmak için yakıt tüketimini en aza indirmeyi veya biyodizel, etanol, hidrojen, metanol, doğalgaz, elektrik gibi alternatif yakıtlarla çalışan araçları benimsemeyi amaçlamaktadır (Asghari ve Al-e-hashem, 2021; Erdelic ve Caric, 2019).

2A-ARP de ARP türlerinden bir tanesidir. Çok aşamalı dağıtım ağını benimseyen 2A-ARP şehir merkezlerine büyük araçların girmemesi, buradaki dağıtımın küçük araçlar vasıtasıyla gerçekleştirilmesi gerektiğini savunmakta ve yakıt tüketimi, trafik sıkışıklığı, gürültü, hava kirliliği gibi dağıtımın negatif etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır (Breunig, Baldacci, Hartl ve Vidal, 2019; Dellaert ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2018). 2A-ARP'nin kim(ler) tarafından literatüre kazandırıldığıyla ilgili çeşitli görüş ve bilgiler bulunmaktadır. Problemin ilk resmi tanımı kimilerine göre *Gonzalez-Feliu (2008)* (Dellaert ve diğ., 2016; Eitzen, Lopez-Pires, Baran, Sandoya ve Chicaiza, 2017), kimilerine göre *Crainic, Ricciardi ve Storchi (2009)* (Li ve diğ., 2018; Perboli, Tadei ve Fadda, 2018; Sluijk, Florio, Kinable, Dellaert ve Van Woensel, 2023), kimilerine göre ise *Perboli ve diğ. (2011)* tarafından yapılmıştır (Jie, Yang, Zhang ve Huang, 2019). Literatüre girişinden bugüne çeşitli yazarlar tarafından araştırmalarına konu edinilen 2A-ARP çalışmaları ile ilgili özellikle son yıllarda artış gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Yıllara göre 2A-ARP çalışma sayıları (Web of Science Core Collection)

Her ne kadar literatürdeki 2A-ARP çalışmaları sayısı, çözüm yöntemi ve varsayımlar bakımından gün geçtikçe zenginleşiyor olsa da sürdürülebilir lojistiğin bir boyutu olan çevreci yaklaşım ile yakıt tüketimini veya emisyon değerlerini minimize etmeyi amaçlayan 2A-ARP çalışmaları sınırlı sayıdadır. Söz konusu çalışmalar Tablo 1 ile gösterilmektedir.

Tablo 1. Yakıt tüketimini dikkate alan 2A-ARP çalışmaları

Çalışma	Problem Türü	Çözüm Yöntemi	Yakıt Tüketimi Hesaplamasında Dikkate Alınan Faktörler			
			Mesafe	Hız	Yük	Yol Eğimi
Soysal ve diğ. (2015)	ZB-2A-KARP	TSDP	✓	✓	✓	0
Li ve diğ. (2016)	2A-ZKARP	CWTA, YA	✓		✓	
Wang ve diğ. (2017)	ÇY-2A-KARP	DKA, TP	✓	✓	✓	0
Wang ve diğ. (2018)	2A-İÇM-ARP	k-OK, GBOSGA-II	✓			
Babaei Tirkolaee ve diğ. (2019)	2A-KARP	KTP	✓			
Babagolzadeh ve diğ. (2019)	2A-AARP	TSDP	✓	✓	✓	0
Esmaceli ve Sahraçian (2019)	2A-KARP	TSDOP	✓			
Kancharla ve Ramadurai (2019)	ÇD-2A-YMRP	TSDP, UBKA	✓	✓	✓	0
Liu ve diğ. (2020)	KA-2A-ARP	TSDOP, KTHGAPSO	✓			
Wang ve Wen (2020)	DK-2A-HFARP	UGA	✓	✓	✓	0
Wang ve diğ. (2020)	DUZDİ-2A-ÇMARP	DP, DiP, Gk-OK, GBOSGA-II	✓			
Anderlüh ve diğ. (2021)	2A-ARP	BKA, DKB	✓			
Liu ve Liao (2021)	2A- İATARP	k-OK, CWTA, UBKA	✓	✓	✓	0
Paul ve diğ. (2021)	ÇZPEDT-2A-ARP	ÇADKA	✓	✓	✓	0
Reinaldi ve diğ. (2021)	AT-2A-ARP	TSDP	✓			
Liu ve diğ. (2023)	KA-YB-2A-ARP	KTP, KTYBA	✓	✓	✓	
Sun ve Wang (2023)	EZ-TD-2A-ARP	BOSGA-II, ÇAPSO	✓			
Bu çalışma	Y-2A-ARP	KTP	✓	✓	✓	Gerçek

2A-ARP: İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi, **2A-KARP:** 2A Kapasiteli ARP, **ZB-2A-KARP:** Zamana Bağlı 2A-KARP, **2A-ZKARP:** İki Aşamalı Zaman Kısıtlı ARP, **ÇY-2A-KARP:** Çevreci Yaklaşımla 2A-KARP, **2A-İÇM-ARP:** 2A İşbirlikçi Çok Merkezli ARP, **2A-AARP:** 2A Açık ARP, **ÇD-2A-YMRP:** Çok Depolu 2A Yakıt Minimizasyonlu Rotalama Problemi, **KA-2A-ARP:** Karma Araçlı 2A-ARP, **DK-2A-HFARP:** Düşük Karbon 2A Heterojen Filolu ARP, **DUZDİ-2A-ÇMARP:** Durum Uzay Zamana Dayalı İşbirlikçi 2A Çok Merkezli ARP, **2A-İATARP:** 2A İşbirlikçi Atık Toplama ARP, **ÇZPEDT-2A-ARP:** Çoklu Zaman Pencere Eşzamanlı Dağıtım ve Toplamalı 2A-ARP, **AT-2A-**

ARP: Ara Tesisli 2A-ARP, **Y-2A-ARP:** Yeşil 2A-ARP, **KA-YB-2A-ARP:** Karma Araçlı Yüke Bağlı 2A-ARP, **EZ-TD-2A-ARP:** Eş Zamanlı Topla Dağıtım 2A-ARP, **TSDP:** Tam Sayılı Doğrusal Programlama, **CWTA:** Clark ve Wright Tasarruf Algoritması, **YA:** Yerel Arama, **DKA:** Değişken Komşu Arama, **TP:** Tamsayılı Programlama, **k-OK:** k-Ortalamalı Kümeleme, **GBOSGA-II:** Gelişmiş Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II, **KTP:** Karışık Tamsayılı Programlama, **TSDOP:** Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, **UBKA:** Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama, **KTHGAPSO:** Kümeleme Tabanlı Hibrit Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu, **UGA:** Uyarlanabilir Genetik Algoritma, **DP:** Doğrusal Programlama, **DiP:** Dinamik Programlama, **Gk-OK:** Gelişmiş k-Ortalamalı Kümeleme, **BKA:** Büyük Komşu Arama, **DKB:** Diktörtgen Kuboid Bölme, **ÇADKA:** Çok Amaçlı Değişken Komşu Arama, **KTYBA:** Küme Tabanlı Yapay Bağışıklık Algoritması, **BOSGA-II:** Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II, **ÇAPSO:** Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

