

- ARAŞTIRMA MAKALESİ -

## İKİ KADEMELİ LOKASYON-ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK MATEMATİKSEL MODEL VE KAMUDA BİR UYGULAMA\*

Erkan ASLANTAŞ<sup>1</sup> & Yasemin YAVUZ<sup>2</sup>

Öz

*Lokasyon-rotalama problemi (LRP), stratejik ve taktik düzeydeki lojistik planlama kararlarına ilişkin en önemli optimizasyon problemlerinin başında gelmektedir. Bu çalışmada, ülkemizdeki bir kamu kurumunda karşılaşılan gerçek bir taşıma ağının özelliklerinden yola çıkılarak iki kademeli özgün bir LRP tanımlanmıştır. Çalışmanın amacı, iki kademeli LRP’de lokasyon ve rotalama kararlarını eş zamanlı olarak ele alan bütünleşik bir çözüm yaklaşımı aracılığıyla taşıma maliyetlerini en aza indirmeye yönelik bir taşıma ağının tasarlanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, iki kademeli LRP’nin bütünleşik bir şekilde çözümü için tamsayı bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Çalışmada incelenen problemin özelliklerine uygun olarak değişken kapalı uçlu araç rotalama tanımı yapılmıştır. Önerilen modelde, taşıma ağında yer alacak aktarma merkezi (AKM) sayısı ve lokasyonlarının belirlenmesine, talep merkezlerinin bu AKM’lere atanmasına ve her bir AKM için değişken kapalı uçlu araç rotalarının oluşturulmasına çalışılmıştır. Modelde birinci öncelikli amaç olarak taşıma ağı boyunca katedilen toplam mesafenin, ikinci öncelikli amaç olarak ise kullanılan toplam araç sayısının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen model, kamu kurumunda karşılaşılan taşıma problemine uygulanmış ve modelin çözümü sonucunda oluşturulan taşıma ağı mevcut ağ ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen çözüm sonuçları, önerilen taşıma ağı yoluyla sistem performansında önemli düzeyde iyileştirmelerin sağlanabileceğini göstermiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** *İki Kademeli Lokasyon-Rotalama Problemi, Tesis Lokasyon Problemi, Araç Rotalama Problemi, Matematiksel Model.*

**JEL Kodları:** *M11, C44, C61.*

**Başvuru:** *21.05.2021*      **Kabul:** *01.11.2021*

\* Bu makale, Erkan ASLANTAŞ’ın Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalında Doç. Dr. Yasemin YAVUZ’un danışmanlığında tamamladığı “Yalın Taşıma Ağı Tasarımı ve Kamuda Bir Uygulama” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

<sup>1</sup> Araştırmacı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kayseri İl Müdürlüğü, Kayseri, Türkiye, [erkan.aslantas@sanayi.gov.tr](mailto:erkan.aslantas@sanayi.gov.tr), ORCID No: 0000-0001-5798-538X

<sup>2</sup> Sorumlu Yazar, Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Kayseri, Türkiye, [yaseminy@erciyes.edu.tr](mailto:yaseminy@erciyes.edu.tr), ORCID No: 0000-0003-2285-0121

## INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL FOR TWO-ECHELON LOCATION-ROUTING PROBLEM AND APPLICATION IN A PUBLIC INSTITUTION<sup>3</sup>

### **Abstract**

The location-routing problem (LRP) is among the most important optimization problems related to logistics planning decisions at the strategic and tactical levels. In this paper, we have introduced an original two-echelon LRP in line with the characteristics of a real transportation network encountered in a public institution in Turkey. The aim of the study is to design a transportation network to minimize transportation costs through an integrated solution approach that simultaneously considers location and routing decisions in the two-echelon LRP. For this purpose, we have developed an integer linear programming model for integrated solution of the two-echelon LRP. The variable closed vehicle routing has been defined in accordance with the characteristics of the addressed problem. The proposed model determines both the number and location of transfer centers (TC) to be included into the transportation network, assigns the demand centers to these TCs, and generates variable closed vehicle routes for each one of them. In the model, the total distance traveled along the transportation network is minimized as the primary objective, and the total number of used vehicles as the secondary one. The developed model has been implemented into the transportation problem of the public institution and the transportation network generated by the solution of the model has been compared with the existing network. The obtained results show that significant improvements can be achieved through proposed transportation network design.

**Keywords:** Two-Echelon Location-Routing Problem, Facility Location Problem, Vehicle Routing Problem, Mathematical Model.

**JEL Codes:** M11, C44, C61.

“Bu çalışma Araştırma ve Yayın Etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.”

### **1. GİRİŞ**

Lojistik sistemlerin tasarımı ve planlanmasında, sistem boyunca katma değer yaratmayan maliyetlerin azaltılması ve verimliliğin sağlanması kritik öneme sahip amaçlar arasında yer alır. Üretilen nihai ürün ve hizmetlere değer katmaksızın maliyetleri arttıran unsurlar işletmelerde çok yüksek boyutlara ulaşabilmektedir. Hines ve Taylor (2000: 10), bir üretim veya lojistik sistemindeki süreçlerin yaklaşık %5’ini katma değer sağlayan, %35’ini değer sağlamayan ancak yapılması gerekli olan, %60’ını ise katma değer sağlamayan faaliyetlerin oluşturduğunu belirtmiştir. Lojistik sistemlerde taşıma maliyetleri genellikle en yüksek maliyet kalemlerinden birini oluşturur. Sistem boyunca tüm akışların etkili bir şekilde planlanması, değer

---

<sup>3</sup> The Extended English Summary is located at the end of the article.

katmayan taşıma faaliyetlerinin ortadan kaldırılması ve kaynakların verimli bir şekilde kullanılması yoluyla lojistik maliyetler önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Stratejik düzeydeki lojistik planlama kararları ağ yapısının tasarlanması ile ilgili olup tesis sayısı ve lokasyonlarının belirlenmesini içerir. Müşterilerin tesislere tahsis edilmesi ve ağ boyunca ürün akışının sağlanmasına ilişkin rotaların oluşturulması ise taktik düzeydeki kararlar arasındadır (Cuda vd., 2015: 185). Dolayısıyla, tesis lokasyon problemi (TLP) ile araç rotalama problemi (ARP) stratejik/taktik düzeydeki lojistik planlama kararlarına yönelik en önemli optimizasyon problemlerinin başında gelmektedir. Literatürde lokasyon-rotalama problemi (LRP) olarak adlandırılan optimizasyon probleminde ise lojistik ağ tasarımı sürecinde lokasyon ve rotalama kararları bir arada ele alınmaktadır. LRP ile ilgili çalışmalarda, lokasyon ve rotalama problemlerinin ardışık bir şekilde çözüldüğü hiyerarşik yaklaşımların ağırlıkta olduğu görülmektedir. Ancak, tesis lokasyonlarının ardından araç rotalarının belirlenmesine dayanan hiyerarşik çözüm yaklaşımları alt-optimal çözümlerle sonuçlanabilmektedir. Lokasyon ve rotalama kararlarının birbiriyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle, lojistik ağ tasarımı her iki problemin bütünlük bir şekilde ele alınmasının çözüm kalitesi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Literatürde hiyerarşik çözüm yaklaşımlarının yanı sıra, LRP ile ilgili mevcut çalışmalar daha çok tek kademeli LRP üzerinde yoğunlaşmıştır. Tek kademeli LRP'nin genişletilmiş bir uzantısı olan iki kademeli LRP uygulamada sıklıkla rastlanan bir problem türüdür. İki kademeli LRP'de taşıma faaliyetleri, başlangıç ve varış noktaları arasında bir transfer noktası rolü üstlenen ara tesisler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, ülkemizdeki bir kamu kurumunda karşılaşılan gerçek bir taşıma ağının özelliklerinden yola çıkılarak iki kademeli özgün bir LRP tanımlanmıştır. Çalışmanın amacı, iki kademeli LRP'de lokasyon ve rotalama kararlarını eş zamanlı olarak ele alan bütünlük bir çözüm yaklaşımı aracılığıyla taşıma maliyetlerini en aza indirmeye yönelik bir taşıma ağının tasarlanmasıdır. Orta/uzun vadede sistem performansını büyük ölçüde etkileyecek olan bu tür problemler için geliştirilecek yöntemlerde çözüm kalitesi ön plana çıkmakta; çözüm süresinin uzun olması ise kısa vadeli planlama problemlerine göre uygulamada önemli bir kısıt teşkil etmemektedir. Bu nedenle, çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP'nin çözümü için, lokasyon ve rotalama kararlarını bütünlük bir şekilde ele alan matematiksel modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada incelenen iki kademeli LRP'de taşınacak ürünlerin transferinde rol üstlenen ara tesisler aktarma merkezi (AKM) olarak adlandırılmıştır. İki kademeli taşıma ağında AKM-hedef nokta ve AKM-talep merkezleri arasında olmak üzere iki tür araç rotalama söz konusudur. Çalışmada, AKM-hedef nokta arasındaki taşımaların doğrudan yapılacağı varsayılmıştır. Bu kapsamda, iki kademeli LRP olarak tanımlanan ağ tasarımı;

- (i) taşıma ağında yer alacak AKM sayısı ve lokasyonlarının belirlenmesi,
- (ii) talep merkezlerinin bu AKM'lere atanması,

(iii) açılan her bir AKM için AKM-talep merkezleri arasındaki çoklu araç rotalarının oluşturulması

olmak üzere birbiriyle doğrudan ilişkili olan üç temel konuya çözüm aranmaktadır. Taşıma ağında kullanılacak araç sayısı önceden belirli bir sabit değer olmayıp, açılan AKM sayısı ile her bir AKM için oluşturulan tur sayısına bağlı olarak belirlenecektir. Çalışmada, taşıma faaliyetlerinin mümkün olduğunca az sayıda araç kullanılarak en az toplam mesafe ile gerçekleştirilmesini sağlayacak bir ağ tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, iki kademeli LRP için öncelikli olarak taşıma ağı boyunca katedilen toplam mesafenin, ikinci öncelikli olarak ise kullanılan araç sayısının minimize edilmesine yönelik tamsayı bir doğrusal programlama modeli önerilmiştir.

Lokasyon ve rotalama problemlerinin bütünlük bir şekilde çözümü için geliştirilmiş olan model, ülkemizdeki bir Bakanlığa ait 81 İl Müdürlüğünde denetim faaliyetleri için kullanılan bir test cihazının kalibrasyon ve yazılım güncellenmesi ile ilgili taşıma ağı problemine uygulanmıştır. Uygulamanın yapıldığı kurumun mevcut taşıma ağında İl Müdürlükleri arasından seçilmiş olan bölge iller (AKM'ler), kendisine bağlı olan iller (talep merkezleri) ve Kalibrasyon Birimi (hedef nokta) arasında test cihazlarının taşınmasında bir transfer noktası rolü üstlenmektedir. Mevcut taşıma ağında değer katmayan taşıma hareketlerinin bulunması ve tüm illeri kapsayacak şekilde coğrafi olarak geniş bir alanda yapılan bu faaliyetin yılda iki kez gerçekleştirilmesi nedeniyle yüksek düzeyde taşıma mesafeleri ve maliyetlerine katlanıldığı görülmektedir. Taşıma maliyetlerini azaltmaya yönelik etkin bir taşıma ağının tasarlanması amacıyla, iki kademeli LRP kapsamında lokasyon probleminin çözümü ile taşıma ağında yer alacak en uygun AKM sayısı ile lokasyonlarının belirlenmesine ve talep merkezlerinin bu AKM'lere atanmasına çalışılmıştır. Mevcut taşıma ağında cihazlar AKM'ler ile her bir talep merkezi arasında doğrudan taşınmaktadır. Taşıma ağı boyunca katedilen toplam mesafe ve kullanılan toplam araç sayısını azaltmak amacıyla, AKM-talep merkezleri arasında araç rotalarının oluşturulması için bütünlük modele lokasyon probleminin yanı sıra ARP dâhil edilmiştir. Uygulama probleminin özelliklerinden yola çıkılarak, literatürde incelenen kapalı uçlu ARP için değişken kapalı uçlu araç rotalama tanımı yapılmıştır.

Ticari lojistik ve dağıtım sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan problem türlerinden farklı olarak, çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP'de coğrafi olarak geniş bir alana yayılmış olan her bir talep merkezinden küçük boyutlarda az sayıda ürünün AKM'ler aracılığıyla belirli bir hedef noktaya taşınması faaliyeti söz konusudur. Taşınan test cihazları, dizüstü bilgisayar boyutlarında olup her bir talep merkezinde birkaç adet bulunmaktadır. Dolayısıyla, taşımada kullanılan araçlar ve AKM'lerde ürünlerin geçici olarak depolanmasına ilişkin bir kapasite kısıtı bulunmamaktadır. Yine, dağıtım sistemlerinde çoğunlukla karşılaşılan problemlerden farklı olarak açılacak transfer noktalarına ilişkin tesis maliyetleri söz konusu değildir. AKM'ler mevcut İl Müdürlükleri olduğu için, taşıma ağının yeniden tasarımında AKM lokasyonlarının kolay bir şekilde değiştirilerek talep merkezi atamalarının da

yeniden belirlenmesi mümkündür. Söz konusu test cihazlarının Kalibrasyon Birimine taşınması faaliyeti, uygulamanın yapıldığı kurum dışında ülkemizdeki üç farklı kamu kurumunda daha gerçekleştirilmektedir. Çalışmada önerilen model, ilgili kamu kurumlarında uygulanan mevcut taşıma ağının iyileştirilmesi veya ihtiyaçlar doğrultusunda yeniden tasarlanması gerektiğinde kullanılabilir. İki kademeli LRP'nin çözümü için geliştirilen bütünleşik model, tek atamalı kapasite kısıtsız AKM lokasyon ve mesafe kısıtlı ARP çerçevesinde tanımlanmıştır. Modele ilave edilecek/çıkarılacak kısıtlar veya amaç fonksiyonun uyarlanması yoluyla, benzer özellikleri taşıyan iki kademeli ağ tasarım problemlerinin çözümünde de çalışmada geliştirilen bütünleşik modelin kullanılması mümkündür.

