

Kitle destekli dağıtım servis ağı tasarımı problemi Crowd-shipping service network design problem

Barış YILDIZ^{1*} 

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
byildiz@ku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.09.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 05.04.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 17.03.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.83809
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Şehir içi dağıtım faaliyetlerinin artan maliyetleri ve neden olduğu sorunlar (trafik, çevre kirliliği, gürültü, araç kazaları, vb.) hakkında artan kaygılar, bu alanda yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyacı giderek artırmaktadır. Ön plana çıkan söz konusu yaklaşımlardan birisi de Kitle destekli dağıtım (KDD) modelidir. Yolcu ve paket taşımacılığını bütünleştirerek atıl araç kapasitelerinin faydalı bir şekilde kullanılmasını amaçlayan bu modelde, kişilerin küçük ekonomik kazançlar sağlamak ve/veya dağıtım faaliyetlerinin çevreye verdiği zararları azaltılmasına katkı sunmak amacıyla kendi seyahatleri sırasında yolları üzerindeki servis noktaları arasında paket taşımacılığı yapması öngörülmektedir. Bu çalışmada, KDD faaliyetlerinin etkin bir şekilde yürütülmesi için gerekli olan servis noktalarının/paket otomatlarının şehrin hangi noktalarına hangi kapasiteler ile kurulması gerektiğini belirlemek için çözülmesi gereken stratejik seviye "KDD servis ağı tasarımı" problemini literatüre tanıtıyoruz. İki seviyeli, senaryo tabanlı belirsiz bir tamsayılı program olarak modellediğimiz problemin çözümü için etkin bir Benders Ayrıştırma algoritması önermekteyiz. Gerçekleştirdiğimiz geniş kapsamlı hesapsal çalışmalar geliştirdiğimiz çözüm yönteminin etkinliğini ortaya koymakta, önemli yönetsel çıkarımlar sunmaktadır. Elde ettiğimiz sonuçlar, hızlı paket taşımacılığı gibi oldukça zorlu ve maliyetli (ekonomik ve çevresel) bir dağıtım faaliyeti için iyi tasarlanmış bir KDD modelinin önemli kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir. Nispeten küçük sayıda (çalıştığımız problem örneklerinde en fazla 60 adet) servis noktaları ile dağıtımların önemli bir kısmının (çalıştığımız problem örneklerinde %56'ya kadar) "kitle" tarafından yapıldığı etkin bir KDD sisteminin teşkil edilebileceğini gösteren bu sonuçlar, önerilen yenilikçi yaklaşımın uygulanabilirliği konusunda önemli ipuçları vermektedir.

Anahtar kelimeler: Şehir içi lojistiği, Kitle destekli dağıtım, Belirsizlikte eniyileme, Benders ayrıştırma.

Abstract

With the rising concerns over the increasing costs and negative externalities of city logistics, the need for innovative approaches to come up with low-cost and environmentally friendly distribution systems is on the rise. One such innovative approach is crowd-shipping (CS). In this model, which aims to combine packet and passenger transfers to utilize redundant transportation capacity, the individuals who want to earn small compensations and/or help the environment are employed to carry out package transfers between service points on the paths of their already planned trips. In this study, we introduce the strategic level CS network design problem, which needs to be solved to determine the locations and the capacities of the service points in the urban area to establish an efficient CS delivery system. We propose a novel Benders Decomposition algorithm to solve this challenging problem that we model as a scenario-based two-stage stochastic integer program. The results of our comprehensive numerical experiments attest to the efficacy of the approach to solve practical size problem instances and provide significant managerial insights, showing that such a well-designed CS network can provide savings (in terms of both economic and environmental costs), even in the case of express package transfers with very stringent delivery lead time restrictions. In particular, our results show that by carefully choosing the locations and the capacities of the service points, it is possible to carry out a significant portion of express deliveries with the crowd provided delivery capacity (up to 56% in our experiments) without deploying a very large number of them (less than 60 in all our experiment) in the region, indicating the strong potential and applicability of the CS delivery systems in real world delivery operations.

Keywords: City logistics, Crowd-Shipping, Stochastic programming, Benders decomposition.