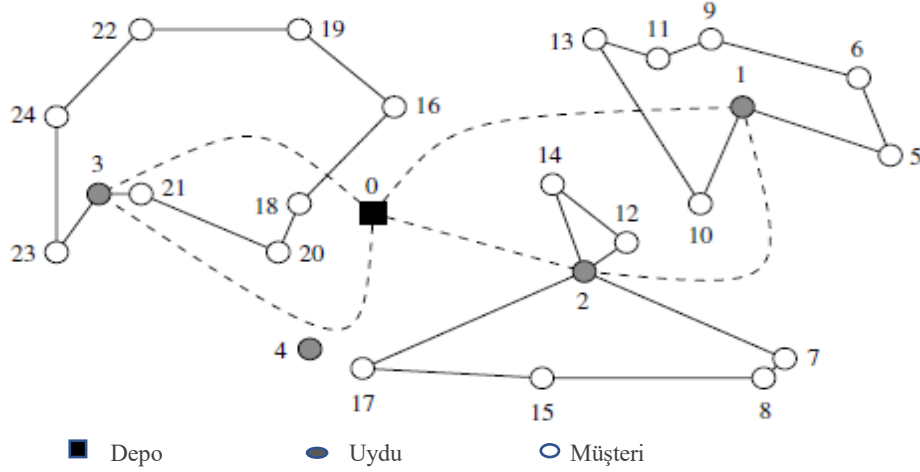
Tablo 1 incelendiğinde çalışmaların yakıt tüketimini hesaplamada önemli unsurlar olan mesafeyi, araç hızını ve yükünü dikkate aldığı görülmektedir. Öte yandan, diğer bir önemli husus olan yol eğiminin çalışmalarda ya dikkate alınmadığı ya da yolun düz olduğu varsayımı ile 0 olarak hesaba katıldığı gözlemlenmektedir. 2A-ARP çalışmalarında yolun eğimini gerçekçi ve detaylı bir şekilde dikkate alan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Rotalama çalışmaları incelendiğinde genellikle eğimin 0 ya da ortalama bir değer olarak baz alındığı, yakıt tüketimini tahmin etmek amacıyla çok sayıda çalışmanın gerçekleştirilmesine rağmen, yol eğimini kapsamlı bir şekilde hesaplamalara dahil eden girişimlerin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. **Hooker (1988)** yakıt tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için nasıl araç kullanılması gerektiğini belirlemek adına 15 adet otomobilde yakıt tüketimi simülasyonu kullanmıştır. Dinamik programlamanın kullanıldığı çalışmada değişken yol (örn. sabit eğimli yol, engebeli yol) ve gezi türlerine yönelik yakıt tüketimini en aza indirmek için sürüş tarzı önerileri yapılmıştır. **Kamal, Mukai, Murata ve Kawabe (2011)** eko-sürüş sistemi önermişler ve yukarı- aşağı yol eğimlerinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bir aracın tükettiği yakıtın, hız ve ivme özelliklerinin yanı sıra yol eğimlerinden de büyük ölçüde etkilendiği sonucuna varmışlardır. **Scora ve diğ. (2015)** ağır hizmet kamyonları için araç ağırlığını, gerçek zamanlı trafik hızını ve yol eğimini hesaba katan enerji ve emisyon modelini içeren bir eko-rotalama ve navigasyon sistemi geliştirmişlerdir. **Wang, Du, Yu, Huang ve Li (2015)** Google Earth'den elde edilen yükseklik verilerini kullanarak seyahat hızı, yol eğimi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. **Alinaghian ve Naderipour (2016)** zamana bağlı ARP'de yakıt tüketiminde etkili olan faktörleri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Zaman içindeki yakıt tüketimini hesaplamak için yük, araç hızı, yol eğimi ve şehir trafiği gibi faktörleri dikkate alarak yeni ve kapsamlı bir model sunmuşlardır. **Rao ve diğ. (2016)** Yakıt Tüketimi ARP olarak adlandırdıkları problemlerinde yakıt tüketimini yol eğiminin derecesini dikkate alarak ölçmüşlerdir. Herhangi iki müşteri arasındaki yol eğimi derecesini, dikey koordinatlar arasındaki farkı yolun mesafesine bölerek hesaplamışlardır. **Kang, Shen ve Li (2019)** yeni bir yol eğimi tahmin sistemi önermişlerdir. Yol eğimini tahmin etmek için araç hareket halindeyken araç durumlarını (hız, ivme, direksiyon hızı, konum) sürekli olarak ölçen bir akıllı telefon kullanmışlardır. Yakıt tüketimi ve hava kirliliği emisyonunu hesaplamak için elde edilen eğim değerlerini modellerine entegre etmişler ve yol eğiminin dikkate alınmadığı değerlere göre %33.4 oranında artış gözlemlenmiştir. **Schröder ve Cabral (2019)** Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı rotalama modeli ile yakıt tüketimi ve CO2 emisyon hesaplamasında yolun eğimini de dikkate almışlardır. Yol segmentlerini alt bölümlere ayırarak yol eğimini hesaplarken Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)'ni kullanmışlardır. **Fan, Zhang, Tian, Lv ve Fan (2021)** zamana bağlı zaman pencereli çok depolu YARP modelinde yakıt tüketimi hesaplamasında yol eğimi ve araç yükü için düzeltme katsayıları kullanmışlardır. **Lai, Costa, Demir, Florio ve Van Woensel (2021)** toplam seyahat maliyetinin yakıt tüketimi ve CO2 emisyonlarının bir fonksiyonu olduğu Kirlilik Rotalama ve Hız Optimizasyon Problemi için etkin bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. Yol eğimi hesaplamasında yükseklik bilgilerini kullanmışlar ve iki düğüm arasındaki yol eğimi derecesini yükseklik farklarını (başlangıç-bitiş) yolun mesafesine bölerek hesaplamışlardır. **Dündar, Soysal, Ömürgönülşen ve Kanellopoulos (2022)** Yeşil Dinamik Gezgin Satıcı Problemi için bir karar destek modeli geliştirmişlerdir. Yakıt tüketimi hesaplamasında yolun eğimini detaylı bir şekilde ele almışlar, tüm dağıtım ağında gerçek eğim değerlerini kullanmışlardır. Dağıtım ağındaki her bir ark yaklaşık 10m'lik uzunluklarda parçalara ayrılmış, SYM aracılığıyla tüm parçaların eğim değerleri elde edilmiştir. **Fan ve diğ. (2022)** yakıt tüketimini hesaplamak üzere gerçek yol eğimlerini elde etmek için gerçekleştirdikleri çalışmalarında 680 hafif hizmet aracından veri toplamışlardır. Önerilen yöntemin, yol eğimini %0,12 ortalama mutlak hata doğrulukla elde ettiği sonucuna varmışlardır.

Detaylı literatür incelemesi sonucunda, her ne kadar gün geçtikçe çalışma sayıları artsa da, 2A-ARP çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu araştırmalardan rotalama kararlarında yakıt tüketimi ve/veya emisyon salınımını en aza indirmeyi amaç edinerek çevreci bir yaklaşımla sürdürülebilirliğe odaklanan çalışmaların sayısı ise daha da kısıtlıdır. Bu çalışmada, sınırlı literatüre katkıda bulunmak amacıyla Y-2A-ARP çalışılmıştır. Yakıt tüketimi hesaplamasında mesafe, hız, yük ve eğim faktörleri dikkate alınmıştır. Dağıtım ağında yer alan tüm yolların belirli uzunluklarda parçalara ayrılmasına ve her bir parçanın eğim değerinin ayrı ayrı dikkate alınmasına dayalı yakıt tüketimi hesaplaması yapılmış, rotalama kararları da buna göre verilmiştir.

3. İki-aşamalı araç rotalama problemi

ARP'ye nazaran yeni bir problem türü olan 2A-ARP, iki kademeli bir yük dağıtım sisteminde araçların optimal güzergahının belirlenmesini amaçlamaktadır. Dağıtım ağındaki düğümler sırasıyla merkezi depo, uydular (satellites) olarak adlandırılan ara depolar ve müşterilerden oluşmaktadır. Birinci aşamada merkezi depodan uydulara, ikinci aşamada ise uydulardan müşterilere ürün akışı söz konusu olmaktadır. Ürünlerin doğrudan merkezi depodan müşterilere taşınmasına izin verilmemektedir. Farklı seviyelerdeki araçlar taşıma kapasitesi açısından farklılık göstermekte iken aynı seviyedeki araçlar benzer özelliklere sahiptir (homojendir). Birinci aşamada büyük kapasiteli araçlar kullanılmaktadır. Bu araçlar, rotasına merkezi depodan başlamakta, bir veya birden fazla uyduya uğradıktan sonra merkezi depoya geri dönmektedirler. Uydu noktalarına getirilen ürünler burada düzenlendikten sonra müşterilere taşınmak üzere ikinci aşamadaki araçlara aktarılmaktadır. Bir uydunun sınırlı bir kapasitesi vardır. Her bir uydu birden fazla birinci seviye rotadan hizmet alabilmektedir. İkinci aşamada birinci aşamaya nispeten daha küçük ve/veya çevreye dost araçlar kullanılmaktadır. İkinci aşamadaki araçlar rotasına herhangi bir uydudan başlamakta, bir veya birden fazla müşteriye uğradıktan sonra başladığı uydu noktasına geri dönmektedir (Baldacci, Mingozzi, Roberti ve Calvo, 2013; Cuda ve diğ., 2015; Grangier, Gendreau, Lehuède ve Rousseau, 2016; Perboli ve diğ., 2018; Soysal ve diğ., 2015; Zhou, Baldacci, Vigo ve Wang, 2018). 2A-ARP'nin dağıtım ağına yönelik bir örnek Şekil 2 ile gösterilmektedir.



Şekil 2. 2A-ARP dağıtım ağı örneği (Baldacci ve diğ., 2013)

3.1. Yeşil iki-aşamalı araç rotalama problemi tanımı

Y-2A-ARP, tam yönlendirilmiş bir şebeke üzerinde tanımlanmaktadır. İki kademeye bölünmüş olan dağıtım ağında bir adet merkezi depo, belirli sayıda uydu (ara depo) ve müşteri bulunmaktadır. Dağıtımın birinci aşamasında ürünler depodan birincil kademe araçlar vasıtasıyla uydulara; ikinci aşamasında ise ikincil kademe araçlar vasıtasıyla uydulardan müşterilere yönlendirilmektedir. Birincil kademe araçlar, ikincil kademe araçlara nispeten daha büyüktür ve dolayısıyla daha çok taşıma kapasitesine sahiptir. Her iki kademede de araçlar kendi içlerinde homojendir. Diğer bir deyişle, araçların taşıma kapasitesi, bakım maliyeti, sigorta maliyeti vb. açısından aynı olduğu varsayılmaktadır. Uyduların taşıma kapasitesi, buralardan yönlendirilebilecek maksimum araç sayısı ile belirlenmektedir. Birinci aşamada uydudan uyduya gidişlere izin verilirken; ikinci aşamada bu gidişler engellenmektedir. Müşteri talepleri önceden bilinmektedir ve araçların operasyonları esnasında da deterministiktir. Problemin amacı toplam yakıt tüketimini minimize edecek optimal birincil ve ikincil kademe araç rotalarının belirlenmesidir.

Problemde kullanılan semboller ve açıklamaları Tablo 2 ile sunulmaktadır.