Çalışmanın birinci bölümünde öncelikle LRP'nin temelini oluşturan TLP ve ARP ile ilgili temel tanım ve bilgilere yer verilmiştir. Ardından, her iki problemin birlikte ele alındığı LRP ile ilgili çalışmalara ilişkin literatür taraması sunularak çalışmanın katkısı ortaya koyulmuştur. İkinci bölümde, çalışmada incelenen iki kademeli LRP tanımlandıktan sonra problemin çözümü için geliştirilen bütünleşik matematiksel model açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, çalışmada önerilen modelin kamu kurumundaki taşıma ağı problemine uygulanmasıyla elde edilen çözüm sonuçları sunularak mevcut taşıma ağı ile karşılaştırılmıştır. Son bölümde, çalışmada elde edilen bulgular çerçevesinde genel sonuç ve değerlendirmeler sunulmuştur.

### 1.1. Tesis Lokasyon ve Araç Rotalama Problemleri

TLP hem üretim hem de hizmet sistemlerinde karşılaşılan stratejik düzeyde bir karar problemi olup, maliyetleri minimize edecek şekilde açılması planlanan tesislerin konumunun potansiyel yerler arasından seçimini ve bu tesislere ilişkin kapasite/talep tahsisi kararlarını içerir. TLP, stratejik tedarik zinciri kararları çerçevesinde ağ tasarımı kapsamında ele alınmaktadır. Her bir tesisin rolü, lokasyonu, kapasitesi, pazar-tedarik tahsisine ilişkin konuları içeren ağ tasarım kararlarının sistem performansı üzerinde önemli düzeyde bir etkisi vardır (Chopra ve Meindl, 2013: 120). Tesis lokasyon kararları, maliyet kalemleri içerisinde önemli bir yer teşkil eden lojistik maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, TLP uzun yıllardır araştırmacıların üzerinde çalıştığı konulardan biri olmuştur. Current vd. (2002: 86), literatürde incelenen temel TLP türlerini küme kapsama, maksimum kapsama,  $p$ -merkez,  $p$ -dağılım,  $p$ -medyan, sabit maliyetli lokasyon, maksimum toplam ve ana dağıtım üssü (ADÜ) lokasyon problemi şeklinde sınıflandırmıştır. TLP'de lokasyon ve atama kararları birbiriyle doğrudan ilişkilidir. Atama kısıtları açısından tek atamalı ve çok atamalı olmak üzere iki tür problem söz konusudur. Tek atamalı problemlerde her bir talep merkezi sadece tek bir tesise atanabilirken, çok atamalı problemlerde birden çok tesise atanabilmektedir.

ARP'nin temeli literatürde Gezgin Satıcı Problemi (GSP) olarak bilinen probleme dayanmaktadır. GSP'de bir şehirden başlayarak her şehri bir kez ziyaret ettikten sonra başladığı noktaya geri dönen bir gezgin satıcı için en kısa mesafeli turun belirlenmesine çalışılır. Çoklu Gezgin Satıcı Probleminde (ÇGSP) ise birden fazla sayıda gezgin satıcı bulunur. Tipik bir ÇGSP'de merkezi bir depodan hareket ederek  $n$  sayıda müşteriyi ziyaret edecek olan  $m$  adet araç için toplam mesafeyi minimize

eden araç rotaları oluşturulur (Jünger vd., 1995: 229). Tüm araç rotalarının merkezi depoyu içerecek şekilde oluşturulması gerekir. Matematiksel formülasyonlarda bu amaçla alt tur eleme kısıtları kullanılmaktadır. ÇGSP'de önceden belirli sabit bir sayıda gezgin satıcı olabileceği gibi satıcı sayısı değişken de olabilmektedir. Gezgin satıcı sayısının sabit olmadığı durumlarda, problemin çözümünde yer alacak gezgin satıcı (araç) sayısının en aza indirilmesi de söz konusu olabilecektir (Bektas, 2006: 210).

ARP, ÇGSP'nin probleme ilişkin bazı ilave kısıtlarla genelleştirilmiş halidir. ARP'de belirli kısıtlar altında bir veya birden fazla depodan, coğrafi olarak farklı yerlerde bulunan müşterilere optimal dağıtım ya da toplama rotalarının belirlenmesine çalışılır. Araç kapasiteleri, araç rotasının içerebileceği maksimum şehir sayısı, maksimum mesafe veya süre kısıtları, zaman penceresi ve öncelik ilişkileri ARP'de yaygın olarak kullanılan kısıtlardır (Laporte, 1992: 345-346). Mesafe kısıtlı ARP'de araç kapasite kısıtlarının yerini maksimum mesafe veya süre kısıtı almakta ve her bir araç rotası, toplam uzunluğu maksimum mesafe kısıtını aşmayacak şekilde oluşturulmaktadır (Toth ve Vigo, 2002: 8). Yücel (2016: 27), literatürde incelenen çeşitli ARP türlerini kısıtlarına, yol durumuna, çevre durumuna ve rotalama durumuna göre dört ana başlık çerçevesinde sınıflandırmıştır. Rotalama durumuna göre ARP, açık ve kapalı uçlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Araçların tüm talep merkezlerini dolaştıktan sonra başladıkları merkez düğüme geri döndüğü rotalama problemleri kapalı uçlu, merkez düğümünden çıkış yapan araçların rotasını son ziyaret noktasında bitirip başlangıç noktasına tekrar dönüş yapmadığı rotalama problemleri ise açık uçlu ARP olarak adlandırılır. ARP'de katedilen toplam mesafe ve araçların sabit maliyeti açısından toplam taşıma maliyetleri, taşımada kullanılan araç sayısı, seyahat süresi ve araç yüküne göre rotaların dengelenmesi, müşteri talebinin kısmî olarak karşılanmasından kaynaklanan cezaların en aza indirilmesi gibi çeşitli amaçlar veya bunların ağırlıklı kombinasyonları kullanılmaktadır (Toth ve Vigo, 2002: 4).

Birçok tesis lokasyon modelinde, lojistik sistemde yer alan tesisler arasındaki ürün akışlarının doğrudan gerçekleştirildiği varsayılır. Böyle bir varsayım, ancak tesisler arasındaki taşımaların tam araç yükü şeklinde yapıldığı durumda geçerli olabilir. Taşımaların küçük miktarlarda olması durumunda ise genellikle aynı taşıma aracıyla birden çok noktaya hizmet sağlanacak şekilde sevkiyatlar birleştirilir. Bu durumda, taşıma maliyetleri ziyaret edilecek noktaların sıralamasından etkileneceği için tesislerin optimal lokasyonu araç rotalarına da bağlı olacaktır. Bu tür problemlerde klasik TLP modelleri yetersiz kalmaktadır. Lokasyon kararlarında araç rotalamayı da içeren problemler LRP olarak adlandırılır (Ghiani vd., 2013: 125). LRP; tesislerin kurulacağı yerin belirlenmesi, talep merkezlerinin bu tesislere atanması ve talep merkezlerine hizmet vermek üzere araç rotalarının oluşturulması olmak üzere birbiriyle ilişkili üç temel kararı içerir (Current vd., 2002: 99). Klasik tesis lokasyon ve araç rotalama problemleri LRP'nin özel bir türü olarak görülebilir. Tüm talep merkezlerinin depolara doğrudan bağlanması durumunda LRP klasik TLP'ye dönüşür. Depo lokasyonlarının sabit kabul edilmesi durumunda ise problem ARP'ye indirgenir (Nagy ve Salhi, 2007: 650).

Bir lojistik sistemde yer alan başlangıç (tedarikçiler, üretim tesisleri vb.) ve varış noktaları (perakendeciler, nihai müşteriler vb.) arasında ara tesislerin (çapraz sevkiyat noktaları, dağıtım merkezleri vb.) bulunup bulunmaması durumuna göre taşıma faaliyetleri doğrudan ve dolaylı taşıma olmak üzere ikiye ayrılabilir. Ara tesislerin bulunmadığı doğrudan taşımada, varış noktasına gönderilecek olan ürünler başlangıç noktasından sevk edilir. Dolaylı taşımada ise ürünlerin varış noktasına taşınması faaliyeti bir veya birden çok ara tesisten transfer edilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bir lojistik ağda aralarında taşıma faaliyeti gerçekleşen her bir aşama çifti ağın belli bir kademesini temsil eder (Cuda vd., 2015: 185). Lojistik ağdaki kademe sayısına bağlı olarak LRP türleri tek kademeli ve çok kademeli olmak üzere iki grupta incelenebilir. Klasik tek kademeli LRP’de müşteri talepleri başlangıç noktasından yapılan sevkiyatlarla karşılanmakta olup ara tesisler vasıtasıyla ürün transferi söz konusu değildir (Schneider ve Drexl, 2017: 390). Çok kademeli problemin özel bir türü olan iki kademeli LRP’de ise ürün sevkiyatları başlangıç-varış noktaları arasında yer alan ara tesisler vasıtasıyla gerçekleştirilir. Başlangıç noktasından çıkan ürünler öncelikle depolama, birleştirme, aktarma gibi operasyonların gerçekleştirildiği ara tesislere, bu tesislerden de nihai varış noktalarına gönderilmektedir (Cuda vd., 2015: 185).

## 1.2. Literatür Taraması

Bu kısımda, LRP alanındaki araştırmalara ilişkin literatür taraması sunulmaktadır. Çalışmanın yeri ve katkısı ortaya koyulmuştur. Literatürde incelenen LRP türleri, çalışmalarda ele alınan farklı problem özelliklerine bağlı olarak çok fazla çeşitlilik göstermektedir. LRP’nin farklı türleri ve uzantıları Nagy ve Salhi (2007), Lopes vd. (2013), Prodhon ve Prins (2014), Drexl ve Schneider (2015), Schneider ve Drexl (2017) ve Mara vd. (2021) tarafından yapılan literatür araştırmalarında kapsamlı olarak incelenmiştir. Nagy ve Salhi (2007), LRP alanında incelenen çeşitli problem türlerini hiyerarşik yapısı, girdi verilerinin yapısı, planlama periyodu, çözüm yöntemleri, amaç fonksiyonu, çözüm uzayı, depo sayısı, araç sayısı ve türü ile rota yapısına göre sınıflandırmıştır. Schneider ve Drexl (2017: 389); deterministik, statik, kesikli, tek kademeli ve tek amaçlı LRP’yi standart LRP olarak adlandırmış ve bu problem türü için literatürdeki çalışmalarını incelemiştir. Drexl ve Schneider (2015: 284-285), farklı LRP türlerini tanımlayan ana özellikleri statik-dinamik-periyodik problemler, kesikli-sürekli-ağ lokasyon problemleri, tek-çok kademe, tek-çok amaç, düğüm-kenar rotalama, müşteri kümeleme, ödül toplama, bölünmüş teslimat, eş zamanlı toplama-dağıtım ve stok kararları şeklinde sınıflandırmıştır. Yazarlar; ağın yönlü olup olmaması, tesislerle ilgili kapasite kısıtının ve sabit maliyetlerin bulunup bulunmaması, araç sayısının sınırlı olup olmaması, kapasite kısıtlarının bulunup bulunmaması ve homojen-heterojen olup olmaması gibi alt özelliklerin ise problemin yapısını farklı bir LRP türü olarak sınıflandırılacak düzeyde değiştirmeyeceğini belirtmiştir.

LRP’nin temellerini lokasyon ve rotalama kararları arasındaki karşılıklı ilişkiye dikkat çeken 60’lı yıllardaki çalışmalara kadar götürmek mümkündür (Von Boventer, 1961; Maranzana, 1964). LRP için ilk kesin çözüm yöntemi Laporte ve

Nobert (1981) tarafından geliştirilmiştir. Kapasite kısıtı olmayan tek bir depo ile yine kapasite kısıtı olmayan sabit sayıda aracın ele alındığı çalışmada, depo lokasyonunun ve dağıtım rotalarının aynı anda belirlenmesine yönelik tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve problemin çözümü için dal-sınır algoritması kullanılmıştır. Laporte vd. (1983), probleme çoklu depo durumunu dahil etmiş ve geliştirilen matematiksel modeli kısıt gevşetme prosedürü ile çözmüştür. Laporte vd. (1986), araç kapasite kısıtlarının bulunduğu LRP için tamsayılı doğrusal programlama modelindeki kısıtların gevşetilmesine dayanan kesin bir çözüm algoritması geliştirmiştir.

Rotalamanın lokasyon kararları üzerindeki etkisi ilk defa Salhi ve Rand (1989) tarafından incelenmiştir. Çalışmada, LRP'nin hiyerarşik olarak çözülmesi durumunda optimal çözümün garanti edilemeyeceği ve lokasyon aşamasında bulunan en iyi çözümün, rotalama aşamasından sonra bulunan en düşük maliyetli çözüme karşılık gelmeyebileceği gösterilmiştir. Literatürde çeşitli özelliklerdeki LRP için geliştirilen sezgisel çözüm yöntemlerinde ise lokasyon ve rotalama problemlerinin ardışık bir şekilde çözüldüğü hiyerarşik yaklaşımların ağırlıkta olduğu görülmektedir (örneğin; Tuzun ve Burke, 1999; Wu vd., 2002; Albareda-Sambola vd., 2005; Karaoglan vd., 2012; Ting ve Chen, 2013; Rahmani vd., 2016; Nadizadeh ve Nasab, 2019). Lokasyon ve rotalama kararlarının bütünleşik olarak ele alınmasının elde edilen çözüm kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olabilmektedir. Ahmadi-Javid vd. (2018), LRP'nin kapsamına fiyatlandırma problemini de dahil ederek kâr maksimizasyonuna yönelik tamsayılı bir doğrusal programlama geliştirmiştir. Modelin kesin çözümü için geliştirilen dal-fiyat algoritmasının performansı çeşitli problemler üzerinde test edilmiştir. Çalışmada lokasyon, rotalama ve fiyatlandırma problemlerinin bütünleşik olarak çözülmesi durumunda hiyerarşik yaklaşıma göre ortalama %51.23 oranında iyileştirmenin sağlandığı gösterilmiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda mesafe kısıtlı ARP'de olduğu gibi LRP'nin kapsamına araç rotaları için maksimum mesafe (maksimum rota uzunluğu) kısıtları dahil edilmiştir. Chan ve Baker (2005), araç kapasite kısıtlarının bulunduğu LRP için Laporte vd. (1986) tarafından geliştirilen matematiksel modele, maksimum araç rota uzunluğuna dair kısıtları da ilave etmiş ve sezgisel yöntemle problemi çözmüştür. Berger vd. (2007) tarafından ele alınan problemde tesis ve araçlar için kapasite kısıtı bulunmamakta; her bir araç rotası ise önceden belirli bir maksimum mesafe kısıtını aşmayacak şekilde oluşturulmaktadır. Yazarlar, mesafe kısıtlı LRP'nin çözümü için dal-fiyat algoritmasına dayanan kesin bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Çetiner vd. (2010), posta dağıtım hizmetleri için TLP'nin bir türü olan ADÜ lokasyon problemini ARP ile birlikte ele almıştır. İncelenen problemde ADÜ ve araçların sabit maliyeti ile kapasite kısıtı bulunmamaktadır. Problemin çözümü için ilk aşamada ADÜ lokasyonlarının, ikinci aşamada ise araç rotalarının belirlendiği hiyerarşik bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada iki tür mesafe kısıtı dikkate alınmıştır. İlk aşamada çözülen alt problemde ADÜ'lere atılacak düğümler, her iki nokta arasındaki mesafe önceden belirli bir değeri aşmayacak şekilde belirlenmiştir. Araç rotalarının oluşturulduğu ikinci aşamada ise her bir araç



rotası uzunluğu için yine maksimum bir mesafe kısıtı göz önünde bulundurulmuştur. Türkiye'deki PTT dağıtım hizmetleri için çözülen uygulama probleminde söz konusu mesafe kısıtları sırasıyla 450 km ve 900 km olarak alınmıştır.