1 Giriş

Artan şehirleşme ve katlanarak büyüyen e-ticaret paket dağıtım faaliyetlerini yaşantılarımızın önemli bir parçası haline getirmekte, şehir içi lojistik faaliyetlerinin etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesine olan ihtiyacı giderek kuvvetlendirmektedir. Günümüzün çetin rekabet koşulları içerisinde öne çıkmak isteyen işletmeler dağıtım maliyetlerini düşürmek, hizmet kalitelerini artırabilmek ve müşterilerin çevre duyarlılıklarına hitap edebilmek amacıyla daha hızlı, daha az maliyetli ve daha çevreci dağıtım olanakları sunan yenilikçi teknoloji ve iş modellerine yönelmektedir. Tüm dağıtım sürecinin en pahalı ve en çok zaman alan kısmını oluşturan şehir içi taşıma faaliyetleri, söz konusu yenilikçi yaklaşımların odak noktasını oluşturmaktadır [1]. Bu çalışmada, yenilikçi bir şehir içi dağıtım modeli olarak büyük

ilgi gören *kitle destekli dağıtım* (KDD, crowd-shipping) uygulamalarına [2] odaklanıyor, KDD sistemlerinin maliyet etkin bir şekilde teşkil edilebilmesi için kritik öneme sahip olan servis ağı tasarımı problemini inceliyoruz.

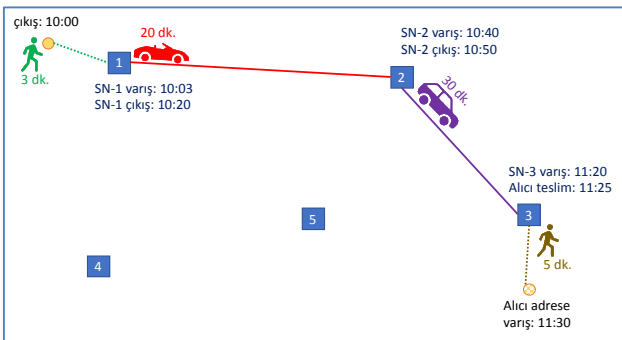
KDD yaklaşımının temel amacı, gelişen iletişim teknolojilerinin sunduğu imkânları kullanarak yolcu ve paket taşımacılığını bütünleştirmek ve böylelikle atıl araç kapasitelerinin faydalı bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Ana fikir, önceden planlanmış (paket dağıtımından bağımsız olarak gerçekleşecek olan) seyahatleri sırasında, küçük ekonomik kazançlar sağlamak ve/veya dağıtım faaliyetlerinin çevreye verdiği zararları azaltılmasına katkı sunmak isteyen kişilerin, yolları üzerindeki noktalar arasında paket taşımacılığı yapması şeklinde özetlenebilir.

KDD yaklaşımlarının öngördüğü düşük sermayeli, esnek, verimli ve çevreci dağıtım ağlarının sağlayacağı ekonomik,

*Yazışılan yazar/Corresponding author

sosyal ve çevresel faydalar açıktır [3]. Ancak, bahsedilen bu önemli potansiyelin uygulamaya geçirilebilmesi için KDD kapasitesinin (geçici kuryelerin) kendine özgü yapısından kaynaklanan planlama ve yönetim zorluklarını göz önüne alan yaklaşımların geliştirilmesi önemli bir problem sahası olarak karşımıza çıkmaktadır [4],[5].

Küçük ödemelerle ve daha çok çevresel duyarlılıklarının sağladığı motivasyonlarla, taşıma faaliyetlerine destek olacak geçici kuryelerin (GK) doğrudan kapıdan kapıya dağıtım yapmalarının gerçekçi bir beklenti olmayacağı açıktır. Yine güvenlik kaygıları gibi nedenlerle, GK'ler tarafından kapıdan kapıya dağıtım yapılması alıcı ve göndericiler için de tercih edilen bir yaklaşım olmayacaktır. Bu sebeple; alıcı ve göndericiler için müşteri merkezi, GK'ler için ise paket alma ve bırakma ve aktarım merkezleri olarak görev yapacak servis noktalarına (SN) ihtiyaç vardır. Şehir içinde kritik noktalara yerleştirilecek SN'lerden teşkil edilecek bir servis ağının oluşturulması önemli bir tasarım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır [3],[6]. Hızlı paket alış veriş için gerekli donanım, park yeri, vb. imkânlarla sahip SN'ler sayesinde; GK'ler yollarından sapmadan, hızlı ve güvenli bir şekilde paket teslim alıp verme işlemlerini yapabilir; alıcı ve göndericiler ise paketlerini kendilerine en yakın SN'lere uğrayarak güvenli ve kolay bir şekilde alıp verebilirler. Böylece GK'ler ile alıcı/vericilerin karşılaşması önlenmiş olur. Öngörülen servis ağı yapısının bir başka avantajı ise mevcut KDD kapasitesinin daha etkin kullanılmasına olanak tanınmasıdır. SN'lerin bir aktarma merkezi olarak kullanılmasıyla paketlerin çıkış ve varış noktaları ile GK'lerin çıkış ve varış noktalarının tam olarak eşleşmesi gerekliliği gevşetilebilecek, paketler gerekli durumlarda birden fazla GK seyahati ile (aktarmalarla) taşınabilecektir [6]. Böylelikle, aynı sayıdaki GK seyahati ile daha fazla sayıda paket, belirlenen hizmet süresi içerisinde taşınabilecektir. Öngörülen dağıtım ağının işleyişinin daha net anlaşılabilmesi için Şekil 1'de örnek bir paket dağıtım planı resmedilmiştir. Örnekte saat 10:00 da evinden hareket eden göndericinin, kendisine en yakın servis noktasına (SN-1) 3 dk.'lık bir yürüyüş sonrasında paketi bıraktığını görüyoruz. SN-1'de 17 dk.'lık bir beklemeden sonra paket SN-1 ve SN-2 arasında taşıma yapabileceğini belirten bir GK tarafından alınarak 20 dk.'lık bir yolculuğun ardından SN-2'ye saat 10:40 da varmış olacaktır. Paket burada 10 dk. boyunca bekleyecek, saat 10:50'de SN-2'den geçerek 11:20 de SN-3'e ulaşacak bir GK tarafından alınacaktır. Alıcıya en yakın servis noktası olan SN-3'de paket alıcıya teslim edilerek paketin dağıtımını tamamlanmış olacaktır. Bu örnekte, iki farklı GK'nin sistem tarafından koordine edilmiş taşınmaları ile Saat 10:00'da ilk adresinden hareket eden paket 90 dk. içerisinde alıcı adresine ulaşmış olduğunu görüyoruz.