Tablo 2. Y-2A-ARP Modelinde Yer Alan Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri

Grup	Sembol	Tanım
Kümeleler	D	Düğümleler kümesi, $D = D_0 \cup D_u \cup D_m$
	D_0	Depo, $D_0 = \{0\}$
	D_u	Uydular kümesi, $D_u = \{1, 2, \dots, u\}$
	D_m	Müşteriler kümesi, $D_m = \{1, 2, \dots, m\}$
	Y	Birinci aşama yaylar kümesi, $Y = \{(i, j) \mid i, j \in D_0 \cup D_u, i \neq j\}$
	Y'	İkinci aşama yaylar kümesi, $Y' = \{(i, j) \mid i, j \in D_u \cup D_m, i \neq j\}$
	$\delta^-(u)$	Birinci aşamada u uydusuna gelen yaylar kümesi, $u \in D_u$
	$\delta^+(u)$	Birinci aşamada u uydusundan çıkan yaylar kümesi, $u \in D_u$
	$\delta^-(i)$	İkinci aşamada i düğümüne gelen yaylar kümesi, $i \in D_u \cup D_m$
	$\delta^+(i)$	İkinci aşamada i düğümünden çıkan yaylar kümesi, $i \in D_u \cup D_m$
A	Birincil kademe araçlar kümesi, $A = \{1, 2, \dots, a\}$	
Parametreleler	K	Birincil kademe araç kapasitesi (kg)
	K'	İkincil kademe araç kapasitesi (kg)
	a'	İkincil kademe araç sayısı (adet)
	a'_u	u uydusunda kullanılabilir maksimum ikincil kademe araç sayısı, $u \in D_u$ (adet)
	d_i	i müşterisinin talep miktarı, $i \in D_m$ (kg)
	m_{ij}	Birinci aşamada i ve j düğümleri arasındaki mesafe (m)
	m'_{cb}	İkinci aşamada c ve b düğümleri arasındaki mesafe (m)
	h_{ij}	Birincil kademe aracın i ve j düğümleri arasındaki hızı (m/s)
	h'_{cb}	İkincil kademe aracın c ve b düğümleri arasındaki hızı (m/s)
Karar Değişkenleleri	x_{ija}	a aracının i'den j'ye gitmesi durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili karar değişkeni, $(i, j) \in Y, a \in A$
	p_{ua}	u uydusuna a aracı ile taşınan ürün miktarı, $u \in D_u, a \in A$
	z_{ija}	i düğümünden ayrılırken a aracı üzerindeki yük, $(i, j) \in Y, a \in A$
	y_{cbu}	İkinci kademe u uydusundan ayrılmış aracın c'den b'ye gitmesi durumunda 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili karar değişkeni, $(c, b) \in Y', u \in D_u$
	t_{cbu}	c düğümünden ayrılırken u uydusundan yönlendirilmiş aracın yükü, $(c, b) \in Y', u \in D_u$
	s_u	u uydusundan temin edilen talep miktarı, $u \in D_u$

3.2. Yakıt tüketimi hesaplaması

Yol eğimi araçların yakıt tüketimini etkileyen önemli faktörlerdendir. Öte yandan, yakıt tüketimini minimize etmeyi amaçlayan rotalama problemlerine yönelik yapılan çalışmaların bazılarında yol eğiminin hiç dikkate alınmadığı bazılarında ise yüzeysel olarak dikkate alındığı gözlemlenmektedir. Diğer bir deyişle, hesaplamalarda eğimin 0 olduğu, dağıtım ağındaki tüm yolların ortalama bir eğim değerine sahip olduğu veya herhangi bir yol boyunca eğimin değişmeyip sabit bir değere sahip olduğu varsayımıyla hesaplama yapıldığı görülmektedir. Gerçek hayatta ise yolun eğimi çok küçük mesafelerde dahi oldukça farklılaşabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada Dündar ve diğ. (2022)'nin çalışmasındaki yaklaşıma benzer bir şekilde dağıtım ağındaki her bir yay (yol) belirli uzunluklarda parçalara ayrılmakta ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu parçalar bazında yapılmaktadır.

Araçların yakıt tüketimi hesaplamasında, ARP çalışmalarında yaygınlıkla kullanılan Barth, Younglove ve Scora (2005)'in yakıt tüketimi fonksiyonu temel alınmıştır. Mesafenin, araç hızının, araç yükünün ve yol eğiminin kapsamlı bir şekilde hesaba katıldığı yakıt tüketimi fonksiyonu aşağıda verilmektedir. Ayrıca, fonksiyonda yer alan semboller Tablo 3 ile gösterilmektedir.

Tablo 3. Yakıt tüketimi hesaplamasında kullanılan semboller ve açıklamaları

Sembol	Açıklama
ϕ	Hava-yakıt oranı
k	Motor sürtünme faktörü (kilojul/devir/litre)
N	Motor hızı (devir/saniye)
V_s	Motor boşaltma oranı (litre)
μ	Yakıt tüketim katsayısı
η	Motor verimliliği parametresi
η_{t_f}	Aracın güç aktarma organları verimliliği
r_1	Birinci aşamadaki aracın boş ağırlığı (kg)
r_2	İkinci aşamadaki aracın boş ağırlığı (kg)
g	Yerçekimi katsayısı (metre/ s ²)
θ_{ijp}	Birinci aşamada i ve j düğümleri arasındaki p. parçanın yol eğiminin açısı derecesi ($i,j \in Y, p \in P$)
$\theta'_{cbp'}$	İkinci aşamada c ve b düğümleri arasındaki p'. parçanın yol eğiminin açısı derecesi ($c,b \in Y', p' \in P'$)
C_d	Aerodinamik sürüklenme katsayısı
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
S_1	Birinci aşamadaki aracın ön yüzey alanı (m ²)
S_2	İkinci aşamadaki aracın ön yüzey alanı (m ²)
C_r	Yuvarlanma direnci katsayısı

$$\text{Yakıt (gram)} = f_{ij}^1 + f_{cb}^2 \quad (1)$$

(1) numaralı denklemde, $f_{ij}^1 = \sum_{p \in P} f_{ijp}^1$ ve $f_{cb}^2 = \sum_{p' \in P'} f_{cbp'}^2$ olmak üzere, f_{ij}^1 ve f_{cb}^2 sırasıyla birinci ve ikinci aşamadaki araçların toplam yakıt tüketimini göstermektedir.

$$f_{ijp}^1 = f_{ijp}^{11} + f_{ijp}^{12} \quad (2)$$

$$f_{cbp'}^2 = f_{cbp'}^{21} + f_{cbp'}^{22} \quad (3)$$

$$f_{ijp}^{11} = \frac{C_1 m_{ijp}}{h_{ij}} \quad (4)$$

$$f_{ijp}^{12} = C_2 ((r_1 + z_{ija}) g m_{ijp} \sin\theta_{ijp} + C_3 h_{ij}^2 m_{ijp} + (r_1 + z_{ija}) g m_{ijp} C_r \cos\theta_{ijp}) \quad (5)$$

$$f_{cbp'}^{21} = \frac{C_1 m'_{cbp'}}{h'_{cb}} \quad (6)$$

$$f_{cbp'}^{22} = C_2 ((r_2 + t_{cbu}) g m'_{cbp'} \sin\theta'_{cbp'} + C_3 h'_{cb}{}^2 m'_{cbp'} + (r_2 + t_{cbu}) g m'_{cbp'} C_r \cos\theta'_{cbp'}) \quad (7)$$

$C_1 = \phi k N V_s / \mu$, $C_2 = \phi / 1000 \eta \mu \eta_{t_f}$, $C_3 = 0,5 C_d \rho S_1$, $C_3' = 0,5 C_d \rho S_2$ olmak üzere (2) ve (3) numaralı denklemlerin birinci kısımları (f_{ijp}^{11} ve $f_{cbp'}^{21}$) motor kullanımından kaynaklanan yakıt tüketimi, ikinci kısımları (f_{ijp}^{12} ve $f_{cbp'}^{22}$) ise yokuş yukarı eğimli bir yolda sürüşten kaynaklanan yakıt tüketimidir (Rao ve diğ., 2016). P ve P' sırasıyla birinci ve ikinci aşamadaki parçalar kümesidir. $p \in P$ ve $p' \in P'$ olmak üzere, m_{ijp} birinci aşamada

i ve j düğümleri arasındaki p . parçanın uzunluğunu ve $m'_{c b p'}$ ise ikinci aşamada c ve b düğümleri arasındaki p' . parçanın uzunluğunu göstermektedir.

(5) ve (7) numaralı fonksiyonlarda yer alan yolun eğimi, ilgili parçanın bitiş ve başlangıç noktaları yükseklik farklarının parçanın uzunluğuna bölünmesi yoluyla hesaplanmaktadır. Eğimi derece cinsinden ifade etmek için ise “arcsin” fonksiyonu kullanılmaktadır (Dündar ve diğ., 2022; Rao ve diğ., 2016). Söz konusu hesaplamalar aşağıda (8) ve (9) numaralı denklemlerle verilmektedir.

$$\theta_{ijp} = \text{Arcsin} \frac{Z_{ijp+1} - Z_{ijp}}{m_{ijp}} \tag{8}$$

$$\theta'_{c b p'} = \text{Arcsin} \frac{Z_{c b p'+1} - Z_{c b p'}}{m'_{c b p'}} \tag{9}$$

Aracın yokuş aşağı doğru gitmesi durumunda, diğer bir ifadeyle $Z_{ijp+1} < Z_{ijp}$ veya $Z_{c b p'+1} < Z_{c b p'}$, f_{ijp}^{12} ve $f_{c b p'}^{22}$ hesaplamalarında negatif değerler elde edilebilmektedir. Ancak, bu durum pratikte herhangi bir anlam ifade etmemektedir. Söz konusu durumda $f_{ijp}^1 = f_{ijp}^{11}$ ve $f_{c b p'}^2 = f_{c b p'}^{21}$ olarak hesaplanmaktadır (Rao ve diğ., 2016). Özetle, parçanın yakıt tüketimi birinci aşamada i düğümünden j düğümüne, ikinci aşamada c düğümünden b düğümüne sırasıyla (10) ve (11) numaralı fonksiyonlarla hesaplanmaktadır.