Nagy ve Salhi (2007: 651), LRP alanındaki çalışmalarını inceledikleri literatür araştırmasında, gerçek uygulamalara yönelik çalışmaların LRP literatürünün yaklaşık beşte birini oluşturduğunu, dolayısıyla LRP'nin sadece akademik çalışmalarda değil, gerçek hayatta da uygulama potansiyeli yüksek bir problem olduğunu vurgulamıştır. Sağlık, askeri ve iletişim alanlarında da bazı çalışmalar olmakla birlikte, uygulama problemlerinin daha çok tüketici ürünlerinin dağıtımında yoğunlaştığı belirtilmiştir. Mara vd. (2021: 2953), LRP ile ilgili 2014-2019 arasında yayınlanan 222 çalışmayı türlerine ve uygulama alanlarına göre sınıflandırmıştır. Yazarlar, LRP alanındaki çalışmaların yaklaşık %30'unun gerçek bir uygulama problemine dayandığını belirterek, akademik çalışmalar ile pratik uygulamalar arasındaki boşluğun kapatılmasında bu tür uygulamaya yönelik çalışmaların önemine değinmiştir. Ayrıca, Prodhan ve Prins (2014: 15) ve Mara vd. (2021: 2965), LRP ile ilgili ileriye yönelik çalışma alanları olarak kesin çözüm yöntemlerinin geliştirilmesine dikkat çekmiş ve bu konuda yapılacak çalışmaların literatüre önemli bir katkı sağlayacağını belirtmiştir. LRP için geliştirilen kesin çözüm yöntemleri ise çoğunlukla problemin matematiksel programlama formülasyonuna dayanmaktadır (Nagy ve Salhi, 2007: 654).

Literatürde LRP ile ilgili çalışmaların daha çok tek kademeli problem üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Çok kademeli LRP literatürde ilk defa Jacobsen ve Madsen (1980) ve Madsen (1983) tarafından incelenmiştir. Yazarlar, gazetelerin ilk olarak fabrikadan transfer noktalarına, buradan da müşterilere dağıtımının yapıldığı iki kademeli bir dağıtım problemini ele almıştır. Fabrika ile transfer noktaları arasındaki araç rotaları birincil tur, transfer noktaları ile müşteriler arasında rotalar ise ikincil tur olarak adlandırılmıştır. Transfer noktalarının sayısı ve lokasyonlarının belirlenerek müşterilerin bu noktalara atanması, birincil ve ikincil araç rotalarının oluşturulması olmak üzere üç alt problemi içeren problem için sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Nagy ve Salhi (2007: 665), iki kademeli bu problemin LRP'nin genişletilmiş bir uzantısı olarak ele alınabileceğini belirtmiştir. Transfer noktalarına ilişkin tesis maliyetlerinin ihmal edilebileceği bu problemde, transfer noktası lokasyonlarının değiştirilerek yeniden belirlenmesi de mümkündür.

Uygulamada tüketici ürünlerinin ulusal/uluslararası düzeyde dağıtımını, posta ve kargo dağıtım hizmetleri, basılı yayın dağıtımını, gıda dağıtımını, eve teslim hizmetleri, e-ticaret, çok modlu taşımacılık, kent lojistiği gibi birçok alanda çok kademeli LRP'ye rastlanmaktadır (Drexler ve Schneider, 2015: 285). Bu nedenle, son yıllarda çok kademeli LRP ve bunun özel bir türü olan iki kademeli LRP ile ilgili akademik çalışmalara giderek artan bir ilginin olduğu görülmektedir. Cuda vd. (2015), iki kademeli rotalama problemleri ile ilgili literatür araştırmasında iki kademeli LRP'ye yönelik çalışmaları da incelemiştir. İki kademeli LRP ile ilgili güncel çalışmalar daha çok farklı uygulama alanlarına ilişkin özellikleri içeren spesifik problemlerin çözümüne yoğunlaşmıştır. Son yıllardaki çalışmalarda iki kademeli LRP

kapsamında ele alınan çeşitli lojistik uygulamalarına örnek olarak; kentsel katı atık yönetimi için geri dönüşüm lojistik ağ tasarımı (Vidović vd., 2016), bozulabilir/sürelili ürünler için dağıtım sistemleri (Bala vd., 2017), üçüncü parti lojistik uygulamalarına ilişkin açık uçlu lokasyon ve rotalama (Pichka vd., 2018), müşteri ilişkileri yönetimi kapsamında satın alma davranışlarına göre müşteri kümelemeye dayanan lokasyon ve rotalama (Wang vd., 2018), kent lojistiğinde ortak teslimat işbirlikleri ve kentsel lojistik ağın yeniden tasarımı (Zhao vd., 2018), tarım sektöründe yeşil lojistik uygulamalarına yönelik lokasyon ve rotalama (Pitakaso vd., 2020), sağlık lojistiğinde tıbbi olmayan ürünlerin dağıtımı (Abbasi vd., 2021), biyokütle lojistik sistemlerinde kaynak lokasyon ve rotalama (Cao vd., 2021), afet yönetiminde afet sonrası atıkların toplanması (Cheng vd., 2021), bankacılık sektöründe dinamik risk indeksi içeren nakit para taşımacılığı (Fallahtafti vd., 2021) ve ulusal posta hizmetlerinde akış senkronizasyonuna yönelik lokasyon ve rotalama (Mirhedayatian vd., 2021) verilebilir. İki kademeli LRP için birçoğu gerçek uygulama örneğine dayanan bu çalışmalarda, ele alınan problemin matematiksel formülasyonu da sunulmakla birlikte çözüm için sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

Problemin içerdiği lokasyon ve rotalama kararları ile ilgili farklı özelliklere bağlı olarak literatürdeki çalışmalarda çok çeşitli LRP türünün incelendiği görülmektedir. Ancak, literatürde bu çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP'nin tüm özelliklerini içeren bir çalışmaya ve bütünlük matematiksel modele rastlanmamıştır. Çalışmanın literatüre katkısı, uygulamadaki önemi yüksek olan ve tek kademeli LRP'ye göre daha az sayıda çalışmanın yer aldığı iki kademeli LRP için gerçek bir taşıma ağının özelliklerinden yola çıkılarak özgün bir problemin tanımlanmış olması ve bu problemin bütünlük olarak çözümüne yönelik bir matematiksel modelin geliştirilmesidir. Çalışmanın uygulamaya yönelik katkısı ise, bütünlük modelin çözümü ile elde edilen taşıma ağ tasarımı yoluyla, mevcut sisteme göre çok daha az sayıda kaynak kullanımı ile katedilen taşıma mesafelerinde önemli düzeyde iyileştirmelerin sağlanmış olmasıdır. Geliştirilen model, değişen koşullara veya ihtiyaçlara bağlı olarak taşıma ağının yeniden tasarlanması gerektiğinde de kullanılabilir. Çalışmada uygulama örneği olarak incelenen söz konusu test cihazının taşınması faaliyeti, ülkemizdeki üç farklı kamu kurumunda daha gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, uygulamanın ele alındığı kurum ile benzer yapıdaki diğer kamu kurumlarının ağ tasarım problemlerinin çözümünde de modelin doğrudan kullanılması mümkündür. Ayrıca, iki kademeli LRP'nin çözümü için geliştirilmiş olan bütünlük model, modele ilave edilecek veya çıkarılacak kısıtlar yoluyla farklı özellik ve kısıtlara sahip iki kademeli ağ tasarım problemlerine de uyarlanabilecek niteliktedir.

## **2. YÖNTEM**

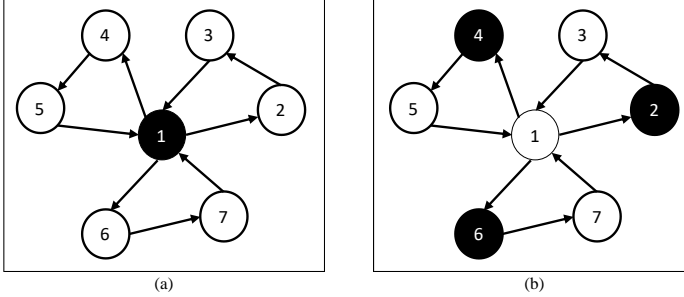
Bu bölümde öncelikle çalışmada incelenen iki kademeli LRP tanımlanmıştır. Ardından, problemin bütünlük olarak çözümü amacıyla geliştirilen tamsayılı doğrusal programlama modeli açıklanmıştır.

## 2.1. Problemin Tanımlanması

Çalışmada ele alınan iki kademeli LRP, tek atamalı kapasite kısıtsız AKM lokasyon ve mesafe kısıtlı ARP çerçevesinde şu şekilde tanımlanabilir: Problemin  $G = (N, A)$  grafında  $N = \{1, 2, \dots, n - 1, n\}$  düğümler kümesini,  $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$  ise kenarlar (yollar) kümesini temsil etmektedir.  $C_{ij}$ ,  $i$ 'inci ve  $j$ 'inci düğümler arasındaki mesafeyi göstermektedir.  $N$  kümesinde yer alan  $n - 1$  sayıda talep merkezi, ürünlerini  $n$  düğümü ile gösterilen belli bir hedef noktaya,  $m$  sayıda ( $m = n - 1$ ) düğüm arasından seçilen bir AKM üzerinden ulaştıracaktır. Her AKM aynı zamanda talep merkezlerinden toplanan ürünlerle birlikte kendi ürününü de hedef noktaya ulaştırması gereken bir talep merkezidir. AKM'ler, kendisine bağlı olan talep merkezleri ile hedef nokta arasında ürün transferinin sağlanmasında bir aktarma noktası rolü üstlenmektedir. Talep merkezlerindeki ürünler, bir talep merkezinden başlayan ve aynı yerde biten rota çerçevesinde, yeterli düzeyde kapasitesi bulunan homojen araçlarla toplanarak bağlı oldukları AKM'ye ulaştırılmakta ve buradan da AKM'deki araç ile hedef noktaya götürülmektedir. AKM aracı, ürünleri hedef noktaya ulaştırdıktan sonra tekrar AKM'ye dönmektedir. Hedef nokta ile AKM'ler arasındaki turlar doğrudan gidiş-dönüş şeklindedir. AKM ile talep merkezleri arasındaki rotalar ise birden çok araçla ve birden çok talep merkezini içerebilecek şekilde oluşturulacaktır.

Ele alınan uygulama probleminin özelliklerinden yola çıkılarak, bu çalışmada değişken kapalı uçlu araç rotalama tanımı yapılmış ve literatürde incelenen kapalı uçlu ARP, sabit ve değişken kapalı uçlu ARP olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yapılan bu sınıflandırmaya göre, sabit bir merkez düğümden çıkıp dağıtım veya toplama görevini yerine getirdikten sonra yine aynı merkeze dönen araçların rotalama problemleri sabit kapalı uçlu ARP olarak tanımlanabilir. Sabit bir merkez yerine her biri farklı düğümlerden çıkan araçların, rotasına uygun olarak dağıtım veya toplama faaliyetini yerine getirdikten sonra tekrar başladığı noktaya döndüğü rotalama problemleri ise çalışmada değişken kapalı uçlu ARP olarak tanımlanmıştır. Şekil 1(a)'da gösterilen sabit kapalı uçlu ARP'de rotaların başlangıç ve bitiş noktası sabit bir merkez düğümdür. Şekil 1(b)'deki değişken kapalı uçlu ARP'de ise farklı düğümlerden (örneğin, 2, 4 ve 6 nolu düğümlerden) çıkan araçlar, rotasına uygun olarak şehirleri dolaşip 1 nolu düğümlerle gösterilen merkez düğüme uğradıktan sonra rotasını başladığı yerde bitirmektedir. Oluşturulan turun toplam mesafesi değişmemekle birlikte, değişken kapalı uçlu ARP bu çalışmada incelenen uygulama probleminde olduğu gibi farklı şehirlerden çıkan araçların ürünleri toplayarak bağlı olduğu AKM'ye bıraktığı ve tekrar başladığı şehre döndüğü durumlarda söz konusu olabilecektir. Rotaların ters yönde takip edilmesi ile (veya AKM'ye doğrudan bağlı olan diğer şehirden başlayarak) yine farklı şehirlerden çıkan araçlarla AKM'de bulunan ürünlerin talep merkezlerine dağıtımını gerçekleştirilebilir.