Şekil 1. Örnek bir paket dağıtım planı.
Figure 1. An example package delivery plan.

Verilen örnekte de görüldüğü gibi, SN'lerin doğru yerlerde yeterli saklama kapasiteleri ile açılması sistemin etkin bir şekilde işletilebilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Ancak, KDD uygulamalarının yeniliği ve çözülmesi gereken ağ tasarım probleminin karmaşıklığı sebebiyle, literatürde bu konuda yeterli çalışmalar bulunmamaktadır. Literatürdeki bu önemli boşluğun ortadan kaldırılmasına katkı sunmak amacıyla yürüttüğümüz çalışmamızda, KDD ağ tasarımı problemini (KDDAT) literatüre tanıtıyoruz. Çalışmada cevaplarını aradığımız araştırma soruları şu şekilde özetlenebilir.

- Beklenen sistem performansını (kârlılığını) en üst seviyeye çıkarabilmek için SN'ler nerelerde ve hangi kapasite ile açılmalıdır?
- Talep büyüklüğünün ağ tasarımı ve sistem performansı üzerine etkileri nelerdir?
- GK katılım seviyelerinin ağ tasarımı ve sistem performansı üzerine etkileri nelerdir?
- KDD platformunun kâr payındaki değişikliklerin ağ tasarımı ve sistem performansı üzerindeki etkileri nelerdir?
- KDD platformu tarafından garanti edilen dağıtım sürelerinin ağ tasarımı ve sistem performansı üzerindeki etkileri nelerdir?

Gelecekteki belirsiz dağıtım talep ve kapasitesini göz önüne alarak çözülmesi gereken karmaşık ağ tasarımı probleminin modellenmesi için senaryo tabanlı bir yaklaşım geliştirdik. Bu amaçla formüle ettiğimiz tam sayılı programının çözülebilmesi için ise etkin bir Benders Ayrıştırma algoritması öneriyoruz. Bölümün kalan kısmında, KDD ile ilgili güncel çalışmaların detaylı bir incelmelerini sunacak, makalemizin söz konusu literatüre olan katkılarını tartışacağız.

1.1 İlgili literatür

Paylaşım ekonomisinin ulaştırma alanındaki farklı bir formu olarak KDD'yi değişik boyutlarıyla inceleyen yeni, ancak hızla büyüyen bir literatür bulunmaktadır. Diğer paylaşım ekonomisi uygulamaları gibi halen bir dönüşüm içinde olan bu alanı tanımlamak için farklı yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Temelinde kitle destekli dağıtım kapasitesinin kapsamı, daha açık bir ifadeyle "kitle"nin tanımı, konusunda ayrılan bu yaklaşımların detaylı bir listesi Le ve diğ. [7] tarafından sunulmuştur. Geniş kapsamlı anlamıyla *kitle*, zaman veya yer bakımından kullanılabilir fazladan kapasiteye sahip ve bu kapasiteyi taşıma faaliyetlerine katkı sunmak amacıyla kullanmaya istekli kişilerden meydana gelmektedir [8]. Diğer bir yandan, daha özel bir tanımla, GK'ler daha önceden zamanı ve güzergâhı planlı seyahatleri sırasında yolları üzerindeki noktalar arasında, görece olarak küçük ödemeler karşılığında paket taşımacılığı yapmaya gönüllü kişiler olarak ele alınmaktadır [9]. Literatür incelememizin kalan kısmında dikkatimizi, çalışmamızda incelenen KDD yaklaşımıyla daha yakından ilgili oldukları için, bu ikinci çerçevedeki çalışmalara yoğunlaştıracaktır.