$$f_{ijp}^1 = \begin{cases} f_{ijp}^{11} + f_{ijp}^{12} & f_{ijp}^{12} > 0 \\ f_{ijp}^{11} & f_{ijp}^{12} \leq 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$f_{c b p'}^2 = \begin{cases} f_{c b p'}^{21} + f_{c b p'}^{22} & f_{c b p'}^{22} > 0 \\ f_{c b p'}^{21} & f_{c b p'}^{22} \leq 0 \end{cases} \tag{11}$$

3.3. Matematiksel model

Jepsen, Spoorendonk ve Ropke (2013)’ün çalışmasındaki modelin esas alınarak oluşturulduğu Y-2A-ARP matematiksel modeli aşağıda sunulmaktadır.

$$\text{Minimize} \sum_{a \in A} \sum_{(i,j) \in Y} \sum_{p \in P} f_{ijp}^1 x_{ija} + \sum_{u \in D_u} \sum_{(c,b) \in Y'} \sum_{p' \in P'} f_{c b p'}^2 y_{c b u} \tag{12}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} x_{ija} = \sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} x_{ija} \quad \forall u \in D_u, a \in A \tag{13}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} x_{ija} \leq 1 \quad \forall u \in D_0 \cup D_u, a \in A \tag{14}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} z_{ija} = \sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} z_{ija} - p_{ia} \quad \forall u \in D_u, a \in A \tag{15}$$

$$z_{ija} \leq K x_{ija} \quad \forall (i,j) \in Y, a \in A \tag{16}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} z_{ija} \leq 0 \quad \forall u \in D_0, a \in A \tag{17}$$

$$\sum_{a \in A} p_{ua} = s_u \quad \forall u \in D_u \tag{18}$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c,b) \in \delta'^+(i)} y_{c b u} = 1 \quad \forall i \in D_m \tag{19}$$

$$\sum_{(c,b) \in \delta'^-(i)} y_{c b u} = \sum_{(c,b) \in \delta'^+(i)} y_{c b u} \quad \forall i \in D_m, u \in D_u \tag{20}$$

$$\sum_{u \in D_u \setminus \{u\}} \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u'} + \sum_{u \in D_u \setminus \{u\}} \sum_{(c, b) \in \delta^-(u)} y_{c b u'} = 0 \quad \forall u \in D_u \quad (21)$$

$$\sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u} \leq a'_u \quad \forall u \in D_u \quad (22)$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u} \leq a' \quad (23)$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^+(i)} t_{c b u} = \sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^-(i)} t_{c b u} - d_i \quad \forall i \in D_m \quad (24)$$

$$t_{c b u} \leq K' y_{c b u} \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (25)$$

$$s_u = \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} t_{c b u} \quad \forall u \in D_u \quad (26)$$

$$\sum_{u \in D_u} s_u = \sum_{i \in D_m} d_i \quad \forall u \in D_u \quad (27)$$

$$x_{i j a} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in Y, a \in A \quad (28)$$

$$y_{c b u} \in \{0, 1\} \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (29)$$

$$p_{u a} \geq 0 \quad \forall u \in D_u, a \in A \quad (30)$$

$$z_{i j a} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in Y, a \in A \quad (31)$$

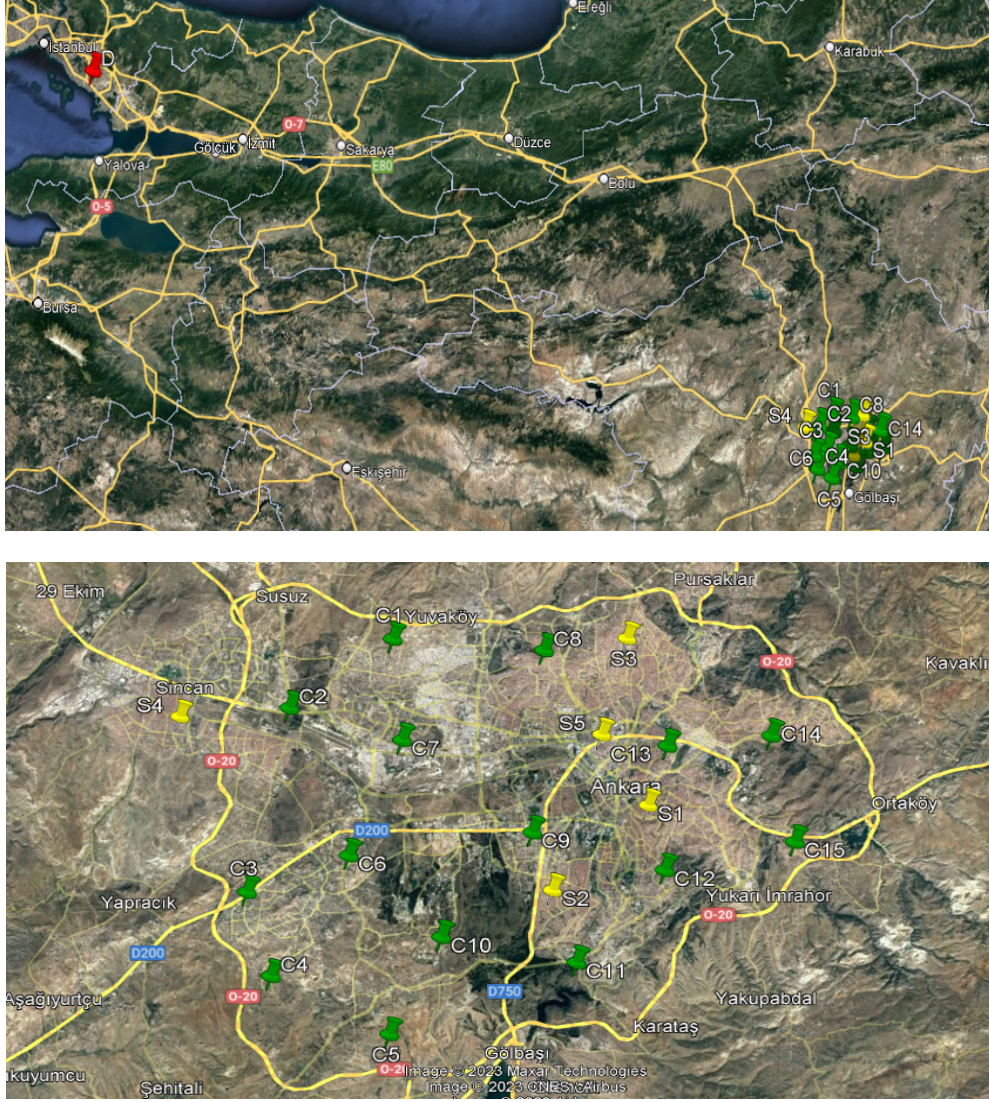
$$t_{c b u} \geq 0 \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (32)$$

$$s_u \geq 0 \quad \forall u \in D_u \quad (33)$$

(12) ile verilen amaç fonksiyonu toplam yakıt tüketimini minimize etmek üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Fonksiyonun ilk kısmı birinci aşamadaki araçların, diğer kısmı ise ikinci aşamadaki araçların yakıt tüketimini ifade etmektedir. (13) kısıtları her bir uydu ve araç için akışın korunumunu sağlamaktadır. (14) kısıtları filodaki her bir aracın bir uyduyu yalnızca bir kez ziyaret edebileceğini ifade etmektedir. (15) – (17) kısıtları yaylardaki yük akışını ve araç kapasitelerini düzenleyen kısıtlardır. Birinci ve ikinci aşamadaki ürün akışları (18) kısıtları ile sağlanmaktadır. Dağıtım ağındaki her bir müşterinin sadece bir kez ziyaret edilebilmesi (19) kısıtları ile verilmektedir. (20) kısıtları dağıtımın ikinci aşamasında uydu ve müşterilerdeki akışın korunumunu düzenlemektedir. Uydulara yönelik trafiğin koordine edilmesi (21) kısıtları ile sağlanmaktadır. (22)-(23) kısıtları ikinci aşamada filodaki araç sayılarının aşılmamasına yönelik kısıtlardır. İkinci aşamada akışın korunumuna ve araç kapasitelerine yönelik kısıtlar (24)-(25) kısıtlarıdır. (26) kısıtları uydular için ürün akışını koordine etmektedir. Uydulardan yönlendirilen toplam ürün miktarının toplam talebe eşitlenmesi (27) kısıtları ile sağlanmaktadır. Karar değişkinlerinin tanımlamaları ise (28)-(33) kısıtları ile verilmektedir.

4. Uygulama

Bu çalışmada Türkiye’de faaliyet gösteren bir ecza deposunun eczanelere tıbbi malzeme dağıtımını modellenmiştir. Firmanın Ankara ilindeki eczanelere ürün dağıtımını İstanbul’da yer alan merkezi depodan Ankara sınırlarında yer alan ara depolara, buralardan da şehirdeki ilgili eczanelere yönlendirilmesi vasıtasıyla yapılmaktadır. Dağıtım ağında 1 adet merkezi depo, 5 adet uydu (ara depo) ve 15 adet müşteri (eczane) yer almaktadır (bkz. Şekil 3). Görseldeki D merkezi depoyu, S1’den S5’e uydu noktalarını, C1’den C15’e müşteri noktalarını göstermektedir.