**Şekil 1: Sabit ve Değişken Kapalı Uçlu Rotalar**



Çalışmada ele alınan iki kademeli LRP'ye dair kısıt ve varsayımlar şu şekildedir:

- Her bir talep merkezi tek bir AKM'ye atanacaktır. Taşınacak ürünler bir AKM üzerinden hedef noktaya ulaştırılmaktadır. AKM'ler arasında ürün transferi söz konusu değildir.
- Ürünler hedef noktaya transfer edilecek zamana kadar AKM'lerde beklemektedir. AKM'ler bu ürünler için yeterli düzeyde kapasiteye sahiptir. Dolayısıyla, AKM'ler için bir kapasite kısıtı söz konusu değildir. AKM açmanın sabit maliyeti bulunmamaktadır.
- Taşıma ağında yer alacak AKM sayısı önceden belli değildir. Açılacak AKM sayısı ve bu AKM'lere atanacak talep merkezi sayısında herhangi bir üst kısıt söz konusu değildir.
- Taşımada kullanılan tüm araçlar homojendir ve taşınacak ürünler için yeterli düzeyde kapasiteye sahiptir. Dolayısıyla, taşımada kullanılan araçlar için bir kapasite kısıtı söz konusu değildir.
- AKM ve bu AKM'ye bağlı talep merkezleri arasındaki turların başlangıç ve bitiş düğümü aynı talep merkezi olacaktır.
- Hedef nokta ile AKM'ler arasındaki turlar doğrudan gidiş-dönüş şeklindedir.
- Hedef noktanın bulunduğu talep merkezi de bir AKM olarak belirlenecektir.
- Mesafe matrisi simetriktir ( $C_{ij} = C_{ji}$ ).

AKM'ye atanabilecek talep merkezleri ile araç rotalarının belirlenmesinde, problemdeki diğer kısıtlarla birlikte aşağıdaki üç kısıt esas alınmıştır:

- AKM ile bu AKM'ye atanan talep merkezi arasındaki mesafe önceden belirli bir maksimum değeri aşamaz.
- AKM ile talep merkezleri arasında oluşturulan her bir araç rotasının toplam uzunluğu önceden belirli bir maksimum değeri aşamaz.
- Her bir AKM ile talep merkezleri arasında oluşturulan tur sayısı maksimum tur sayısını aşamaz.

Problem; taşıma ağında yer alacak AKM sayısı ve lokasyonlarının belirlenmesini, talep merkezlerinin bu AKM'lere atanmasını ve her bir AKM için çoklu araç rotalarının oluşturulmasını içermektedir. Taşıma ağı tasarımında taşıma

faaliyetlerinin mümkün olduğunca az sayıda araç kullanılarak en az toplam mesafe ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, taşıma ağı boyunca katedilen toplam mesafe birinci öncelikli, kullanılan toplam araç sayısı ise ikinci öncelikli amaç olarak belirlenmiştir.

Çalışmada ele alınan iki kademeli LRP, Şekil 2’de verilen örnek bir problem üzerinde gösterilmiştir. 19 ilden (talep merkezinden) oluşan örnek problemde ürünler Kocaeli ilinde bulunan hedef noktaya ulaştırılacaktır. Örnek problemin çözümü sonucunda Çorum ve Kocaeli illeri AKM olarak belirlenmiş ve her bir AKM için şekilde gösterilen iki tur oluşturulmuştur. Çorum’da bulunan AKM’ye kendisi ile birlikte 9 il atanmıştır. Yozgat ve Kastamonu’dan çıkan araçlar, kendi ürünleri ile birlikte rotasında yer alan diğer illerin ürünlerini toplayarak Çorum’daki AKM’ye bıraktıktan sonra tekrar kendi iline dönmektedir. Geriye kalan 10 il ise Kocaeli’ndeki AKM vasıtasıyla ürünlerini hedef noktaya ulaştıracaktır. İllerden toplanan ürünler hedef noktaya transfer edilecek zamana kadar AKM’lerde beklemektedir. Şekil 2’de gösterilen AKM ve talep merkezleri arasındaki dört tura ilave olarak, AKM’ler ve hedef nokta arasındaki doğrudan gidiş-dönüş şeklindeki iki turun da ilave edilmesi ile toplam 6 tur ortaya çıkmakta, dolayısıyla taşıma faaliyeti boyunca 6 araç kullanılmaktadır. Hedef noktadaki ürünlerin AKM’ler aracılığıyla tekrar illere gönderilmesi sürecinde de benzer taşıma faaliyetleri gerçekleştirilecektir.

**Şekil 2: İki Kademeli LRP İçin Örnek Problem**



## 2.2. İki Kademeli LRP İçin Önerilen Bütünleşik Matematiksel Model

İki kademeli LRP’nin bütünleşik bir şekilde çözümü için geliştirilen tamsayı doğrusal programlama modelinde kullanılan indis, parametre ve değişkenler aşağıda tanımlanmıştır:

### İndisler

$i, j$  Düğüm (talep merkezleri ve hedef nokta) ( $i, j = 1, 2, \dots, n - 1, n$ )

- $k$  AKM'ler ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) ( $k \subset i$  ve  $m = n - 1$ )  
 $l$  AKM ile talep merkezleri arasındaki turlar ( $l = 1, 2, \dots, r$ )  
 $h$  Hedef noktanın bulunduğu talep merkezi ( $h \subset k$ )

**Parametreler**

- $C_{ij}$   $i$ 'inci ve  $j$ 'inci düğümler arasındaki uzaklık ( $C_{ij} = C_{ji}$ )  
 $n$  Düğüm sayısı  
 $m$  Aday AKM sayısı  
 $r$  Her bir AKM ile talep merkezleri arasında oluşturulabilecek maksimum tur sayısı  
 $f$  AKM ile bu AKM'ye atanacak talep merkezi arasındaki maksimum mesafe  
 $d$  AKM ile talep merkezleri arasındaki her bir turun maksimum toplam mesafesi  
 $a$  Amaç fonksiyonunda birinci öncelikli amaç için kullanılan ağırlık

**Karar Değişkenleri**

$$Y_k = \begin{cases} 1, k' \text{inci düğüm AKM olarak belirlenirse} \\ 0, \text{aksi takdirde} \end{cases}, Y_k \in \{0,1\}, \forall k$$

$$Z_{ik} = \begin{cases} 1, i' \text{inci düğüm } k' \text{inci AKM'ye atanırsa} \\ 0, \text{aksi takdirde} \end{cases}, Z_{ik} \in \{0,1\}, \forall i, k \mid i < n$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, k' \text{inci AKM'ye atanan } i' \text{inci düğümden } j' \text{inci düğüme geçilirse} \\ 0, \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j, k \mid i \neq j, [(i < n, j < n) \text{ veya } (i = n, j = k) \text{ veya } (j = n, i = k)]$$

$$W_{ijkl} = \begin{cases} 1, k' \text{inci AKM'nin } l' \text{inci turuna atanan } i' \text{inci düğümden } j' \text{inci düğüme geçilirse} \\ 0, \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$$W_{ijkl} \in \{0,1\}, \forall i, j, k, l \mid i \neq j, i < n, j < n$$

$U_i, U_j$   
 = AKM'ye uğramadan oluşan alt turları kırmak için kullanılan rastgele reel sayılar  
 $U_i, U_j \geq 0, \forall i$

$$T_{kl} = \begin{cases} 1, k' \text{inci AKM'nin } l' \text{inci turu açılırsa} \\ 0, \text{aksi takdirde} \end{cases}, T_{kl} \in \{0,1\}, \forall k, l$$

$S_k = k' \text{inci AKM için açılan toplam tur sayısı}, S_k \geq 0, \forall k$

$Z = \text{Amaç fonksiyonu değeri}$

Yukarıda tanımlanan düğümler kümesi talep merkezlerinin yanı sıra hedef noktayı da içermekte, kümenin son elemanı  $n$  hedef noktayı temsil etmektedir. Hedef nokta AKM olamayacağı için aday AKM kümesine dâhil edilmemiştir. Modelde aynı zamanda her bir AKM ile hedef nokta arasında gerçekleşen gidiş-dönüş turu, AKM ile talep merkezleri arasındaki turlardan hariç tutulmuştur. Yukarıda  $r$  ile ifade edilen tur sayısı, her bir AKM ile talep merkezleri arasında oluşturulabilecek maksimum tur sayısını ifade etmektedir. Bir AKM için  $S_k$  sayıda turun açılmasına karar verildiğinde, bu AKM için gerçekleşen toplam tur sayısı, hedef noktaya arasındaki tur da dikkate alındığında  $S_{k+1}$  olacaktır. Çalışmada önerilen modelde, taşıma ağında kullanılacak araç sayısı önceden belirli bir sabit değer olmayıp, açılan AKM sayısı ile her bir AKM için oluşturulan tur sayısına bağlı bir değişkendir ve modelin amaç fonksiyonunda ikinci öncelikli amaç olarak kullanılan toplam araç sayısı da minimize edilmektedir. Problem için önerilen tamsayılı doğrusal programlama modeli aşağıda sunulmuştur:

### Amaç fonksiyonu

$$\text{Min } Z = a. \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} \cdot X_{ijk} + \sum_{k=1}^m S_k + \sum_{k=1}^m Y_k \quad (1)$$

### Kısıtlar

$$\sum_{k=1}^m Z_{ik} = 1 \quad \forall i \mid i < n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1| i < n}^n Z_{ik} \leq m \cdot Y_k \quad \forall k \quad (3)$$

$$Z_{ik} + Z_{jk} \geq 2X_{ijk} \quad \forall i, j, k \mid i \neq j, i < n, j < n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1| j \neq i, j < n}^n X_{ijk} = Z_{ik} \quad \forall i, k \mid i \neq k, i < n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1| i \neq j, i < n}^n X_{ijk} = Z_{jk} \quad \forall j, k \mid j \neq k, j < n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1| j \neq i}^n X_{ijk} \geq S_k + Y_k \quad \forall i, k \mid i = k \quad (7)$$

$$\sum_{i=1| i \neq j}^n X_{ijk} \geq S_k + Y_k \quad \forall j, k \mid j = k, j < n \quad (8)$$

$$U_i - U_j + n \cdot X_{ijk} \leq n - 1 \quad \forall i, j, k \mid i \neq j, i \neq k, j \neq k, i < n, j < n \quad (9)$$

$$X_{ijk} = Y_k \quad \forall i, j, k \mid i = k, j = n \quad (10)$$

$$X_{ijk} = Y_k \quad \forall i, j, k \mid j = k, i = n \quad (11)$$

$$Z_{ik} = Y_k \quad \forall i, k \mid i = k \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^r W_{ijkl} = X_{ijk} \quad \forall i, j, k \mid i < n, j < n, i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{j=1 \mid j < n}^n W_{jikl} = \sum_{j=1 \mid j < n}^n W_{ijkl} \quad \forall i, k, l \mid i < n \quad (14)$$

$$\sum_{i=1 \mid i < n}^n \sum_{j=k}^n W_{ijkl} = T_{kl} \quad \forall k, l \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^r T_{kl} = S_k \quad \forall k \quad (16)$$

$$S_k \leq r \cdot Y_k \quad \forall k \quad (17)$$

$$S_k \geq Y_k \quad \forall k \quad (18)$$

$$T_{kl} \geq T_{k,l+1} \quad \forall k, l \mid l < r \quad (19)$$

$$C_{ik} \cdot Z_{ik} \leq f \quad \forall i, k \mid i < n \quad (20)$$

$$\sum_i \sum_{j=1 \mid j < n}^n C_{ij} \cdot W_{ijkl} \leq d \cdot T_{kl} \quad \forall k, l \quad (21)$$

$$Y_h = 1 \quad (22)$$

$$Y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (23)$$

$$Z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \mid i < n \quad (24)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \mid i \neq j, [(i < n, j < n) \text{ veya } (i = n, j = k) \text{ veya } (j = n, i = k)] \quad (25)$$

$$W_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \mid i \neq j, i < n, j < n \quad (26)$$

$$U_i, U_j \geq 0 \quad \forall i \quad (27)$$

$$T_{kl} \in \{0,1\} \quad \forall k, l \quad (28)$$

$$S_k \geq 0 \quad \forall k \quad (29)$$

Eşitlik (1) ile ifade edilen amaç fonksiyonu, taşıma faaliyeti boyunca katedilen toplam mesafe ve kullanılan araç sayısını en aza indirmektedir. Amaç fonksiyonundaki birinci terim,  $a$  parametresi ile ağırlıklandırılmış olan tüm turların toplam mesafesini gösterir. Amaç fonksiyonundaki ikinci terim, AKM-talep merkezleri arasındaki turlar için kullanılacak araçların sayısını, üçüncü terim ise hedef noktaya gidiş-dönüş turunda AKM'ler tarafından kullanılacak araçların sayısını gösterir. Talep merkezleri tarafından kullanılacak araç sayısı AKM için oluşturulan toplam tur sayısına ( $\sum S_k$ ), AKM'ler tarafından kullanılan araç sayısı ise açılan AKM sayısına ( $\sum Y_k$ ) eşittir. Modelde mümkün olduğunca az sayıda araç kullanılarak öncelikle katedilen toplam mesafenin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonunda bu önceliği ifade edecek şekilde toplam mesafe  $a$  parametresi ile ağırlandırılmıştır.