Çeşitli çalışmalar, şehir içi küçük paket taşımacılığını desteklemek için geçici sürücülerin kullanılması konusunu incelemiştir. Bu konudaki ilk çalışmalardan olan, Archetti ve diğ. [10], literatüre geçici sürücülü araç rotalama problemini (GARP) kazandırmıştır. Bu problemde şirketler kendi dağıtım filosundaki araçların yanında, tek bir teslimat yapmak için kendi araçlarını kullanan ve karşılığında küçük bir ödeme alan GK'lerin verdiği servisleri de kullanabilmektedir. Problemin matematiksel bir formülasyonunu geliştiren yazarlar, aynı zamanda gerçekçi boyuttaki problem örneklerinin çözümü için

sezgisel bir çözüm yöntemi de önermişlerdir. Bunun devamı niteliğinde olan bir çalışmada ise Macrina ve diğ. [11] problem kapsamını genişleterek ve sürücü başına birden fazla teslimatın yapılabildiği bir sistemi ele almışlardır. Arslan ve diğ. [12], GARP'ın dinamik bir versiyonunu incelemişler ve KDD'nin farklı çıkış ve varış noktaları dağılımları için (tek kaynaktan çok adrese, birkaç kaynaktan çok adrese ve çok kaynaktan çok adrese) potansiyel faydalarını analiz etmişlerdir. KDD'ye ek olarak, şirket araçları tarafından sunulan bir "yedek taşıma kapasitesi" göz önüne alınmış ve problemin statik versiyonu bir eşleme problemi olarak formüle edilmiştir. Problemin dinamik versiyonu ise, problemin statik versiyonunun karar zamanlarında ortaya çıkan verilerle çözüldüğü, ilerleyen planlama ufku yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bahsedilen çalışmaların hiçbirinde servis noktaları ve paketlerin birden fazla GK tarafından, aktarmalarla taşınması konusu incelenmemiştir.

Yakın bir zamanda yayınlanan çalışmalarında Macrina ve diğ. [13], kuryelerin merkez ve ara depolar arasından paketlerin teslim alınma noktalarını seçebildiği bir KDD modelini incelemişlerdir. Yazarlar, merkez depodan ara depolara olan taşıma işleri için geleneksel bir taşıma filusunun kullandığı bu yaklaşım için toplam işletme maliyetini en küçükmeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Burada bahsedilen işletme maliyeti, geleneksel filoların operasyonlarından doğan maliyetler ve GK'lere ödenen ücretlerin toplamından oluşmaktadır. Büyük boyutlu problem örneklerini çözmek için değişken komşuluk arama sezgisel algoritması önerilmiştir. Bizim çalışmamızdan farklı olarak, bu çalışmada göz önüne alınan aktarma seçenekleri sadece geleneksel filo ve GK'ler arasında mümkündür ve çalışmanın kabulüne göre bir paket birden fazla GK'nin koordineli çabasıyla taşınmaz. Bunun yanında yazarlar, servis noktalarının kapasite sınırlarını göz ardı ederek yer seçimlerinin daha önceden belirlenmiş olduğunu kabul etmişlerdir.