Şekil 3. Ecza Deposu İçin Dağıtım Ağının Gösterimi (Google Earth Pro)

Düğüm arasındaki mesafe ve süre verisi Google Earth Pro uygulaması vasıtasıyla elde edilmiştir. Hız verisi mesafenin süreye bölünmesiyle hesaplanmıştır. Mesafe ve hız matrisi sırasıyla Ek 1’de Tablo E1 ve Ek 2’de Tablo E2 ile sunulmaktadır. Eğim verisini elde etmek üzere dağıtım ağında yer alan her bir yay yaklaşık olarak birinci aşamada 10 km’lik; ikinci aşamada ise 2 km’lik uzunluklara ayrılmıştır. Parçaların eğimlerini hesaplamak üzere kullanılan parçanın başlangıç ve bitiş yükseklik verileri yine Google Earth Pro uygulaması vasıtasıyla elde edilmiştir. Araç kapasitelerini aşmayacak şekilde rastgele oluşturulan müşterilere yönelik talep miktarları (kg) C1’den C15’e sırasıyla 1.500, 1.000, 2.400, 1.800, 560, 1200, 2.360, 2.400, 1.300, 1.000, 800, 600, 400, 720 ve 250’dir. Toplam talep 18.320’dir. Müşteri taleplerini merkezi depodan uydulara taşımak üzere dağıtımın birinci kademesinde 2 adet; ikinci kademesinde uydulardan müşterilere taşımak üzere 8 adet araç bulunmaktadır. İkinci kademe araçlara nazaran daha büyük olan birinci kademe araçların her biri 9.668 kg taşıma kapasitesine, 8.332 kg boş ağırlığa ve toplamda 18.000 kg azami yüklü ağırlığa sahiptir. İkinci kademe araçların ise 2.422 kg taşıma kapasitesi, 2578 kg boş ağırlığı ve 5.000 kg azami yüklü ağırlığı bulunmaktadır. Filodaki araçların her biri kendi kademesinde homojendir. Araçlara yönelik teknik özellikler araç broşürlerinden temin edilmiştir. İkinci kademe araçlar S1, S2 ve S3 uydularında ikişer adet, S3 ve S4 uydularında birer adet olmak üzere kullanılabilir. Yakıt tüketimini hesaplamak için kullanılan araçlara yönelik teknik parametre değerleri Tablo 4 ile sunulmaktadır. Gramdan litreye dönüşüm faktörü olan ψ değeri 737 olarak baz alınmıştır.

Tablo 4. Araçların teknik parametre değerleri

Parametre	ϕ	k	N	V_s	μ	η	η_{tf}	g	C_d	ρ	S_1	S_2	C_r
Değer	1	0,2	33	5	44	0,6	0,45	9,81	0,4	1,2	9,98	2,82	0,01

5. Analiz sonuçları

Bu bölümde, iki aşamalı bir dağıtım ağında toplam yakıt tüketimini minimize etmek amacıyla yukarıda bahsedilen veri seti örneği ile ulaşılan analiz sonuçları sunulmaktadır. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin etkisini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen duyarlılık analiz sonuçları paylaşılmaktadır. Optimum sonuçların elde edilmesinde SolverStudio ve Gurobi 10.0.0 programları, Intel (R) i7 işlemci 2.4 GHz hızında 6 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

5.1. Temel durum analizi

Tüm yol boyunca eğimin sabit kalmayacağı gerçeğinin göz önünde bulundurulduğu ve bu bağlamda dağıtım ağındaki her bir yayın parçalara ayrılarak parçalar bazında yakıt tüketiminin dikkate alındığı modele yönelik elde edilen sonuçlar Tablo 5 ile verilmektedir.

Tablo 5. Temel duruma göre elde edilen optimum sonuçlar

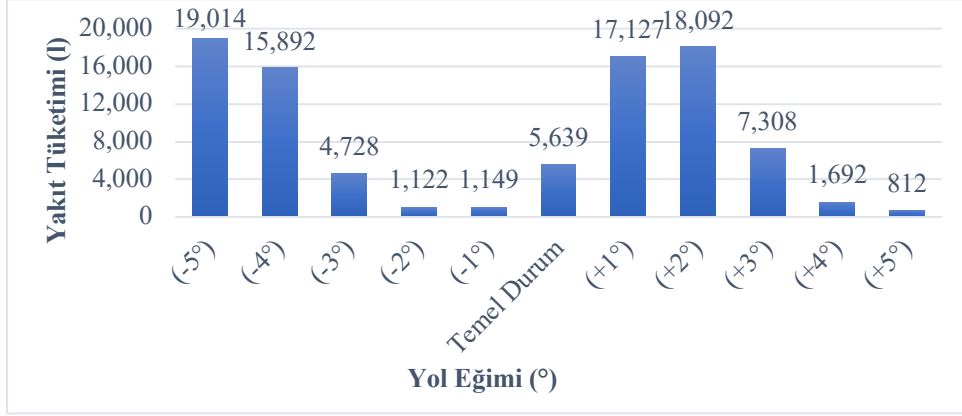
Aşama	Araç No	Araç Rotaları	Toplam Yakıt Tüketimi (l)
1. aşama	1	D-S4-S2-S5-D	5639,36
	2	D-S3-S1-D	
	1	S1-C9-C10-S1	
	2	S1-C11-C12-C15-C14-S1	
2. aşama	3	S2-C3-S2	
	4	S2-C5-C4-S2	
	5	S3-C1-C13-S3	
	6	S3-C8-S3	
	7	S4-C2-C6-S4	
	8	S5-C7-S5	

Sonuçlar incelendiğinde hem birinci hem de ikinci aşamada filoda bulunan tüm araçların kullanıldığı görülmektedir. Birinci aşamada merkezi depodan uydulara, son ziyaret edilen uydudan da tekrar merkezi depoya dönen 2 araç rotalanmaktadır. Dağıtım ağında yer alan tüm uyduların ürünleri nakletmek üzere çözümde yer aldığı gözlemlenmektedir. İkinci aşamada filoda yer alan 8 adet aracın tümü rotasına bir uydu noktasından başlamakta, bir ya da birden fazla müşteriyi ziyaret ettikten sonra yine başladığı uyduya geri dönmektedir. 3, 6 ve 8 numaralı araçlar, talebin ikincil kademe araç kapasitesine oldukça yakın olmasından dolayı, sırasıyla C3, C8 ve C7 müşterilerine olacak şekilde yalnızca tek bir müşteriye ürün dağıtımını yapmaktadırlar. Birinci ve ikinci kademedeki yakıt tüketimi dahil olmak üzere optimal toplam yakıt tüketimi 5.639,36 litredir.

5.2. Yol eğiminin etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, eğim değerlerindeki artış ve azalışın araç rotaları ve toplam yakıt tüketimi üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla her bir parçanın eğim değeri temel duruma göre -5° ve $+5^\circ$ aralığında artırılıp azaltılmıştır. İlgili eğim değerlerine yönelik optimum sonuçlar detaylı bir şekilde Ek 3'te Tablo E3 ile verilmektedir. Ayrıca, yol eğimine bağlı yakıt tüketimi değişimi özetle Şekil 3 ile gösterilmektedir. Yol eğiminde meydana gelen artış ve azalışlar hem yakıt tüketiminde hem de araç rotalarında değişime neden olmaktadır. Her

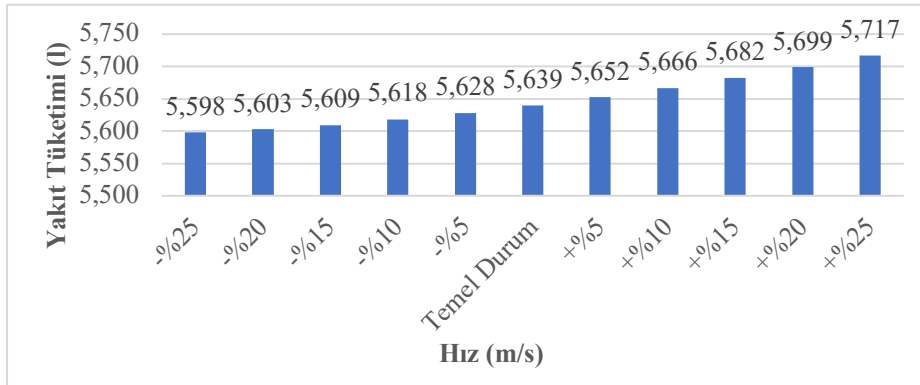
ne kadar yol eğimi arttığında veya azaldığında yakıt tüketiminin de benzer yönde değişeceği öngörülse de sonuçlar bu öngörüyle birebir uyuşmamaktadır. Eğimdeki 2°'ye kadar yapılan artış yakıt tüketiminde de görünür bir şekilde artışa sebep olmaktadır. 3° ve sonrasındaki eğim artışında yakıt tüketiminde azalış gözlemlenmektedir. Öte yandan, eğimdeki 2°'ye kadar yapılan azalışta yakıt tüketiminde azalış gözlemlenmekte iken eğim azalmaya devam ettikçe yakıt tüketimi artışa geçmektedir. Benzer sonuçların elde edildiği Wang ve diğ. (2015)'in çalışmasında bu durum şu şekilde açıklanmaktadır: Eğim artmaya devam ettikçe sürücü sabit bir seyir hızını korumak için gaz vermeye devam etmektedir. Bu durumda, yakıt tamamen yanmakta ve yüksek hızın ataleti aracı itmektedir. Bunun sonucunda da tüketilen yakıt azalmaktadır. Eğim azaldıkça sürücünün gaz verme ihtiyacı olmadığından yakıt tüketimi azalmaktadır. Eğim azalmaya devam ettikçe ise araç kendiliğinden hızlanmaya başlamakta ve kaymaktadır. Bunun sonucunda, sürücünün frenleme yapması ve hızdaki dalgalanmalar yakıt tüketiminde artışa neden olmaktadır.