Modelde yer alan Kısıt (2), her bir talep merkezinin sadece bir AKM'ye atanmasını sağlar. Kısıt (3), talep merkezlerinin  $k$ 'ıncı AKM'ye bu düğümde AKM açılmadan atanamayacağını garanti eder. Kısıt (4),  $k$ 'ıncı AKM'de  $i$ 'inci ve  $j$ 'inci talep merkezleri arasında geçişin olabilmesi için hem  $i$ 'nin hem de  $j$ 'nin aynı AKM'ye atanmış olmasını gerektirir. Kısıt (5), AKM olmayan her bir talep merkezinden sadece bir kez çıkılmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (6), AKM olmayan her bir talep merkezine sadece bir kez gidilmesini sağlar. Kısıt (7) ve Kısıt (8), sırasıyla AKM'lerden çıkışların ve AKM'lere girişlerin yapılmasını sağlayan kısıtlardır. Kısıt (9), bir AKM için belirlenen araç rotalarında AKM düğümüne uğramadan oluşabilecek alt turları elemek için kullanılmaktadır. Bu kısıtlar,  $i$  ve  $j$  düğümleri göstermek üzere  $n$  sayıda düğümüne sahip bir GSP'de kullanılan aşağıdaki alt tur eleme kısıtından uyarlanarak oluşturulmuştur (Bellmore ve Nemhauser, 1968: 542):

$$U_i - U_j + n \cdot X_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i, j \mid i \neq j, i < n, j < n \quad (30)$$

Kısıt (10), her AKM'den hedef noktaya geçiş olmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (11), hedef noktadan tüm AKM'lere giriş (dönüş) olmasını sağlar. Kısıt (12), bir AKM'nin sadece kendine atanmasını garanti eder. Kısıt (13),  $X_{ijk}$  değişkenindeki  $i$ 'inci düğümünden  $j$ 'inci düğümüne geçişlerin  $k$ 'ıncı AKM'nin aynı turunda olmasını sağlamak amacıyla  $X_{ijk}$  ile  $W_{ijkl}$  değişkenlerini iribatlandıran kısıttır. Kısıt (14), her bir talep merkezine giriş ve çıkışın, bulunduğu tur bünyesinde olmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (15), açılmış her bir turdan ilgili AKM'ye sadece bir giriş olmasını sağlar. Kısıt (16),  $k$ 'ıncı AKM için açılan toplam tur sayısını belirler. Kısıt (17), her AKM için en fazla  $r$  sayıda tur açılmasını sağlar. Kısıt (18), açılan her AKM için en az bir turun oluşturulmasını sağlar. Kısıt (19), her AKM'deki turların indis numaralarına uygun olarak sırayla açılmasını sağlayan kısıttır. Kısıt (20), bir AKM ile bu AKM'ye atanan talep merkezi arasındaki mesafenin maksimum mesafeyi ( $f$ ) aşmamasını garanti eder. Kısıt (21), AKM-talep merkezleri arasındaki her bir turun toplam mesafesinin maksimum mesafeden ( $d$ ) küçük veya eşit olmasını sağlar. Kısıt (22), hedef noktanın bulunduğu talep merkezinin AKM olarak belirlenmesini sağlayan kısıttır. Kısıt (23)-(29) ise değişkenlerin tanım aralığını ifade eder.

### 3. BULGULAR

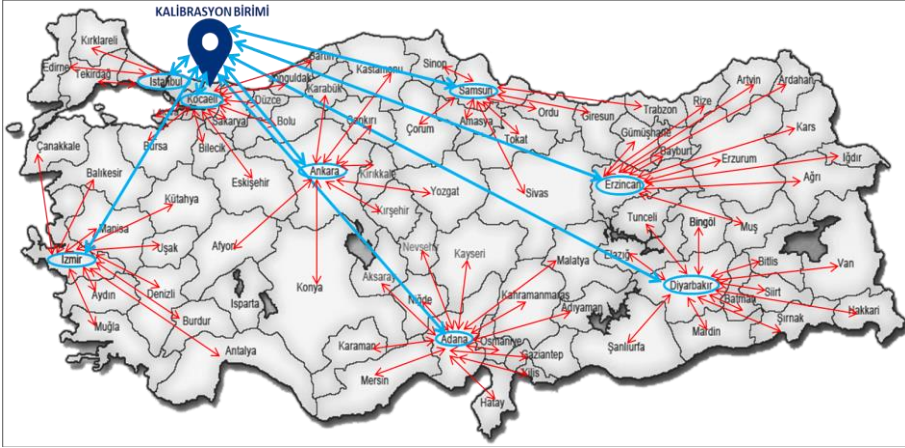
İki kademeli LRP için geliştirilen bütünleşik model, ülkemizdeki bir Bakanlığa ait 81 İl Müdürlüğünde denetim faaliyetleri için kullanılan bir test cihazının kalibrasyon ve yazılım güncellenmesine yönelik gerçek bir taşıma ağı problemine uygulanmıştır. Aşağıda öncelikle mevcut taşıma ağına dair bilgiler verilmiş, daha sonra uygulama problemi için geliştirilen taşıma ağına ilişkin çözüm sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

#### 3.1. Uygulama Probleminde Mevcut Taşıma Ağı

Uygulama probleminde mevcut taşıma ağı 81 ili kapsamakta olup, İl Müdürlüklerinde denetim faaliyetleri için kullanılan dizüstü bilgisayar ebatlarındaki bir test cihazının kalibrasyon ve yazılım güncelleme işlemleri için Kocaeli ilindeki

Kalibrasyon Birimine taşınması ve bu işlemlerin tamamlanmasının ardından cihazların tekrar İl Müdürlüklerine sevkini içermektedir. Bakanlık tarafından yılda iki defa hazırlanan çizelge çerçevesinde, 81 ilde bulunan tüm test cihazları İl Müdürlüklerine ait minibüs araçlarla öncelikle Bakanlığın belirlemiş olduğu 8 bölge ile taşınmaktadır. Mevcut taşıma ağında bölge iller Adana, Ankara, Diyarbakır, Erzincan, İstanbul, İzmir, Kocaeli ve Samsun şeklinde belirlenmiştir. İl Müdürlükleri kendi test cihazlarının kalibrasyon ve güncelleme işlemlerinin yapılmasını isteyen talep merkezlerini, bölge iller AKM'leri, Kocaeli ilinde bulunan Kalibrasyon Birimi ise hedef noktayı temsil etmektedir. Her bir bölge ile belirli sayıda İl Müdürlüğü bağlanmıştır. Bölge iller, kendi cihazları ile birlikte bu bölge ile bağlı olan tüm illerin cihazlarını Kocaeli ilindeki Kalibrasyon Birimine götürmektedir. Bakanlık tarafından hazırlanan çizelgeye uygun olarak, bir bölge ile ait cihazların kalibrasyon ve yazılım güncellemelerinin iki hafta süre zarfında gerçekleştirilmesinin ardından, bölge ilden gelen personel cihazları Kalibrasyon Biriminden teslim alarak tekrar kendi iline dönmektedir. Cihazların sahipleri olan İl Müdürlükleri ise tekrar bağlı olduğu bölge ile giderek cihazları teslim alıp iline dönmektedir. 81 ilde gerçekleştirilen bu taşıma faaliyeti yılda iki defa tekrarlanmaktadır. Tüm noktalar arasındaki taşımaların gidiş-dönüş şeklinde doğrudan gerçekleştirildiği mevcut taşıma ağının genel görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Şekildeki çift yönlü oklar, ilgili noktalar arasındaki gidiş-dönüş rotalarını temsil etmektedir.

Şekil 3: Mevcut Taşıma Ağının Genel Görünümü



Söz konusu çalışma 2019 yılında gerçekleştirilmiş olup, mevcut taşıma ağında katedilen toplam mesafeyi hesaplamak için Karayolları Genel Müdürlüğü'nün resmi web sayfasında bulunan iller arası mesafe verileri esas alınmıştır (KGM, 2019). Mesafe matrisinde şehir merkezleri arasındaki mesafeler kullanılmış ve taşıma araçlarının şehir içi hareketlerinde katettikleri mesafeler hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Kalibrasyon Birimine olan mesafelerde ise illerin Kocaeli'ne uzaklığı esas alınmıştır. Kalibrasyon Biriminin bulunduğu Kocaeli'nin bu birime mesafesi 5

km olarak alınmıştır. Tablo 1’de illerin plaka kodları, Tablo 2’de ise iki kademeli taşıma ağındaki mevcut AKM’ler, her bir AKM’ye bağlı olan iller (plaka kodları) ve AKM-talep merkezi ile AKM-Kalibrasyon Birimi turlarının mesafeleri (km) verilmiştir.

**Tablo 1: İllerin Plaka Kodları**

Plaka Kodu	İl Adı	Plaka Kodu	İl Adı	Plaka Kodu	İl Adı	Plaka Kodu	İl Adı
1	Adana	22	Edirne	43	Kütahya	64	Uşak
2	Adıyaman	23	Elazığ	44	Malatya	65	Van
3	Afyon	24	Erzincan	45	Manisa	66	Yozgat
4	Ağrı	25	Erzurum	46	Kahramanmaraş	67	Zonguldak
5	Amasya	26	Eskişehir	47	Mardin	68	Aksaray
6	Ankara	27	Gaziantep	48	Muğla	69	Bayburt
7	Antalya	28	Giresun	49	Muş	70	Karaman
8	Artvin	29	Gümüşhane	50	Nevşehir	71	Kırıkkale
9	Aydın	30	Hakkâri	51	Niğde	72	Batman
10	Balıkesir	31	Hatay	52	Ordu	73	Şırnak
11	Bilecik	32	Isparta	53	Rize	74	Bartın
12	Bingöl	33	Mersin	54	Sakarya	75	Ardahan
13	Bitlis	34	İstanbul	55	Samsun	76	İğdır
14	Bolu	35	İzmir	56	Siirt	77	Yalova
15	Burdur	36	Kars	57	Sinop	78	Karabük
16	Bursa	37	Kastamonu	58	Sivas	79	Kilis
17	Çanakkale	38	Kayseri	59	Tekirdağ	80	Osmaniye
18	Çankırı	39	Kırklareli	60	Tokat	81	Düzce
19	Çorum	40	Kırşehir	61	Trabzon		
20	Denizli	41	Kocaeli	62	Tunceli		
21	Diyarbakır	42	Konya	63	Şanlıurfa		

Mevcut taşıma ağında cihazların talep merkezlerinden bağlı buldukları AKM'lere doğrudan taşınmasında (AKM-talep merkezleri turlarında) katedilen toplam mesafe 33,754 km olup 73 araç ile gerçekleştirilmektedir. AKM'ler ile Kalibrasyon Birimi arasındaki turlarda ise 8 araçla katedilen toplam mesafe 9,086 km'dir. Dolayısıyla, talep merkezlerinden toplanan cihazların kalibrasyon ve yazılım güncellemeleri için AKM'ler aracılığıyla Kalibrasyon Birimine taşınması sürecinde toplam 81 araç kullanılarak 42,840 km mesafe katedilmektedir. Kalibrasyon ve yazılım güncellemeleri tamamlanan cihazların Kalibrasyon Biriminden AKM'lere ve buradan talep merkezlerine taşınmasında da yine 42,840 km katedileceğinden dolayı, mevcut taşıma ağında tüm taşıma sürecinin toplam 85,680 km mesafe ve 81 araçla gerçekleştirildiği görülmektedir.

**Tablo 2: Mevcut Taşıma Ağında Mesafeler**

AKM	AKM'ye Atanan Talep Merkezleri	Tur Mesafeleri	
		(1)	(2)
İzmir	7, 9, 10, 15, 17, 20, 32, 43, 45, 48, 64	5,712	906
Kocaeli	11, 14, 16, 26, 54, 67, 74, 77, 81	2,732	10
İstanbul	22, 39, 59	1,144	222
Adana	2, 27, 31, 33, 38, 44, 46, 50, 51, 68, 70, 79, 80	6,236	1,674
Erzincan	4, 8, 25, 29, 36, 49, 53, 69, 75, 76	6,472	1,852
Ankara	3, 18, 37, 40, 42, 66, 71, 78	3,138	684
Samsun	5, 19, 28, 52, 57, 58, 60, 61	3,402	1,246
Diyarbakır	12, 13, 23, 30, 47, 56, 62, 63, 65, 72, 73	4,918	2,492
<b>Kalibrasyon Birimine Taşıma Sürecinde Toplam Mesafe</b>		<b>33,754</b>	<b>9,086</b>
<b>Tüm Taşıma Süreci Boyunca Toplam Mesafe</b>		<b>67,508</b>	<b>18,172</b>

(1) AKM-Talep Merkezi Turlarının Toplam Mesafesi

(2) AKM-Kalibrasyon Birimi Turlarının Toplam Mesafesi

### 3.2. Uygulama Problemi İçin Modelin Çözüm Sonuçları

81 ilin bulunduğu uygulama probleminde düğüm sayısı  $n=82$ , aday AKM sayısı ise  $m=81$ 'dir. Modelde talep merkezleri için illerin plaka kodu kullanılmış, hedef nokta olan Kalibrasyon Birimi ise 82 olarak numaralandırılmıştır. Modelde yer alan düğümler  $i, j=1,2,\dots,82$ , AKM'ler  $k=1,2,\dots,81$ , turlar  $l=1,2,3$  ve hedef noktanın bulunduğu şehir olarak Kocaeli  $h=41$  şeklindedir.  $C_{ij}$  mesafe matrisi simetrik olup, iller arası mesafe verileri Karayolları Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Modelde her bir AKM ile bu AKM'ye atanabilecek talep merkezleri arasındaki maksimum mesafeyi gösteren  $f$  parametre değerinin belirlenmesinde, Karayolları Trafik Yönetmeliğindeki "24 saatlik herhangi bir süre içinde, toplam olarak en fazla 9 saat ve devamlı olarak en fazla 4.5 saat" şeklinde belirtilen araç kullanma sürelerine ilişkin kısıtlar göz önünde bulundurulmuştur.  $f$  değeri, taşımada kullanılan minibüslerin ortalama 80 km hız ile 4.5 saat devamlı seyahat halinde kat edecekleri mesafe olan 360 km olarak belirlenmiştir. AKM ile talep merkezleri arasındaki her bir turun maksimum toplam mesafesini gösteren  $d$  parametresinin değeri ise toplam 9 saat süre ve 80 km ortalama hız için 720 km şeklinde belirlenmiştir.  $f$  ve  $d$  parametrelerine ait bu değerler göz önünde bulundurularak,  $r$  parametresi ile gösterilen AKM-talep merkezleri için oluşturulacak maksimum tur sayısı 3 olarak modele girilmiştir. Kalibrasyon Birimine gidiş-dönüş turu hariç olmak üzere, açılmasına karar verilen her bir AKM için en az 1, en fazla 3 tur oluşturulacaktır.

Modelin amaç fonksiyonunda birinci öncelikli amaç için kullanılan ağırlığı temsil eden  $a$  parametresinin değeri 10 olarak alınmıştır. Geliştirilen matematiksel model, AIMMS 4.64 optimizasyon yazılımı ile Intel i7 (2.70 GHz) ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayar üzerinde çözülmüştür. Çalışmada ele alınan uygulama probleminin büyük ölçekli ve çözümünü zor bir problem olması nedeniyle modelin çalışma süresi 24 saat (86,400 saniye) ile sınırlandırılmıştır.