Chen ve diğ. [14], KDD uygulamalarında aktarmalı paket transferlerinin avantajlarını inceleyen ilk çalışmalardan birisidir. Şehir içinde hızlı paket taşımacılığına ekonomik açıdan uygulanabilir bir çözüm üretmeyi amaçlayan yazarlar, ticari taksilerin yolculara sundukları hizmet kalitesini olumsuz olarak etkileyecek şekilde paket taşımacılığında kullanıldığı bir KDD modeli önermişlerdir. Çalışmada toplam taşıma süresini en küçükleyecek şekilde paketler için en iyi rotalama planlarının bulunması amacıyla iki aşamalı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. İlk aşamada; geçmiş taksi güzergâh bilgileri kullanılarak olası tüm çıkış-varış noktası ikilileri için en kısa yollar ve tahmini seyahat süreleri tespit edilmektedir. İkinci aşamada ise teslimat yollarını belirlemek için çevrimiçi uyarlanabilir bir taksi planlama algoritması çalıştırılmaktadır. Bahsedilen makalenin devamı niteliğindeki bir çalışmada, Chen ve diğ. [15], taksi planlama kısmındaki bir değişiklik ile aynı iki aşamalı yaklaşımı kullanmakta ve tersine lojistik operasyonları (tüketiciden mağazalara iade edilen ürünler için gerekli taşımalar) destekleyebilme yönünden taksi aktarmalarının potansiyelini incelemektedirler. Bahse konu her iki çalışmada da bizim yaklaşımımızdan farklı olarak operasyonel seviyede ağ yönetimi problemi üzerine odaklanılmış, servis noktalarının kapasite limitleri göz ardı edilmiş stratejik seviyede servis ağ tasarımı probleminin daha önceden çözüldüğü (servis noktalarının yerlerinin belirlenmiş olduğu) kabul edilmiştir.

Chen ve diğ. [16], kapıdan kapıya taşıma için paketleri birkaç sürücü arasında aktarma seçeneğini incelemiş ve "çok sürücülü, çok paketli eşleme problemi" literatüre tanıtmıştır. Bu problemde sürücüler paketleri teslim almak ve teslim etmek için belirlenmiş noktalarda diğer sürücülerle buluşabilmekte, bu amaçla gerekli durumlarda en kısa yoldan belirli bir tolerans payına kadar sapabilmektedirler. Çalışmada paket ve GK gelişlerinin daha önceden bilindiğini varsayan bir karma-tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve büyük problem örnekleri için yüksek kaliteli sonuçlar elde etmek amacıyla zamanca genişletilmiş ağlar üzerinde çalışan bir sezgisel algoritma önerilmiştir.

Şehrin stratejik noktalarına yerleştirilecek paket alış verişi ve aktarmaları için kullanılabilen SN'lerden oluşan bir KDD ağı ilk olarak Raviv ve Tenzer [6] tarafından önerilmiştir. KDDAT'den farklı olarak ağ yönetimi probleminde odaklanan yazarlar gerçek zamanlı paket rotalama problemini (PRP) literatüre tanıtmışlar, PRP'nin çözümü için bir dinamik programlama modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu dinamik programlama yaklaşımı Yıldız [3] tarafından genişletilerek; paket ve GK gelişleri için Poisson dağılımı kabulü gevşetilmiş, süresi içinde tamamlanan dağıtımlar için herhangi bir (sanal) ceza maliyeti kullanılmamasına gerek bırakmayan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmada ele aldığımız KDDAT probleminin Raviv ve Tenzer [6] den bir diğer farkı ise GK seyahatlerinin KDD platformuna önceden bildirilebilmesine olanak tanınması, bu bilgi kullanarak sistem performansının artırılabilmesidir. Bizim çalışmamızdan farklı olarak, her iki çalışmada da servis noktaları yer seçimi ve kapasite belirleme kararları göz ardı edilmiş (bu kararların daha önceden belirlendiği varsayılmış), operasyonel seviyede paket rotalama kararları üzerine odaklanılmıştır. KDD literatürü içerisinde bizim çalışmamızın konumu ve katkılarının daha net olarak görülebilmesi için ilgili literatürün karşılaştırmalı bir özeti Tablo 1'de sunulmuştur. Tabloda her bir boyut için mevcut çalışmalardan bizim çalışmamızla aynı/benzer özellikleri olanlar yeşil, diğerleri ise kırmızı ile işaretlenmiştir. Çözüm yöntemi konusunda önerdiğimiz çalışmadaki gibi kesin çözüm yöntemleri öneren çalışmalar yeşil, diğerleri kırmızı ile belirtilmiştir.

Bu bölümde sunulan literatür incelemesinde spesifik olarak KDD ağ tasarımı konusundaki çalışmalara odaklanılmıştır. İlgilenen okuyucuya, genel ağ tasarımı problemleri konusundaki geniş literatürün detaylı bir incelemesi için [17]-[21] tarafından yapılan çalışmaları öneriyoruz.