Şekil 4. Yol eğimine bağlı yakıt tüketimi değişimi

5.3. Araç hızının etkisi

Araç hızındaki değişimin yakıt tüketimine etkisinin olup olmadığının veya nasıl etki ettiğinin araştırılması amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Hızdaki değişimin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi, her bir yay üzerindeki hız parametresinin (h_{ij} ve $h'_{c,b}$) temel durumdaki hıza göre -%25 ve +%25 aralığında değiştirilmesi yoluyla incelenmiştir. Detaylı sonuçlar Ek 4'te Tablo E4 ile verilmektedir. Hıza bağlı yakıt tüketimi değişimi grafiğinin gösterildiği Şekil 5'ten de görüleceği üzere, aracın hızı yakıt tüketimini etkileyen önemli etkenlerden biridir. Araç hızında gerçekleşen artış/azalış benzer yönde yakıt tüketiminde artış/azalışa sebep olmaktadır. Temel duruma göre hızdaki %5'ten %25'e azalış, yakıt tüketiminde sırasıyla %0,20, %0,38, %0,53, %0,65 ve %0,74 oranında azalış; hızdaki %5'ten %25'e artış ise sırasıyla %0,23, %0,48, %0,76, %1,05 ve %1,37 oranında artış yaratmaktadır. Bu bağlamda, daha düşük hızın daha az yakıt tüketimi, buna paralel olarak daha az emisyon salınımı sağladığı ve sürdürülebilirliğe olumlu yönde katkı sağladığı söylenebilmektedir. Böylece, sürücülerin olabildiğince yavaş araç kullanmaları ve agresif sürüş davranışlarından kaçınmaları, enerji verimliliği açısından ve dolayısıyla sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaları açısından önem arz etmektedir.



Şekil 5. Hıza bağlı yakıt tüketimi değişimi

6. Sonuç ve öneriler

Gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya bırakma amacı olan sürdürülebilirlik kavramının artan önemi, kaynakların tükenmesine ve çevresel kirliliğe sebebiyet veren taşımacılıkta yakıt tüketimi ve/veya emisyon azaltımına yönelik kararların verilmesini ve uygulanmasını gerekli kılmaktadır. İlgili hesaplamaların olabildiğince gerçeği yansıtacak şekilde yapılması, uygun rotalama kararlarının verilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Yakıt tüketiminin ve/veya sera gazı emisyonlarının en aza indirilmesine yönelik rotalama çalışmalarında, yakıt tüketimi ve emisyon salınımını etkileyen önemli unsurlardan olan yol eğiminin yeterince dikkate alınmadığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, üzerinde durulan Y-2A-ARP'de ekolojik rotaların oluşturulması amacıyla, yakıt tüketimi hesaplamasında yol eğimi detaylı ve olabildiğince gerçeğe yakınlaştıracak şekilde dikkate alınmaktadır. Söz konusu amaçla, Türkiye'de faaliyet gösteren bir ecza deposunun dağıtım ağındaki tüm yollar (yaylar) belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış ve her bir parçaya yönelik hesaplanan bu eğim değerleri ile araçların toplam yakıt tüketimi elde edilmiştir. Eğim ve hız faktörlerindeki değişimin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğimdeki değişimin etkisine yönelik inceleme her bir parçanın eğim değerinin temel duruma göre -5° ve $+5^\circ$ aralığında; hızdaki değişimin etkisine yönelik araştırma ise her bir yola ait hız parametresinin temel durumdaki hıza göre $-%25$ ve $+%25$ aralığında artırılıp azaltılması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki analiz türünde de, temel duruma göre, optimal rotalarda ve toplam yakıt tüketiminde değişiklikler gözlemlenmiştir. Sanılanın aksine, eğimdeki artış araçların toplam yakıt tüketimini bir seviyeye kadar artırmış ($+2^\circ$), bu seviyeden sonra giderek azalış gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, eğimdeki azalış toplam yakıt tüketimini bir seviyeye kadar azaltmış (-2°), bu seviyeden sonra giderek artışa sebep olmuştur. Benzer sonuçların elde edildiği literatürdeki çalışmada söz konusu durum şu şekilde açıklanmaktadır: Eğimin artması ile sürücünün sabit seyir hızını korumak amacıyla gaz vermeye devam etmesi, yakıtın tamamen yanmasını sağlamakta ve yüksek hızın ataleti aracı itmektedir. Söz konusu durum her ne kadar başlangıçta yakıt tüketimini artırsa da sonrasında yakıt tüketimi azalışa geçmektedir. Ters durumda ise eğimin azalması ile sürücünün gaz verme ihtiyacı giderek ortadan kalkmakta ve yakıt tüketimi azalmaktadır. Ancak, eğimin azalmaya devam etmesi ile aracın kendiliğinden hızlanması/kayması, sürücünün frenleme yapmasına ve hızda dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu da yakıt tüketimini artırmaktadır. Öte yandan, yapılan hesaplamalar sonucunda, hızla bağlı yakıt tüketimi değişiminin hızdaki değişimle paralel olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer bir deyişle, yakıt tüketimi, hızdaki artışla artmış, hızdaki düşüşle azalmıştır. Hızın yakıt tüketimi, emisyon salınımı ve dolayısıyla enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda, sürücülerin olabildiğince yavaş araç kullanmaları ve agresif sürüş davranışlarından kaçınmaları gerektiği söylenebilmektedir.

Sonuç olarak, yol eğimi ve araç hızı, yakıt tüketimi ve dolayısıyla emisyon salınımını etkileyen önemli faktörlerdendir. Sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkıda bulunmak için bu faktörlerin dikkate alınarak rotalama kararlarının verilmesi gerekmektedir.

Araştırmacılar bu çalışmanın devamı olarak, daha büyük bir dağıtım ağında yakıt tüketimi hesaplamasını gerçeğe yakınlaştırmak adına eğimi daha küçük parçalar şeklinde dikkate alarak katkıda bulunabilirler.

Araştırmacıların katkısı

Araştırmanın tüm süreçleri Ergül Kısa Toğrul tarafından yürütülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Alinaghian, M., & Naderipour, M. (2016). A novel comprehensive macroscopic model for time-dependent vehicle routing problem with multi-alternative graph to reduce fuel consumption: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 210-222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.029>
- Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and ‘grey zone’ customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940-958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- Asghari, M., & Al-e-hashem, S. M. J. M. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 231, 107899. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899>
- Babae Tirkolae, E., Hadian, S., & Golpira, H. (2019). A novel multi-objective model for two-echelon green routing problem of perishable products with intermediate depots. *Journal of Industrial Engineering And Management Studies*, 6(2), 196-213. doi: <https://doi.org/10.22116/JIEMS.2019.94158>
- Babagolzadeh, M., Shrestha, A., Abbasi, B., Zhang, S., Atefi, R., & Woodhead, A. (2019). Sustainable open vehicle routing with release-time and time-window: A two-echelon distribution system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 571-576. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.219>
- Baldacci, R., Mingozzi, A., Roberti, R., & Calvo, R. W. (2013). An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Operations Research*, 61(2), 298-314. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1153>
- Barth, M., Younglove, T., & Scora, G. (2005). Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model. *UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology*. doi: <https://escholarship.org/uc/item/67f0v3zf>
- Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2016). A large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 76, 208-225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.014>
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2019). The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 103, 198-210. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.005>
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transportation Science*, 43(4), 432-454. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Cuda, R., Guastaroba, G., & Speranza, M. G. (2015). A survey on two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 55, 185-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>
- Dellaert, N., Dashty Saridarq, F., Van Woensel, T., & Crainic, T. G. (2016). Branch & price based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows. Technical report, CIRRELT-2016-45, Montreal, Kanada. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0844>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal Of Operational Research*, 237(3), 775-793. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Doolan, R., & Muntean, G. M. (2016). EcoTrec—A novel VANET-based approach to reducing vehicle emissions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(3), 608-620. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2585925>
- Dündar, H., Soysal, M., Ömürçünülşen, M., & Kanellopoulos, A. (2022). A green dynamic TSP with detailed road gradient dependent fuel consumption estimation. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108024>
- Eitzen, H., Lopez-Pires, F., Baran, B., Sandoya, F., & Chicaiza, J. L. (2017). A multi-objective two-echelon vehicle routing problem. An urban goods movement approach for smart city logistics. *XLIII Latin American Computer Conference (CLEI)*, 4-8 Eylül, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1109/CLEI.2017.8226454>
- Erdelic, T., & Caric, T. (2019). A survey on the electric vehicle routing problem: Variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 5075671. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5075671>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 48(1), 100-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Esmacili, M., & Sahraeian, R. (2019). Comparing two-echelon and single-echelon multi-objective capacitated vehicle routing problems. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 4(1), 1-16. Retrieved from https://jqepo.shahed.ac.ir/article_893_131f8d60f21f37eb1d6c28f9f1c4c0e6.pdf