Farklı amaç fonksiyonlarının çözüm üzerindeki etkisini gösterebilmek amacıyla, modelde kullanılan ve  $Z_1$  ile gösterilen amaç fonksiyonunun yanı sıra, aşağıda verilen çeşitli amaç fonksiyonları için model 24 saat boyunca çalıştırılmıştır.  $Z_2$  amaç fonksiyonunda sadece katedilen toplam mesafe minimize edilmiştir.  $a$  parametresinin etkisini incelemek amacıyla  $Z_3$  amaç fonksiyonunda  $a = 1$  olarak alınmıştır. Son olarak,  $Z_4$  amaç fonksiyonunda ise yeterince büyük bir ağırlık vermek suretiyle taşımada kullanılan araç sayısı birinci öncelikli amaç haline getirilmiştir.

$$\text{Min } Z_1 = a \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} \cdot X_{ijk} + \sum_{k=1}^m S_k + \sum_{k=1}^m Y_k \quad (a = 10) \quad (31)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} \cdot X_{ijk} \quad (32)$$

$$\text{Min } Z_3 = a \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} \cdot X_{ijk} + \sum_{k=1}^m S_k + \sum_{k=1}^m Y_k \quad (a = 1) \quad (33)$$

$$\text{Min } Z_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} \cdot X_{ijk} + a \cdot \left( \sum_{k=1}^m S_k + \sum_{k=1}^m Y_k \right) \quad (a = 10.000) \quad (34)$$

Her bir amaç fonksiyonu için modelin 24 saatlik çalışma süresi boyunca optimal çözüm elde edilememiş; bu süre sonunda bulunan en iyi çözüm sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Modelde önerilen  $Z_1$  amaç fonksiyonu ile bulunan en iyi çözüme göre, AKM-talep merkezleri arasındaki turların toplam mesafesi 13,717 km ve AKM-Kalibrasyon Birimi arasındaki turların toplam mesafesi 11,804 km olmak üzere, Kalibrasyon Birimine taşıma sürecinde toplam 32 araç kullanılarak katedilen toplam mesafe 25,521 km'dir. 24 saatlik çözüm süresi kısıtı altında diğer amaç fonksiyonları daha yüksek taşıma mesafeleri ve araç sayıları ile sonuçlanmıştır.

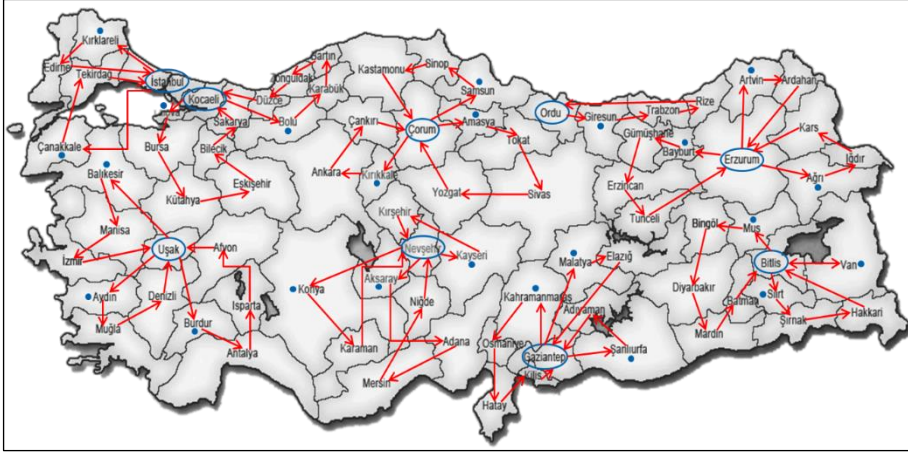
**Tablo 3: Çeşitli Amaç Fonksiyonları İçin Uygulama Problemi Çözüm Sonuçları**

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
Amaç Fonksiyonu Değeri	255,242	29,051	29,557	368,080
En İyi Alt Sınır	206,929	20,710	20,712	243,304
En İyi Alt Sınırdan % Fark	18.93	28.71	29.92	33.90
Açılan AKM Sayısı	9	12	14	12
AKM-Talep Merkezi Tur Sayısı	23	26	24	22
Kullanılan Toplam Araç Sayısı	32	38	38	34
Kalibrasyon Birimine Taşıma Sürecinde Toplam Mesafe	25,521	29,051	29,519	28,080
Kısıt Sayısı	1,602,265			
Değişken Sayısı	2,106,732			
Tamsayılı Değişken Sayısı	2,106,567			

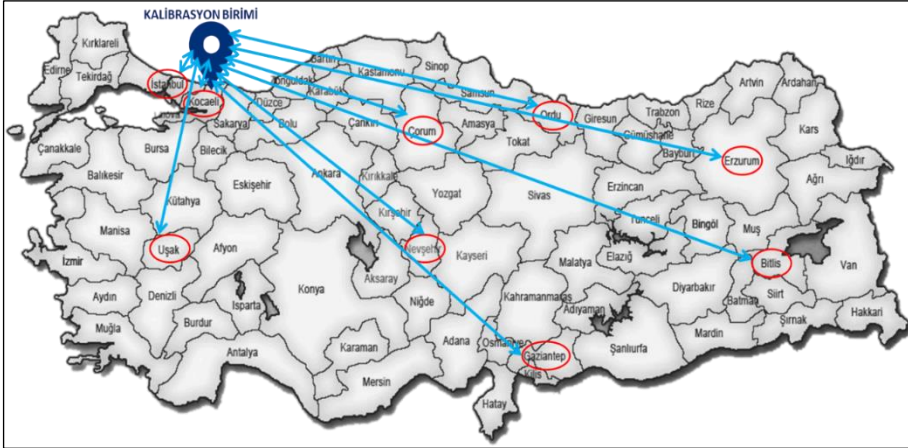
### 3.3. Uygulama Problemi İçin Geliştirilen Taşıma Ağı

Uygulama problemi için önerilen modelle oluşturulan taşıma ağında Bitlis, Çorum, Erzurum, Gaziantep, İstanbul, Kocaeli, Nevşehir, Ordu ve Uşak olmak üzere 9 AKM belirlenmiştir. Şekil 4'te AKM'ler ile talep merkezleri arasındaki 23 turun, Şekil 5'te ise AKM'ler ile Kalibrasyon Birimi arasındaki 9 turun Türkiye haritasında genel görünümü verilmiştir.

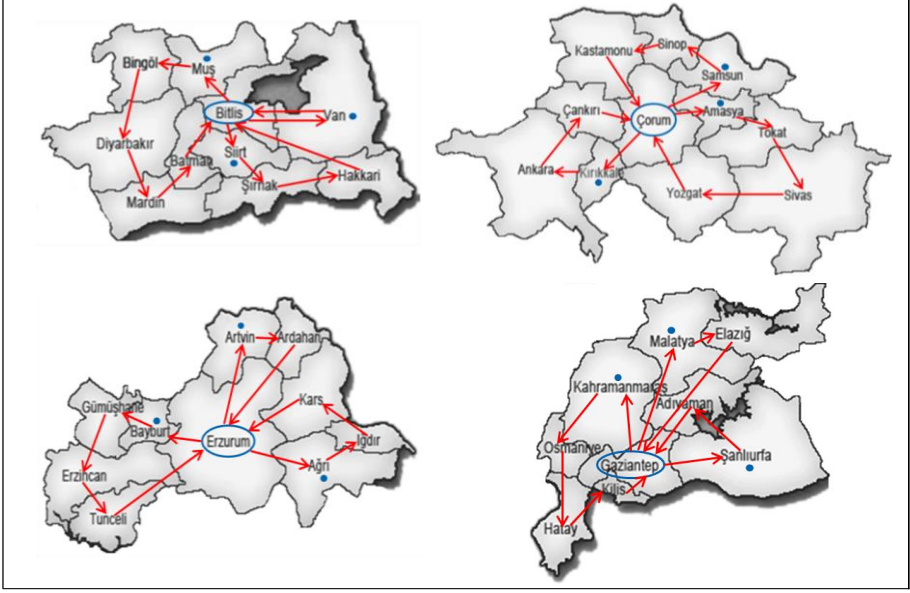
Şekil 4: AKM-Talep Merkezi Arasındaki Turların Genel Görünümü



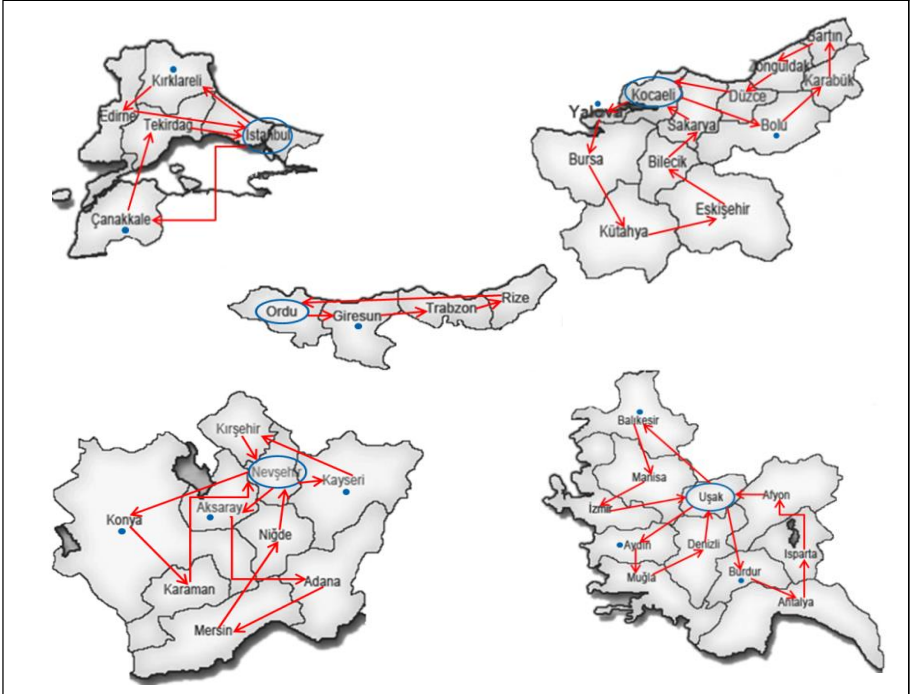
Şekil 5: AKM-Kalibrasyon Birimi Arasındaki Turların Genel Görünümü



**Şekil 6: AKM'ler ve Araç Rotaları – Bitlis, Çorum, Erzurum, Gaziantep**



**Şekil 7: AKM'ler ve Araç Rotaları - İstanbul, Kocaeli, Nevşehir, Ordu, Uşak**



Açılan AKM'ler, bu AKM'lere atanan iller ve oluşturulan araç rotalarına ilişkin haritalar Şekil 6 ve 7'de, modelin ayrıntılı çözüm sonuçları ise Tablo 4'te gösterilmiştir. Elde edilen çözüme göre Bitlis AKM'ye bağlı üç tur açılmış, birinci tur Siirt ilinde başlayıp yine bu ilde bitmiştir. İkinci tur Van ilinde başlayıp bitmiştir. Üçüncü tur ise Muş ilinde başlayıp sona ermiştir. AKM'ler için belirlenen maksimum tur sayısına bağlı olarak her bir AKM için en fazla üç turun oluşturulduğu görülmektedir. İstanbul ve Kocaeli AKM'ye bağlı iki tur, Ordu AKM için ise sadece bir tur açılmıştır.

**Tablo 4: Uygulama Problemi Çözüm Sonuçları**

AKM	Talep Merkezleri	AKM-Talep Merkezleri Arasında Oluşturulan Turlar	Tur Mesafeleri	
			(1)	(2)
13 Bitlis	12, 21, 30,	1 56→73→30→13→56	716	2,782
	47, 49, 56,	2 65→13→65	326	
	65, 72, 73	3 49→12→21→47→72→13→49	716	
19 Çorum	5, 6, 18, 37,	1 71→6→18→19→71	527	1,006
	55, 57, 58,	2 5→60→58→66→19→5	646	
	60, 66, 71	3 55→57→37→19→55	707	
25 Erzurum	4, 8, 24, 29,	1 4→76→36→25→4	672	2,232
	36, 62, 69,	2 69→29→24→62→25→69	710	
	75, 76	3 8→75→25→8	575	
27 Gaziantep	2, 23, 31,	1 46→80→31→79→27→46	519	2,000
	44, 46, 63,	2 63→2→27→63	399	
	79, 80	3 44→23→27→44	684	
34 İstanbul	17, 22, 39,	1 39→22→34→39	503	222
	59	2 17→59→34→17	636	
41 Kocaeli	11, 14, 16,	1 77→16→43→26→11→54→41→77	608	10
	26, 43, 54,	2 14→78→74→67→81→41→14	680	
	67, 74, 77, 78, 81			
50 Nevşehir	1, 33, 38,	1 68→1→33→51→50→68	693	1,240
	40, 42, 51,	2 38→40→50→38	306	
	68, 70	3 42→70→50→42	600	
52 Ordu	28, 53, 61	1 28→61→53→52→28	510	1,548
64 Uşak	3, 7, 9, 10,	1 15→7→32→3→64→15	707	764
	15, 20, 32,	2 9→48→20→64→9	667	
	35, 45, 48	3 10→45→35→64→10	610	
<b>Kalibrasyon Birimine Taşıma Sürecinde Toplam Mesafe</b>			<b>13,717</b>	<b>11,804</b>
<b>Tüm Taşıma Süreci Boyunca Toplam Mesafe</b>			<b>27,434</b>	<b>23,608</b>

(1) AKM-Talep Merkezi Turlarının Toplam Mesafesi

(2) AKM-Kalibrasyon Birimi Turlarının Toplam Mesafesi

Mevcut taşıma ağında 73 araç ile gerçekleştirilen AKM-talep merkezleri turlarında katedilen toplam mesafe 33,754 km, AKM-Kalibrasyon Birimi arasındaki turlarda ise 8 araçla katedilen toplam mesafe 9,086 km'dir. Talep merkezlerinden toplanan cihazların AKM'ler aracılığıyla Kalibrasyon Birimine taşınması sürecinde toplam 81 araç kullanılarak 42,840 km mesafe katedilmektedir. Dolayısıyla, mevcut taşıma



ağında tüm taşıma sürecinin toplam 85,680 km mesafe ve 81 araçla gerçekleştirildiği görülmektedir. Çalışmada önerilen modelin çözümü sonucunda elde edilen taşıma ağı tasarımında ise Tablo 4'te özetlenen sonuçlardan görülebileceği üzere, AKM-talep merkezleri turlarında katedilen toplam mesafe 13,717 km olup 23 araç ile gerçekleştirilmektedir. AKM'ler ile Kalibrasyon Birimi arasındaki turlarda ise 9 araçla katedilen toplam mesafe 11,804 km'dir. Dolayısıyla, kalibrasyon ve yazılım güncellemeleri için talep merkezlerinden toplanan cihazların AKM'ler aracılığıyla Kalibrasyon Birimine taşınması sürecinde toplam 32 araç kullanılarak 25,521 km mesafe katedilmektedir. Kalibrasyon ve yazılım güncellemeleri tamamlanan cihazların Kalibrasyon Biriminden AKM'lere ve buradan talep merkezlerine taşınmasında da yine 25,521 km katedileceğinden dolayı, geliştirilen taşıma ağında tüm taşıma süreci toplam 51,042 km mesafe ve 32 araçla gerçekleştirilecektir.