1.2 Sunulan çalışmanın katkıları

Bilebildiğimiz kadarıyla bu çalışma stratejik seviye KDD ağ tasarımı probleminin ele alındığı ilk çalışmadır. Önceki maddede detaylı bir şekilde incelenen mevcut çalışmaların hiçbirisinde KDD siteminin karşılayacağı taşıma taleplerinin seçilmesi, buna göre servis noktalarının yer seçimi ve kapasitelerinin belirlenmesi problemi ele alınmamıştır. Sunulan çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Stratejik seviye KDDAT problemi literatüre tanıtmıştır,
- Gelecekteki belirsiz talep ve kapasite (GK katılım) durumları gözetilerek KDDAT için iki seviyeli bir belirsiz (stochastic) programlama formülasyonu önerilmiş, önerilen formülasyonun gerçekçi boyutlu problem örnekleri için çözülebilmesini sağlayacak etkin bir Benders Ayırıştırması algoritması geliştirilmiştir,
- Geniş kapsamlı sayısal çalışmalarla önerilen çözüm yönteminin hesapsal performansı test edilmiş, önemli yönetimsel çıkarımlar elde edilmiştir.

Tablo 1. KDD literatür özeti.

Table 1. CS Delivery literature summary.

Çalışma	SN Yer Seçimi	SN Kapasite Belirleme	Aktarmalı Rotalar	Talep Gelişleri	GK Gelişleri	Yedek Taşıma Kapasitesi	Çözüm Yöntemi
Archetti ve diğ. [10]	Yok	Yok	Yok	Belirli	Belirli	Var	Sezgisel alg.
Macrina ve diğ. [11]	Yok	Yok	Yok	Belirli	Belirli	Var	Karışık tam sayılı program
Arslan ve diğ. [12]	Yok	Yok	Yok	Belirsiz	Belirsiz	Var	İlerleyen ufuk alg.
Macrina ve diğ. [13]	Yok	Yok	Var	Belirli	Belirli	Var	Sezgisel alg.
Chen ve diğ. [14]	Yok	Yok	Var	Belirsiz	Belirsiz	Yok	Sezgisel alg.
Chen ve diğ. [15]	Yok	Yok	Var	Belirsiz	Belirsiz	Yok	Sezgisel alg.
Chen ve diğ. [16]	Yok	Yok	Var	Belirli	Belirli	Yok	Sezgisel alg.
Raviv ve Tenzer [6]	Yok	Yok	Var	Belirsiz (Poisson dağılımı)	Belirsiz (Poisson dağılımı)	Yok	Dinamik programlama
Yıldız [3]	Yok	Yok	Var	Belirsiz	Belirsiz	Var	Dinamik programlama
Bu çalışma	Var	Var	Var	Belirsiz	Belirsiz	Var	Benders Çözümü

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde KDDAT'ın matematiksel tanımı ve bu problem için önerdiğimiz çözüm yönteminin detayları sunulmuştur. Üçüncü kısımda hesapsal çalışmamızda kullanılan deney tasarımı ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Son olarak dördüncü bölümde çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında görüşler sunulmuştur.

2 Model

2.1 Varsayımlar, notasyon ve problem tanımı

Bu kısımda öngörülen KDD sisteminin detaylarını sunuyor, KDDAT probleminin matematiksel olarak ifade edilmesinde ve önerilen çözüm yönteminin açıklanmasında kullanılacak olan varsayım, notasyon, tanımları belirtiyoruz.

Geliştirilen model temel olarak üç varsayım üzerine kurulmuştur.

- GK'ler taşıma yapabilecekleri seyahatlerini planlama etkinliğinin artırılabilmesi amacıyla yeterli bir süre öncesinde (ör: önceki gün, seyahate başlamadan birkaç saat önce.) KDD platformuna gerçek zamanlı bir uygulama yardımıyla bildirecektir,
- GK'ler için yapılacak ödemeler başlangıç ve bitiş noktalarından bağımsız olarak tanımlanmıştır. Söz konusu sabit ücretlendirme politikası, modelleme açısından gerekli olmadığı halde öngörülen KDD modeli için daha gerçekçi olacağı değerlendirildiği için tercih edilmiştir. GK'ler seyahatlerini paket taşımalarından bağımsız olarak gerçekleştirecekleri için taşıma yapmaları durumunda katlanacakları zahmet yolculuğun uzunluğundan değil paket alış veriş işlemleri için yapmaları gereken duraklama ve diğer işlemlerden kaynaklanacaktır. Bu sebeple kendilerine yapılacak ödemelerin paket başına sabit ve bir ücret olmasının daha gerçekçi bir yaklaşım olacağı değerlendirilmiştir,
- SN'lerin yerleştirilebileceği aday noktalar ve modelde kullanılacak senaryo setleri, beklenen taşıma talep ve kapasitesi gözetilerek KDD yönetimi tarafından yapılan bir ön çalışma ile belirlenmiştir.