- Fan, H., Zhang, Y., Tian, P., Lv, Y., & Fan, H. (2021). Time-dependent multi-depot green vehicle routing problem with time windows considering temporal-spatial distance. *Computers & Operations Research*, 129, 105211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105211>
- Fan, P., Song, G., Zhu, Z., Wu, Y., Zhai, Z., & Yu, L. (2022). Road grade estimation based on Large-scale fuel consumption data of connected vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 106, 103262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103262>
- Gonzalez-Feliu, J. (2008). *Models and methods for the city logistics: The two-echelon capacitated vehicle routing problem* (Doctoral dissertation). Politecnico di Torino, Turin, Italy. Retrieved from <https://theses.hal.science/tel-00844731/>
- Grangier, P., Gendreau, M., Lehuède, F., & Rousseau, L. M. (2016). An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 80-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.040>
- Hooker, J. N. (1988). Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transportation Research Part A: General*, 22(3), 183-201. doi:[https://doi.org/10.1016/0191-2607\(88\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0191-2607(88)90036-2)
- Jepsen, M., Spoorendonk, S., & Ropke, S. (2013). A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, 47(1), 23-37. doi:<https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0399>
- Jie, W., Yang, J., Zhang, M., & Huang, Y. (2019). The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.002>
- Kamal, M. A. S., Mukai, M., Murata, J., & Kawabe, T. (2011). Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3), 783-794. doi:<https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2112648>
- Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2019). Multi-depot two-echelon fuel minimizing routing problem with heterogeneous fleets: model and heuristic. *Networks and Spatial Economics*, 19, 969-1005. doi:<https://doi.org/10.1007/s11067-018-9437-7>
- Kang, L., Shen, H., & Li, Z. (2019). Road gradient estimation using smartphones: Towards accurate estimation on fuel consumption and air pollution emission on roads. *IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Dallas, TX, Amerika, Temmuz, 768-777. doi:<https://doi.org/10.1109/ICDCS.2019.00081>
- Lai, D., Costa, Y., Demir, E., Florio, A., & Van Woensel, T. (2021). The pollution-routing problem with speed optimization and uneven topography. arXiv preprint arXiv:2105.09229. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09229>
- Li, H., Yuan, J., Lv, T., & Chang, X. (2016). The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems considering carbon dioxide emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 231-245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.002>
- Li, H., Liu, Y., Jian, X., & Lu, Y. (2018). The two-echelon distribution system considering the real-time transshipment capacity varying. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 239-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.015>
- Liu, R., Tao, Y., Hu, Q., & Xie, X. (2017). Simulation-based optimisation approach for the stochastic two-echelon logistics problem. *International Journal of Production Research*, 55(1), 187-201. doi:<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201221>
- Liu, D., Deng, Z., Mao, X., Yang, Y., & Kaisar, E. I. (2020). Two-echelon vehicle-routing problem: optimization of autonomous delivery vehicle-assisted E-grocery distribution. *IEEE Access*, 8, 108705-108719. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001753>
- Liu, L., & Liao, W. (2021). Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective. *Waste Management*, 120, 400-414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.045>
- Liu, D., Yang, H., Mao, X., Antonoglou, V., & Kaisar, E. I. (2023). New mobility-assist e-grocery delivery network: a load-dependent two-echelon vehicle routing problem with mixed vehicles. *Transportation Research Record*, 2677(1), 294-310. doi: <https://doi.org/10.1177/036119812210992>

- Pamucar, D., Gigovic, L., Cirovic, G., & Regodic, M. (2016). Transport spatial model for the definition of green routes for city logistics centers. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 72-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.09.002>
- Paul, A., Kumar, R. S., Rout, C., & Goswami, A. (2021). A bi-objective two-echelon pollution routing problem with simultaneous pickup and delivery under multiple time windows constraint. *Opsearch*, 1-32. doi:<https://doi.org/10.1007/s12597-020-00481-6>
- Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2011). The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. *Transportation Science*, 45(3), 364-380. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0368>
- Perboli, G., Tadei, R., & Fadda, E. (2018). New valid inequalities for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.01.009>
- Rao, W., Liu, F., & Wang, S. (2016). An efficient two-objective hybrid local search algorithm for solving the fuel consumption vehicle routing problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2016, 3713918. doi:<https://doi.org/10.1155/2016/3713918>
- Reinaldi, M., Redi, A. A. N. P., Prakoso, D. F., Widodo, A. W., Wibisono, M. R., Supranartha, A., Liperda, R. I., Nadlifatin, R., Prasetyo, Y. T., & Sakti, S. (2021). Solving the two echelon vehicle routing problem using simulated annealing algorithm considering drop box facilities and emission cost: a case study of reverse logistics application in Indonesia. *Algorithms*, 14(9), 259. doi: <https://doi.org/10.3390/a14090259>
- Schröder, M., & Cabral, P. (2019). Eco-friendly 3D-Routing: A GIS based 3D-Routing-Model to estimate and reduce CO2-emissions of distribution transports. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 40-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.08.002>
- Scora, G., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2015). Value of eco-friendly route choice for heavy-duty trucks. *Research in Transportation Economics*, 52, 3-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.002>
- Sluijk, N., Florio, A. M., Kinable, J., Dellaert, N., & Van Woensel, T. (2023). Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 304, 865-886. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.022>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.016>
- Soysal, M., Çimen, M., & Demir, E. (2018). On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1664-1678. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.040>
- Sun, J., & Wang, R. (baskıda). Multi-objective optimization of a sustainable two echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery in construction projects. *Journal of Engineering Research*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.033>
- Web of Science Core Collection. Erişim adresi: <https://www.webofscience.com>, Erişim tarihi: Nisan 2023.
- Wang, Y., Du, X., Yu, H., Huang, J., & Li, Y. (2015). Impacts of road grade on fuel consumption of light vehicles by use of Google Earth DEM. *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Xi'an, Çin, Eylül, 360-363. doi:<https://doi.org/10.1109/CyberC.2015.73>
- Wang, K., Lan, S., & Zhao, Y. (2017). A genetic-algorithm-based approach to the two-echelon capacitated vehicle routing problem with stochastic demands in logistics service. *Journal of the Operational Research Society*, 68, 1409-1421. doi:<https://doi.org/10.1057/s41274-016-0170-7>
- Wang, Y., Zhang, S., Assogba, K., Fan, J., Xu, M., & Wang, Y. (2018). Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization. *Journal of Cleaner Production*, 197, 443-461. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.208>
- Wang, Z., & Wen, P. (2020). Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window. *Sustainability*, 12(5), 1967. doi:<https://doi.org/10.3390/su12051967>
- Wang, Y., Yuan, Y., Guan, X., Xu, M., Wang, L., Wang, H., & Liu, Y. (2020). Collaborative two-echelon multicenter vehicle routing optimization based on state-space-time network representation. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120590>

Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D., & Wang, X. (2018). A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 765-778. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011>

Ek 1

Tablo E1. Düğümler arasındaki mesafe matrisi (m)

Düğümler	D	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
D	-	418.000	420.000	412.000	401.000	415.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	424.000	-	10.200	13.500	28.200	5.100	18.900	23.200	26.000	29.900	23.000	18.800	14.800	12.200	10.300	20.800	9.800	4.300	5.600	9.400	9.600
S2	425.000	10.000	-	17.400	27.900	10.900	20.200	23.700	20.900	20.700	14.400	15.300	15.300	16.800	6.100	15.800	4.300	11.300	14.600	19.200	23.100
S3	419.000	12.300	17.400	-	32.800	7.300	15.600	30.900	29.100	34.800	30.900	23.200	17.200	4.900	13.000	24.000	20.200	17.100	7.900	11.000	18.000
S4	388.000	27.600	26.300	30.700	-	25.000	15.800	5.400	16.800	22.500	27.600	15.600	14.500	26.700	23.200	24.800	35.100	32.200	28.800	33.400	38.700
S5	421.000	5.900	11.200	7.800	25.100	-	14.800	19.500	23.000	28.700	24.800	17.100	11.100	8.100	7.300	17.900	13.500	9.800	4.300	9.600	14.900
C1	-	18.800	20.000	15.600	17.200	15.200	-	11.600	20.000	25.700	26.100	14.100	6.800	10.000	16.300	23.300	27.100	23.400	21.200	29.600	31.100
C2	-	23.000	22.300	25.100	5.600	19.700	8.500	-	18.500	24.000	25.000	13.000	8.900	24.100	19.600	22.500	29.500	27.600	23.400	28.000	33.300
C3	-	25.400	19.800	29.300	15.500	22.800	19.500	15.000	-	6.000	12.700	7.100	15.200	27.500	16.700	12.000	22.100	28.000	26.500	31.100	36.400
C4	-	28.600	22.300	32.000	21.700	24.700	22.300	21.100	6.400	-	11.000	10.200	18.000	29.800	19.400	12.900	20.000	26.600	29.200	33.800	35.100
C5	-	22.700	16.300	31.100	28.800	24.500	25.100	26.200	12.900	11.500	-	12.900	20.700	31.500	20.200	9.200	14.000	20.600	28.300	32.800	29.000
C6	-	18.800	13.900	24.100	14.700	18.200	13.200	14.200	6.300	9.600	12.100	-	8.900	21.400	10.800	9.000	19.100	24.700	21.300	25.800	28.800
C7	-	15.500	14.800	17.600	14.400	12.200	6.400	8.900	14.500	18.100	20.600	8.600	-	12.600	12.100	18.100	22.000	20.100	15.900	20.500	25.800
C8	-	12.500	16.200	5.100	27.100	8.200	10.300	21.600	26.700	33.400	30.900	21.100	12.400	-	12.200	22.600	24.600	16.400	10.000	14.800	20.100
C9	-	7.400	5.100	14.400	23.900	7.900	16.200	19.900	16.900	22.600	18.600	11.300	11.500	13.700	-	11.800	11.300	11.700	11.600	16.200	21.500
C10	-	20.100	14.500	24.000	26.700	17.500	23.000	24.100	12.700	14.300	9.300	10.100	18.100	22.700	11.400	-	16.300	22.800	21.200	25.800	31.100
C11	-	9.600	4.600	23.700	34.300	13.700	26.100	29.600	22.500	20.200	14.000	19.000	21.200	24.800	10.700	18.400	-	7.500	20.900	20.400	16.000
C12	-	4.500	10.300	16.600	32.400	9.300	22.700	29.800	34.900	26.800	20.600	29.300	19.100	16.500	10.500	25.000	7.400	-	8.600	11.800	10.400
C13	-	5.600	14.700	8.100	29.400	4.100	18.100	23.400	26.600	32.300	28.400	20.700	15.000	9.600	10.800	21.400	16.000	8.700	-	6.000	11.400
C14	-	10.200	18.800	12.000	33.000	9.700	22.700	27.400	30.600	36.300	32.300	24.700	19.000	14.100	14.900	25.500	20.200	15.600	5.300	-	9.000
C15	-	10.500	21.100	17.700	38.600	15.300	28.300	33.000	36.200	35.500	29.300	30.300	24.600	19.700	20.500	31.100	16.100	11.500	10.900	9.200	-