Açılan AKM sayısı, turların toplam mesafesi, katedilen toplam mesafe ve kullanılan toplam araç sayısı bakımından mevcut ve geliştirilen taşıma ağına ilişkin sonuçlar Tablo 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Mevcut taşıma ağı ile kıyaslandığında, önerilen modelle oluşturulan taşıma ağında tüm taşıma süreci boyunca katedilen toplam mesafede %40.4, AKM ile talep merkezi arasındaki turların toplam mesafesinde %59.4, kullanılan araç sayısında ise %60.5 oranında iyileşme sağlanmıştır. Açılan AKM sayısı ile AKM-Kalibrasyon Birimi arasındaki turların toplam mesafesinde ise artış söz konusudur.

**Tablo 5: Mevcut ve Geliştirilen Taşıma Ağlarının Karşılaştırılması**

	Mevcut Taşıma Ağı	Geliştirilen Taşıma Ağı	İyileşme Oranı (%)
Açılan AKM Sayısı	8	9	% 12.5 ↑
AKM-Talep Merkezi Turlarının Toplam Mesafesi	67,508	27,434	% 59.4 ↓
AKM-Kalibrasyon Birimi Turlarının Toplam Mesafesi	18,172	23,608	% 29.9 ↑
<b>Tüm Taşıma Süreci Boyunca Katedilen Toplam Mesafe</b>	<b>85,680</b>	<b>51,042</b>	<b>% 40.4 ↓</b>
<b>Kullanılan Toplam Araç Sayısı</b>	<b>81</b>	<b>32</b>	<b>% 60.5 ↓</b>

#### 4. TARTIŞMA

İçerdiği lokasyon ve rotalama problemlerinin NP-zor olması nedeniyle LRP de NP-zor bir problemdir (Nagy ve Salhi, 2007: 650). Bu tür problemlerin çözümünde sezgisel yöntemler ön plana çıkmakla birlikte, çalışmada önerilen bütünlüklü matematiksel model ile orta/uzun vadeli bir karar problemi için makul sayılabilecek bir süre içerisinde yüksek düzeylerde iyileştirme sağlayan çözüm elde edilebilmiştir. Geliştirilen taşıma ağı tasarımı ile mevcut taşıma süreci çok daha az kaynak kullanımı ve taşıma mesafeleri ile gerçekleştirilebilecektir.

İki kademeli LRP için geliştirilen bütünleşik model ile elde edilen taşıma ağında AKM'ler ile AKM'lere atanan talep merkezleri yeniden belirlenmiş ve cihazların her bir AKM-talep merkezi arasında doğrudan taşınması yerine araç rotalamadan yararlanılmıştır. Geliştirilen taşıma ağı tasarımında AKM sayısı 8'den 9'a yükselmiştir. Ancak, uygulama probleminde AKM'ler birer transfer noktası rolü üstlenen mevcut İl Müdürlükleri olduğu için AKM sayısının artması maliyeti arttıran bir unsur değildir. LRP ile ilgili literatür çalışmasında Nagy ve Salhi (2007: 665-666), çok kademeli LRP ile ilgili bazı özel uygulama problemlerinden bahsederek, transfer noktalarına ilişkin tesis maliyetlerinin ihmal edilebileceği bu problemlerde, transfer noktası lokasyonlarının sıklıkla ve kolay bir şekilde değiştirilerek yeniden belirlenebileceğini belirtmiştir. Çalışmada incelenen problemde de AKM yerlerinin değiştirilerek atamaların yeniden belirlenmesi kolaylıkla mümkündür. Dolayısıyla, çalışmada geliştirilen taşıma ağı ek bir maliyete katlanmaksızın kısa sürede doğrudan uygulamaya geçirilebilecek niteliktedir.

Çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP, özgün bir uygulama örneğine dayandığı için literatürdeki çalışmalarla doğrudan kıyaslanabilir sonuçlar bulunmamaktadır. Bununla birlikte, lokasyon ve rotalama kararlarının bir arada ele alındığı bütünleşik yaklaşımın çözüm kalitesi üzerindeki etkisi açısından literatürdeki daha önceki çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Ahmadi-Javid vd. (2018), kâr maksimizasyonuna yönelik LRP ile ilgili test problemleri üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, hiyerarşik çözüm yaklaşımına göre lokasyon, rotalama ve fiyatlandırma problemlerinin bütünleşik bir şekilde çözülmesi halinde ortalama %51.23 oranında iyileştirmenin sağlandığını belirtmiştir. Bu çalışmada ele alınan iki kademeli LRP için, katedilen toplam mesafede sağlanan yüksek düzeydeki iyileştirmede AKM-talep merkezi arasında oluşturulan araç rotalarının etkili olduğu görülmektedir. AKM lokasyonlarının yeniden belirlenmesi ile AKM-Kalibrasyon Birimi arasındaki turların toplam mesafesi mevcut taşıma ağına göre %29.9 oranında artmıştır. Ancak, AKM-talep merkezleri arasında mevcut uygulamadaki doğrudan taşıma yerine araç rotalamadan kaynaklanan %59.4 oranında iyileştirme sayesinde taşıma ağı boyunca katedilen toplam mesafe önemli ölçüde azalmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, ağ tasarımı sürecinde lokasyon ve rotalama kararlarının bütünleşik bir şekilde ele alınmasının sistem performansı üzerindeki etkisini gerçek bir uygulama örneği üzerinden ortaya koyması açısından da önemlidir.

## **SONUÇ**

Birbiriyle doğrudan ilişkili olan lokasyon ve rotalama kararlarının bir arada ele alındığı LRP, stratejik ve taktik düzeydeki lojistik planlama kararlarına yönelik en önemli optimizasyon problemlerinin başında gelmektedir. Bu çalışmada, uygulamada karşılaşılan gerçek bir taşıma ağının özelliklerinden yola çıkılarak iki kademeli özgün bir LRP tanımlanmıştır. Problemin içerdiği TLP ve ARP ortamı ile ilgili farklı özelliklere bağlı olarak literatürdeki çalışmalarda çok çeşitli LRP türünün incelendiği görülmektedir. Ancak, bu çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP'nin tüm özelliklerini içeren bir probleme ve bütünleşik matematiksel modele rastlanmamıştır. İki kademeli LRP'nin bütünleşik olarak çözümü için, taşıma ağı

boyunca katedilen toplam mesafe ve kullanılan araç sayısını minimize etmeye yönelik bir tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Tek atamalı kapasite kısıtsız AKM lokasyon ve mesafe kısıtlı ARP çerçevesinde tanımlanan iki kademeli LRP için geliştirilmiş olan bütünlük modelin, bu çalışmada incelenen uygulama probleminin yanı sıra, benzer özellikleri taşıyan iki kademeli ağ tasarım problemlerine uyarlanarak kullanılması mümkündür.

Çalışmada tanımlanan iki kademeli LRP'de AKM'ler, hedef nokta ile talep merkezleri arasında ürünlerin taşınmasında bir transfer noktası rolü üstlenmektedir. Problemin içerdiği TLP çerçevesinde AKM'ler belirlenerek maksimum mesafe kısıtını aşmayacak şekilde talep merkezleri tek atamalı olarak açılan AKM'lere tahsis edilmiştir. Ele alınan uygulama probleminin özelliklerinden yola çıkılarak, literatürdeki kapalı uçlu ARP için sabit ve değişken kapalı uçlu rotalama tanımı yapılmıştır. AKM'ler ile talep merkezleri arasında oluşturulacak turların toplam uzunluğu için yine maksimum mesafe kısıtları göz önünde bulundurularak mesafe kısıtlı ARP çerçevesinde değişken kapalı uçlu turlar belirlenmiştir. Hedef nokta ile AKM'ler arasındaki rotalar tek bir araçla gidiş-dönüş şeklinde, AKM ile talep merkezleri arasındaki rotalar ise birden çok araçla ve birden çok talep merkezini içerebilecek şekilde oluşturulmuştur.

Geliştirilen bütünlük model, ülkemizdeki bir kamu kurumunun taşıma ağı probleminde uygulanmıştır. Modelin çözümü sonucunda elde edilen taşıma ağına, mevcut taşıma ağına göre katedilen toplam mesafe %40.4, AKM ile talep merkezi arasındaki turların toplam mesafesi %59.4 ve kullanılan araç sayısı %60.5 oranında azaltılmıştır. Çalışmada önerilen bütünlük model ile elde edilen taşıma ağı tasarımı yoluyla hem katedilen toplam mesafe hem de kullanılan araç sayısı bakımından önemli düzeyde bir maliyet tasarrufunun ve kaynak kullanımında verimliliğin sağlanabileceği gösterilmiştir.

İki kademeli LRP'nin çözümü için geliştirilen model; AKM-talep merkezleri arasında oluşturulabilecek maksimum tur sayısı, AKM-talep merkezleri arasındaki maksimum mesafe ve her bir araç rotasının maksimum uzunluğu ile ilgili kısıtlar içermektedir. Literatürde LRP ile ilgili daha önceki çeşitli çalışmalarda da benzer kısıtlar dikkate alınmıştır. Modelde  $r$ ,  $f$  ve  $d$  olarak gösterilen parametre değerlerinin, uygulama probleminin özellikleri doğrultusunda önceden belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, söz konusu parametre değerlerinin çözüm kalitesi üzerindeki etkisi ayrıca incelenmemiştir. Ayrıca, çalışmada ele alınan uygulama probleminin büyük ölçekli ve çözümü zor bir problem olması nedeniyle modelin çalışma süresi 24 saat ile sınırlandırılmıştır. Mevcut taşıma ağına göre yüksek düzeylerde iyileştirme elde edilmekle birlikte, modelin çalıştırıldığı süre boyunca optimal çözüm elde edilememiştir.

Geliştirilen modelin sınırlılıklarından bir diğeri ise araç rotalamasının sadece AKM-talep merkezleri arasında yapılmış olmasıdır. Çalışmada incelenen uygulama probleminde transfer noktalarının sayısı az olduğu için, çözüm karmaşıklığını arttırmamak amacıyla AKM-hedef nokta arasındaki taşımaların mevcut uygulamada

olduğu gibi doğrudan gidiş-dönüş şeklinde yapılacağı varsayılmıştır. Modelin, AKM'ler ile hedef nokta arasındaki araç rotalamayı da içerecek şekilde daha genel nitelikteki iki kademeli LRP'nin çözümü için genişletilmesi ileriye yönelik bir araştırma konusu olarak önerilmektedir. Aynı zamanda, modelde ürünlerin tek bir AKM üzerinden hedef noktaya ulaştırılacağı varsayılmıştır. AKM'ler arasında geçişe ve ürün transferine imkân tanıyan farklı ağ tasarımlarının geliştirilmesi de gelecek araştırma önerileri arasındadır. Çalışmada ele alınan test cihazının kalibrasyon ve yazılım güncellenmesi için hedef noktaya taşınması faaliyeti, birbirinden bağımsız bir şekilde ülkemizdeki üç farklı kamu kurumunda daha gerçekleştirilmektedir. Uygulamaya yönelik bir çalışma konusu olarak, söz konusu kurumlardaki taşıma faaliyetlerini bir arada ele alan bütünleşik tek bir taşıma ağının tasarlanması önerilmektedir.

Çalışmada incelenen LRP'nin çözümü zor bir problem olması nedeniyle literatürdeki çalışmalarda sezgisel yöntemlerin ön plana çıktığı görülmektedir. Problemin kapsamının, yukarıda değinilen araştırma önerilerinde olduğu gibi daha ileri düzeydeki durumları ele alacak şekilde genişletilmesi halinde, kesin çözüm yöntemlerinin sınırlılıkları nedeniyle problem için sezgisel çözüm yöntemlerinin geliştirilmesinin daha uygun olacağı söylenebilir.

## **INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL FOR TWO-ECHELON LOCATION-ROUTING PROBLEM AND APPLICATION IN A PUBLIC INSTITUTION**

### **1. INTRODUCTION**

Reducing non-value-added costs and increasing efficiency are among the most critical objectives in the logistics system design and planning. The transportation costs often constitute the highest cost component in a logistics system. The reduction of redundant transportation activities through an efficient logistics network design can offer significant cost reduction and improvement for system performance. The facility location problem (FLP) and vehicle routing problem (VRP) are two closely interrelated problems in the logistics network design. The integrated problem is referred to as location-routing problem (LRP), in which location and vehicle routing decisions are simultaneously considered while designing the logistics network. The LRP consists of determining the locations of facilities, allocation of customers to these facilities, and generating vehicle routes to serve them.

This paper is concerned with two-echelon LRP, which can be viewed as an extension of the classical single-echelon problem. In the two-echelon LRP, the transfer centers (TC) play the role of intermediate transfer points in the transportation process of products between the target point and demand centers. Thus, two types of vehicle routes exist in the transportation network: (i) TC-demand center tours, and (ii) TC-target point tours. In the paper, we have defined variable

closed vehicle routing for the first tour type. The addressed two-echelon LRP consists of (i) determining both the number and location of TCs, (ii) assigning the demand centers to TCs, and (iii) generating multiple vehicle routes for each one of TCs to serve demand centers.