Açılabilir (aday) servis noktalarının kümesi S , trafik koşulları göz önünde bulundurulduğunda bir t zamanında $i \in S$ noktasından yolculuğa başlayan bir aracın $j \in S$ noktasına en kısa (hızlı) yolu kullanarak varacağı zaman ise τ_{ij}^t olsun. Bir

servis noktasının kapasitesini, bu servis noktasına yerleştirilecek saklama ünitelerinin (otomatların) depolayabilecekleri paket sayısı olarak tanımlıyoruz. Bir servis noktası $s \in S$ için kurulacak birim depolama kapasitesinin günlük maliyetini m_s ile gösteriyoruz. Her bir servis noktası için sağlanması öngörülen kapasite miktarlarını gösteren ağ tasarımı planını ise $\mathcal{K} = \{\mathcal{K}_s : s \in S\}$ kümesi ile gösteriyoruz. Dolayısı ile bir \mathcal{K} ağ tasarımının toplam günlük maliyetini $m(\mathcal{K}) = \sum_{s \in S} m_s \mathcal{K}_s$ olarak hesaplayabiliriz.

Gün içerisinde KDD sisteminin hizmet vereceği zaman aralığını, $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, T\}$ kesikli zaman uzayı ile, bu süre içerisinde gerçekleştirilecek taşıma taleplerinin (kısaca paketlerin) kümesini ise Q ile gösterelim. Bir $q \in Q$, paketinin sisteme ulaşma zamanı $t_q \in \mathcal{T}$, paketin gönderici tarafından bırakılacağı servis noktası $o_q \in S$ ve alıcı tarafından teslim alınacağı servis noktası $d_q \in S$ olsun. Taşıma talepleri için sistem tarafından sunulan hizmet süresi garantisini $h \in \mathbb{Z}_+$ ile gösterelim.

Dolayısıyla, her bir $q \in Q$ paketinin teslim edileceği d_q servis noktasına, $\bar{t}_q = t_q + h$ zamanından önce ulaştırılması gerekmektedir. Bu şekilde yapılan teslimatlara *zamanında teslimat* diyoruz.

Gün içerisindeki GK seyahatlerinin kümesini V ile gösterelim. Bir seyahatin $v \in V$, paket teslim almak için $t_v \in \mathcal{T}$ zamanında uğrayacağı servis noktasını $o_v \in S$, teslim aldığı paketleri bırakmak için $\bar{t}_v \in \mathcal{T}$ zamanında uğrayacağı servis noktasını ise $d_v \in S$ ile gösteriyoruz. Bu noktada şu önemli hususa dikkat çekmek istiyoruz. Her ne kadar yukarıda verilen tanımlama ile seyahatler tek bir başlangıç ve bitiş noktası ile karakterize edilmiş olsalar da bu durum GK'lerin istemeleri halinde daha fazla servis noktasında duraklayarak çok bacaklı taşımalar yapmasına engel bir durum değildir. Raviv ve Tenzer [6] tarafından önerildiği gibi böyle durumlarda birbirini takip eden her iki duraklama ayrı bir seyahat halinde modele dâhil edilebilir.

KDD platformu tarafından herhangi bir başlangıç bitiş noktası çifti $(o, d) \in S \times S$, için müşterilerden talep edilen paket başına taşıma ücreti u_{od} , bu gelirden taşımada görev alacak her bir GK'ye ödenecek miktar m , taşımının üçüncü parti bir hizmet sağlayıcı (ÜPS) tarafından tamamlanmasının maliyeti ise \bar{m}_{od} , olsun.

Verilen bir ağ tasarımı \mathcal{K} ve GK seyahatleri kümesi V göz önüne alındığında, bir Q talep kümesindeki taleplerin taşınmasının toplam maliyetini (GK'ler ve ÜPS'ye yapılacak toplam ödeme miktarını) en küçük yapan taşıma planını düşünelim. Sistem tarafından elde edilecek kâr miktarını en çok yapan bu planda GK'ler tarafından taşınacak paketlerin kümesi $Q_{\mathcal{K}V} \subset Q$, bu kümedeki her bir q paketi için kaç adet GK seferi kullanılması gerektiği ise $\mu_{\mathcal{K}V}^q$ ile gösterilsin.