Ek 2

Tablo E2. Dügümler Arasındaki Hız Matrisi (m/s)

Dügümler	D	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
D	-	26,39	26,62	26,61	27,06	26,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	26,77	-	8,10	9,78	13,06	7,08	10,16	14,87	14,94	13,47	11,27	12,05	11,75	7,82	10,10	12,38	7,42	7,96	6,67	8,25	8,42
S2	27,14	8,77	-	12,61	16,03	13,97	10,86	17,17	16,59	12,32	12,00	15,00	14,17	11,20	7,82	10,97	7,17	9,42	14,31	14,55	13,28
S3	27,39	10,25	12,61	-	15,62	10,14	10,00	18,39	15,65	15,26	13,92	14,32	10,62	6,81	12,04	13,33	9,90	9,19	9,40	7,97	13,64
S4	26,18	13,53	13,70	15,51	-	13,89	10,97	10,00	16,47	15,63	12,43	11,82	12,08	15,34	13,33	13,33	16,25	12,48	15,48	13,58	14,66
S5	27,30	7,56	12,44	10,00	15,49	-	10,72	17,11	16,67	15,94	14,76	15,00	13,21	8,44	12,17	14,21	9,00	8,17	8,96	13,33	15,52
C1	-	10,80	13,33	9,63	13,03	10,13	-	11,37	13,33	12,24	11,45	11,19	8,72	8,77	9,70	13,39	14,57	10,26	13,09	15,91	14,81
C2	-	16,67	17,70	16,73	11,67	17,28	8,85	-	20,56	18,18	13,44	16,67	13,48	18,26	16,33	15,00	18,21	13,94	17,73	17,28	17,90
C3	-	15,68	17,37	15,75	16,15	16,52	13,54	20,83	-	11,11	10,58	8,45	15,83	15,28	16,37	11,11	12,70	12,96	16,99	17,28	17,84
C4	-	14,02	14,29	13,68	14,47	14,20	11,26	17,58	10,67	-	10,78	10,63	12,00	13,07	13,47	11,94	12,35	13,04	14,31	14,82	13,60
C5	-	12,20	12,94	14,01	13,33	14,58	11,31	13,65	10,24	10,65	-	10,24	11,90	13,13	14,03	9,02	12,28	12,72	15,22	15,19	13,81
C6	-	14,24	14,48	14,35	12,89	16,85	11,00	14,79	8,75	11,43	11,20	-	12,36	13,72	12,86	10,71	12,73	13,28	16,14	15,93	16,00
C7	-	12,92	14,51	11,73	13,33	13,56	8,21	14,83	15,10	13,12	11,84	11,94	-	10,00	11,86	14,37	15,28	11,55	13,95	14,86	15,93
C8	-	9,47	11,25	6,54	16,13	9,11	9,54	16,36	14,83	15,05	13,21	13,53	10,33	-	9,68	12,99	13,23	8,82	9,80	11,21	12,88
C9	-	9,49	9,44	12,00	15,93	11,97	11,74	16,58	16,57	15,69	14,09	14,49	13,69	10,38	-	12,29	13,45	9,29	13,81	14,21	15,58
C10	-	13,40	14,22	13,79	15,89	14,58	13,69	16,74	11,14	11,92	8,61	10,52	14,37	13,51	13,57	-	10,87	11,52	15,36	15,36	16,20
C11	-	8,00	6,97	14,63	15,88	12,69	13,59	15,91	14,42	12,95	12,96	13,77	15,36	13,33	12,74	13,33	-	9,62	16,59	13,60	12,70
C12	-	7,50	9,54	9,22	13,85	7,38	9,96	14,19	19,39	13,14	13,21	18,78	10,98	8,09	9,72	13,89	11,21	-	6,83	10,35	11,56
C13	-	6,67	11,14	9,00	15,81	7,59	10,77	14,44	16,42	11,22	11,83	14,38	11,90	8,42	10,59	12,30	10,26	6,90	-	12,50	15,83
C14	-	8,10	14,24	11,76	16,18	14,70	11,13	16,91	17,59	13,15	14,17	16,47	15,08	11,19	14,61	15,18	14,03	13,68	11,04	-	13,64
C15	-	8,33	13,02	13,41	15,32	15,94	13,48	17,19	17,24	14,09	13,95	16,83	15,77	12,63	15,53	12,96	12,78	11,98	13,97	13,94	-

Ek 3

Tablo E3. Eğim değerlerine göre optimal çözüm sonuçları

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(-5°)	1. aşama	D-S2-S5-S3-D	19.013,93	237,16
		D-S4-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C12-C15-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(-4°)	1. aşama	D-S3-S5-S4-D	15.892,43	181,81
		D-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C15-C12-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C4-C5-S2		
		S3-C7-S3		
		S3-C8-S4		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C9-C10-S5		
(-3°)	1. aşama	D-S3-S2-D	4.727,99	-16,16
		D-S5-S1-S4-D		
		S1-C1-C11-S1		
		S1-C12-C13-C14-C15-S1		
		S2-C5-C4-S2		
	2. aşama	S2-C9-C10-S2		
		S3-C3-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
(-2°)	1. aşama	D-S2-S3-D	1.122,04	-80,10
		D-S4-S1-S5-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C7-S1		
		S2-C5-C10-C11-S2		
	2. aşama	S2-C12-C1-S2		
		S3-C2-C6-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C9-C14-C15-S5		

Tablo E3'ün devamı

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(-1°)	1. aşama	D-S1-S2-D	1.149,29	-79,62
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C7-S1		
		S2-C1-C12-S2		
	2. aşama	S2-C11-C10-C5-S2		
		S3-C2-C9-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C6-C15-C14-S5		
(±1°)	1. aşama	D-S3-S5-S1-D	17.126,98	203,70
		D-S4-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C12-C15-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(±2°)	1. aşama	D-S2-S1-D	18.091,75	220,81
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C15-C12-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(±3°)	1. aşama	D-S3-S2-D	7.307,66	29,58
		D-S5-S1-S4-D		
		S1-C1-C11-S1		
		S1-C12-C13-C14-C15-S1		
		S2-C5-C4-S2		
	2. aşama	S2-C9-C10-S2		
		S3-C7-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C3-S5		

Tablo E3'ün devamı

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(+4°)	1. aşama	D-S1-S3-D	1.691,59	-70
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C7-S1		
		S1-C9-C14-C15-S1		
		S2-C2-C6-S2		
	2. aşama	S2-C5-C10-C11-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C12-C1-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C3-S5		
(+5°)	1. aşama	D-S1-S2-D	812,37	-85,59
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C4-C13-S1		
		S2-C1-C12-S2		
	2. aşama	S2-C7-S2		
		S3-C2-C9-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C5-C10-C11-S4		
		S5-C6-C14-C15-S5		

* Değişim (%), temel duruma göre yakıt tüketimindeki yüzdesel artış/azalışı belirtmektedir.

Ek 4

Tablo E4. Hız değerlerine göre optimal çözüm sonuçları

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)				
-%25	1. aşama	D-S3-S1-D	5.597,66	-0,74				
		D-S4-S2-S5-D						
		S1-C9-C10-S1						
		S1-C11-C12-C15-C14-S1						
		S2-C3-S2						
	2. aşama	S2-C5-C4-S2						
		S3-C1-C13-S3						
		S3-C8-S3						
		S4-C2-C6-S4						
		S5-C7-S5						
		-%20			1. aşama	D-S3-S1-D	5.602,70	-0,65
						D-S4-S2-S5-D		
						S1-C9-C10-S1		
						S1-C11-C12-C15-C14-S1		
S2-C3-S2								
2. aşama	S2-C5-C4-S2							
	S3-C1-C13-S3							
	S3-C8-S3							
	S4-C2-C6-S4							
	S5-C7-S5							
	-%15		1. aşama	D-S3-S1-D	5.609,45	-0,53		
				D-S4-S2-S5-D				
				S1-C9-C10-S1				
				S1-C11-C12-C15-C14-S1				
S2-C3-S2								
2. aşama		S2-C5-C4-S2						
		S3-C1-C13-S3						
		S3-C8-S3						
		S4-C2-C6-S4						
		S5-C7-S5						
		-%10	1. aşama	D-S3-S1-D			5.617,92	-0,38
				D-S4-S2-S5-D				
				S1-C9-C10-S1				
				S1-C11-C12-C15-C14-S1				
S2-C3-S2								
2. aşama	S2-C5-C4-S2							
	S3-C1-C13-S3							
	S3-C8-S3							
	S4-C2-C6-S4							
	S5-C7-S5							

Tablo E4'ün devamı

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
-%5	1. aşama	D-S3-S1-D	5.627,88	-0,20
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%5	1. aşama	D-S3-S1-D	5.652,14	0,23
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%10	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.666,43	0,48
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%15	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.682,06	0,76
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		

Tablo E4'ün devamı

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
+%20	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.698,85	1,05
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%25	1. aşama	D-S3-S1-D	5.716,75	1,37
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		

* Değişim (%), temel duruma göre yakıt tüketimindeki yüzdesel artış/azalışı belirtmektedir.