As a special case of LRP, many variations of both FLP and VRP have been extensively studied over the past years, which resulted in a wide variety of LRP types addressed in the literature. However, the majority of the studies has been devoted to the single-echelon LRP and focused on hierarchical solution approaches. Besides, the related literature reviews emphasize on the importance of application-oriented studies in this research field. A large part of the real-life applications has been focused on business logistics for consumer goods that have different properties from the problem addressed in this paper. To our knowledge, the two-echelon LRP defined in the paper has not been considered in the literature so far. The main contributions of the study are to introduce an original two-echelon LRP in line with the characteristics of a real transportation network encountered in a public institution, and to develop an integrated mathematical model that simultaneously solves subproblems of location and vehicle routing during logistics network design.

## **2. METHODS**

Due to the high interdependence between FLP and VRP, the hierarchical approaches that separate location and routing decisions often result in sub-optimal solutions. The aim of the study is to design a transportation network to minimize transportation costs through an integrated solution approach that simultaneously considers location and routing decisions in the two-echelon LRP. For this purpose, we have developed an integer linear programming model for the integrated solution of considered problem.

The model minimizes the total distance traveled along the transportation network as the primary objective, and the total number of used vehicles as the secondary one. The distance-constrained multiple vehicle routes between TCs and demand centers are generated, while TC-target point tours are in the form of round-trip. No capacity constraints exist for TCs and vehicles. Single assignment location problem is considered, in which each demand center is assigned to exactly one TC such that the distance between them cannot exceed a predefined value.

## **3. RESULTS**

We have implemented the proposed model to solve a real transportation network design problem, which is concerned with the calibration and software updating process of a test equipment that used for inspection activities in the 81 provincial directorates of a Ministry in Turkey. In the application problem, the calibration unit represent the target point while a number of 81 directorates are demand centers. The existing transportation network includes a total of eight TCs selected among provincial directorates. All TC-demand center and TC-target point tours are round-

trips with direct connection between paired nodes. Due to the non-value-added transportation activities, redundant transportation distances and costs have been observed in the existing network, in which a total distance of 85.680 km is incurred, and 81 vehicles are used throughout the entire transportation process.

The developed model has been coded in AIMMS optimization software. Since two-echelon LRP is an NP-hard problem which is difficult to solve optimality, the running time has been limited to 24 hours. The optimal solution has not been found for the problem instance solved, and the best result obtained within the time limit of 24-hour has been reported. The model has also been run by using various objective functions to show the impact of proposed objective function on the solution performance. The transportation network generated by the solution of the developed model has been compared with the existing network. The obtained network includes nine TCs and the entire transportation process is carried out with a total distance of 51.042 km and 32 vehicles. The proposed transportation network has improved the total distance traveled, the total distance of TC-demand center tours, and the total number of vehicles by 40.4%, 59.4%, and 60.5%, respectively.

#### **4. DISCUSSION**

Although there exist no directly comparable studies in the literature, the similar results have been obtained regarding the significant impact of the integrated approach on the solution quality. The number of TCs in the proposed transportation network has increased from eight to nine. However, an increase in the number of TCs does not increase the costs in the application problem, since the TCs are already existing provincial directorates which act as a transfer point and can easily be relocated. Compared to the existing network, the total distance of TC-target point tours has increased by 29.9%. Nevertheless, the total distance traveled along the transportation network has significantly decreased owing to the savings from generated vehicle routes instead of direct round-trips between TCs and demand centers.

#### **CONCLUSION**

In this paper, we have proposed an integer linear programming model for the integrated solution of two-echelon LRP. We have shown the high potential impact of integrated solution approach on the system performance by using a real-life problem. The compared results reveal that significant cost savings and resource efficiency can be achieved through proposed transportation network design obtained with integrated mathematical model.

The developed mathematical model has some assumptions and limitations. The parameter values related to the maximum number of tours that can be generated for each TC-demand centers, maximum distance between TC-demand centers, and maximum length of each vehicle route must be predetermined in accordance with the properties of the problem instance to be solved. Another limitation of the

developed model is that it only generates vehicle routings for the TC-demand center tours. The TC-target point tours have been determined in the form of round-trip as in the current transportation network. As a future research, we suggest extending the model to include vehicle routing between TCs and target point.

In the model, we have also assumed that the products at the demand centers will be transferred to the target point through only one TC. Different transportation network designs in which the product transfers and transitions between TCs are allowed can be investigated in a future study. Due to the limitations of exact solution methods, we also propose developing heuristics to deal with such extensions that are more complex to solve.

### KAYNAKÇA

- Abbassi, A., Kharraja, S., El Hilali Alaoui, A., Boukachour, J. ve Paras, D. (2021). Multi-Objective Two-Echelon Location-Distribution of Non-Medical Products. *International Journal of Production Research*, 59(17), 5284-5300.
- Ahmadi-Javid, A., Amiri, E. ve Meskar, M. (2018). A Profit-Maximization Location-Routing-Pricing Problem: A Branch-and-Price Algorithm. *European Journal of Operational Research*, 271(3), 866-881.
- Albareda-Sambola, M., Díaz, J. A. ve Fernández, E. (2005). A Compact Model and Tight Bounds for a Combined Location-Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 32(3), 407-428.
- Bala, K., Brcanov, D. ve Gvozdenović, N. (2017). Two-Echelon Location Routing Synchronized with Production Schedules and Time Windows. *Central European Journal of Operations Research*, 25(3), 525-543.
- Bektas, T. (2006). The Multiple Traveling Salesman Problem: An Overview of Formulations and Solution Procedures. *Omega*, 34(3), 209-219.
- Bellmore, M. ve Nemhauser, G. L. (1968). The Traveling Salesman Problem: A Survey. *Operations Research*, 16(3), 538-558.
- Berger, R. T., Coullard, C. R. ve Daskin, M. S. (2007). Location-Routing Problems with Distance Constraints. *Transportation Science*, 41(1), 29-43.
- Cao, J. X., Wang, X. ve Gao, J. (2021). A Two-Echelon Location-Routing Problem for Biomass Logistics Systems. *Biosystems Engineering*, 202, 106-118.
- Chan, Y. ve Baker, S. F. (2005). The Multiple Depot, Multiple Traveling Salesmen Facility-Location Problem: Vehicle Range, Service Frequency, and Heuristic Implementations. *Mathematical and Computer Modelling*, 41(8-9), 1035-1053.
- Cheng, C., Zhu, R., Costa, A. M., Thompson, R. G. ve Huang, X. (2021). Multi-Period Two-Echelon Location Routing Problem for Disaster Waste Clean-up. *Transportmetrica A: Transport Science*, doi: 10.1080/23249935.2021.1916644.
- Chopra, S. ve Meindl, P. (2013). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 5th Ed., USA: Pearson Education, Inc.
- Cuda, R., Guastaroba, G. ve Speranza, M. G. (2015). A Survey on Two-Echelon Routing Problems. *Computers & Operations Research*, 55, 185-199.

- Current, J., Daskin, M. ve Schilling, D. (2002). Discrete Network Location Models. Z. Drezner ve H. W. Hamacher (Ed.), *Facility Location: Applications and Theory* içinde, (s. 85-122). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Çetiner, S., Sepil, C. ve Süral, H. (2010). Hubbing and Routing in Postal Delivery Systems. *Annals of Operations Research*, 181(1), 109-124.
- Drexl, M. ve Schneider, M. (2015). A Survey of Variants and Extensions of the Location-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283-308.
- Fallahtafti, A., Ardjmand, E., Young li, W. A. ve Weckman, G. R. (2021). A Multi-Objective Two-Echelon Location-Routing Problem for Cash Logistics: A Metaheuristic Approach. *Applied Soft Computing*, 111, 107685.
- Ghiani, G., Laporte, G. ve Musmanno, R. (2013). *Introduction to Logistics Systems Management* (2nd Ed.). UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hines, P. ve Taylor, D. (2000). *Going Lean*. UK: Lean Enterprise Research Centre, Cardiff Business School.
- Jacobsen, S. K. ve Madsen, O. B. G. (1980). A Comparative Study of Heuristics for a Two-Level Routing-Location Problem. *European Journal of Operational Research*, 5(6), 378-387.
- Jünger, M., Reinelt, G. ve Rinaldi, G. (1995). The Traveling Salesman Problem. M. O. Ball, T. L. Magnanti, C. L. Monma ve G. L. Nemhauser (Ed.), *Handbooks in Operations Research and Management Science: Network Models* içinde, Vol. 7, (s. 225-230). Elsevier Science.
- Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I. ve Dengiz, B. (2012). The Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Formulations and a Heuristic Approach. *Omega*, 40(4), 465-477.
- KGM (2019), Karayolları Genel Müdürlüğü, İller Arası Mesafe Cetveli (01.01.2019), <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Root/Uzakliklar.aspx>, (Erişim T.: 22.11.2019).
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358.
- Laporte, G. ve Nobert, Y. (1981). An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs in Depot Location. *European Journal of Operational Research*, 6(2), 224-226.
- Laporte, G., Nobert, Y. ve Arpin, D. (1986). An Exact Algorithm for Solving a Capacitated Location-Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 6(9), 291-310.
- Laporte, G., Nobert, Y. ve Pelletier, P. (1983). Hamiltonian Location Problems. *European Journal of Operational Research*, 12(1), 82-89.
- Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S. ve Barreto, S. (2013). A Taxonomical Analysis, Current Methods and Objectives on Location-Routing Problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795-822.
- Madsen, O. B. G. (1983). Methods for Solving Combined Two Level Location-Routing Problems of Realistic Dimensions. *European Journal of Operational Research*, 12(3), 295-301.



- Mara, S. T. W., Kuo, R. J. ve Asih, A. M. S. (2021). Location-Routing Problem: A Classification of Recent Research. *International Transactions in Operational Research*, 28(6), 2941-2983.
- Maranzana, F. E. (1964). On the Location of Supply Points to Minimize Transport Costs. *Operational Research Quarterly*, 15(3), 261-270.
- Mirhedayatian, S. M., Crainic, T. G., Guajardo, M. ve Wallace, S. W. (2021). A Two-Echelon Location-Routing Problem with Synchronisation. *Journal of the Operational Research Society*, 72(1), 145-160.
- Nadizadeh, A. ve Hosseini Nasab, H. (2019). Modelling and Solving the Capacitated Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Demands. *International Journal of Transportation Engineering*, 6(3), 217-235.
- Nagy, G. ve Salhi, S. (2007). Location-Routing: Issues, Models and Methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649-672.
- Pichka, K., Bajgiran, A. H., Petering, M. E. H., Jang, J. ve Yue, X. (2018). The Two Echelon Open Location Routing Problem: Mathematical Model and Hybrid Heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 121, 97-112.
- Pitakaso, R., Sethanan, K. ve Theeraviriya, C. (2020). Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search for Solving Green 2-Echelon Location Routing Problem. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105406.
- Prodhon, C. ve Prins, C. (2014). A Survey of Recent Research on Location-Routing Problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1-17.
- Rahmani, Y., Ramdane Cherif-Khettaf, W. ve Oulamara, A. (2016). The Two-Echelon Multi-Products Location-Routing Problem with Pickup and Delivery: Formulation and Heuristic Approaches. *International Journal of Production Research*, 54(4), 999-1019.
- Salhi, S. ve Rand, G. K. (1989). The Effect of Ignoring Routes When Locating Depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150-156.
- Schneider, M. ve Drexl, M. (2017). A Survey of the Standard Location-Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 259(1), 389-414.
- Ting, C. J. ve Chen, C. H. (2013). A Multiple Ant Colony Optimization Algorithm for the Capacitated Location Routing Problem. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 34-44.
- Toth, P. ve Vigo, D. (2002). An Overview of Vehicle Routing Problems. P. Toth ve D. Vigo (Ed.), *The Vehicle Routing Problem* içinde, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, (s. 1-26). Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tuzun, D. ve Burke, L. I. (1999). A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 87-99.
- Vidović, M., Ratković, B., Bjelić, N. ve Popović, D. (2016). A Two-Echelon Location-Routing Model for Designing Recycling Logistics Networks with Profit: MILP and Heuristic Approach. *Expert Systems with Applications*, 51, 34-48.
- Von Boventer, E. (1961). The Relationship between Transportation Costs and Location Rent in Transportation Problems. *Journal of Regional Science*, 3(2), 27-40.

- Wang, Y., Assogba, K., Liu, Y., Ma, X., Xu, M. ve Wang, Y. (2018). Two-Echelon Location-Routing Optimization with Time Windows Based on Customer Clustering. *Expert Systems with Applications*, 104, 244-260.
- Wu, T. H., Low, C. ve Bai, J. W. (2002). Heuristic Solutions to Multi-Depot Location-Routing Problems. *Computers & Operations Research*, 29(10), 1393-1415.
- Yücel, A. (2016). *Mesafe Kısıtlı Çok Yönlü Kümelenmiş Açık Araç Rotalama Probleminin Genetik Algoritma ile Çözümü ve Bir Uygulama*, Doktora Tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Zhao, Q., Wang, W. ve De Souza, R. (2018). A Heterogeneous Fleet Two-Echelon Capacitated Location-Routing Model for Joint Delivery Arising in City Logistics. *International Journal of Production Research*, 56(15), 5062-5080.

<b>KATKI ORANI / CONTRIBUTION RATE</b>	<b>AÇIKLAMA / EXPLANATION</b>	<b>KATKIDA BULUNANLAR / CONTRIBUTORS</b>
Fikir veya Kavram / <i>Idea or Notion</i>	Araştırma hipotezini veya fikrini oluşturmak / <i>Form the research hypothesis or idea</i>	Yasemin YAVUZ
Tasarım / <i>Design</i>	Yöntemi, ölçeği ve deseni tasarlamak / <i>Designing method, scale and pattern</i>	Erkan ASLANTAŞ Yasemin YAVUZ
Veri Toplama ve İşleme / <i>Data Collecting and Processing</i>	Verileri toplamak, düzenlemek ve raporlamak / <i>Collecting, organizing and reporting data</i>	Erkan ASLANTAŞ
Tartışma ve Yorum / <i>Discussion and Interpretation</i>	Bulguların değerlendirilmesinde ve sonuçlandırılmasında sorumluluk almak / <i>Taking responsibility in evaluating and finalizing the findings</i>	Erkan ASLANTAŞ Yasemin YAVUZ
Literatür Taraması / <i>Literature Review</i>	Çalışma için gerekli literatürü taramak / <i>Review the literature required for the study</i>	Erkan ASLANTAŞ