Stratejik seviyede servis noktalarının yer ve kapasiteleri belirlenirken gelecekteki belirsiz talep ve servis GK seyahatlerinin göz önüne alınabilmesi için literatürde benzer problemlerde (ör. [22],[23]) başarıyla uygulanmış olan senaryo tabanlı bir modelleme yaklaşımı öneriyoruz. Geçmiş veri yahut öngörülen paket ve GK seyahati dağılımları göz önüne alarak türetilebilecek olan söz konusu senaryoların setini Ω ile gösterelim. Her biri sanal bir günü temsil edecek olan senaryolar $\omega \in \Omega$ için bu senaryoda sisteme ulaşacak paketlerin kümesi $Q(\omega)$, GK seyahatlerinin kümesi $V(\omega)$ ve senaryonun gerçekleşme olasılığı ise p_ω olsun. Bu durumda, bir senaryo kümesi Ω için beklenen toplam günlük ciro miktarını $U_\Omega = \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \sum_{q \in Q(\omega)} u_{o_q d_q}$ olarak hesaplayabiliriz.

Dağıtım sistemini kurup işletecek olan KDD platformu tarafından çözülmesi gereken KDDAT problemini, verili bir senaryo seti Ω için günlük beklenen kârı en büyükleyen ağ tasarımının bulunması olarak şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\max_{\mathcal{K}}: U_\Omega - \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \left(\sum_{q \in Q_{\mathcal{K}V}(\omega)} m \mu_{\mathcal{K}V}^q(\omega) + \sum_{q \in Q \setminus Q_{\mathcal{K}V}(\omega)} \bar{m}_{o_q d_q} \right) \quad (1)$$

Devam eden bölümlerde matematiksel ifade (1) de üst seviye tanımlanmış KDDAT probleminin modellenmesi için önerdiğimiz tam sayılı program ve bu programın çözümünü için geliştirdiğimiz Benders Ayrıştırması algoritmasının (BD) detaylarını açıklayacağız. Okuyucuya kolaylık olması amacıyla, tanımladığımız notasyonun özetini Tablo 1'de sunuyoruz.

Tablo 2. Kullanılan kısaltmalar ve notasyon.

Table 2. Outline of the notation.

Kısaltmalar	
KDD	: Kitle destekli dağıtım,
KDDAT	: Kitle destekli dağıtım ağ tasarımı problemi,
SN	: Servis noktası,
GK	: Geçici kurye,
ÜPS	: Üçüncü-parti lojistik servis sağlayıcı,
TAM	: Amaç fonksiyonu (4), ve kısıtlar (5)-(8) ile tanımlanan tamsayı programlama modeli,
BD	: Benders ayrıştırması algoritması,
AP	: Benders ana problemi,
ALT	: Benders alt problemi,
BK	: Benders kesileri,
AS	: Alt sınırlar,
BK	: Üst sınırlar.
Notasyon	
S	: Aday servis noktalarının kümesi,
\mathcal{K}	: Ağ tasarımı,
\mathcal{K}_s	: Servis noktası $s \in S$ için, \mathcal{K} tasarımında sağlanacak kapasite,
\mathcal{T}	: KDD faaliyetlerin yürütüleceği zaman aralığı kapsayan kesikli zaman uzayı,
τ_{ij}^t	: i noktasından j noktasına t zamanında en kısa ulaşım süresi,
Q	: Dağıtılacak paketlerin kümesi,

o_q	: Göndericinin q paketini teslim ettiği servis noktası,
d_q	: Alıcının q paketini teslim alacağı servis noktası,
t_q	: q paketinin geliş zamanı,
\bar{t}_q	: q paketinin dağıtım miadı,
h	: Dağıtım süresi garantisi,
V	: GK seyahatlerinin kümesi,
o_v	: v seyahatinin başlangıç noktası,
d_v	: v seyahatinin bitiş noktası,
t_v	: v seyahatinin başlangıç zamanı,
\bar{t}_v	: v seyahatinin bitiş noktasına varış zamanı,
$Q_{\mathcal{K}V}$: \mathcal{K} tasarımı ve V seyahatleri ile Q paketleri için en ucuz taşıma planında GK'ler tarafından taşınacak paketlerin kümesi,
$\mu_{\mathcal{K}V}^q$: \mathcal{K} tasarımı ve V seyahatleri ile Q paketleri için en ucuz taşıma planında, $q \in Q_{\mathcal{K}V}$ için kullanılacak GK seyahatlerinin sayısı,
u_{od}	: o noktasından d noktasına paket taşıma ücreti,
m	: Taşındıkları her bir paket için GK'lere yapılacak ödeme,
m_{od}	: o noktasından d noktasına ÜPS ile taşınmanın maliyeti,
m_s	: Servis noktası $s \in S$ için günlük birim kapasite maliyeti,
Ω	: Senaryo kümesi,
$Q(\omega)$: ω senaryosu dağıtılacak paket kümesi,
$V(\omega)$: ω senaryosu GK seyahatleri kümesi,
p_ω	: ω senaryosunun gerçekleşme olasılığı.

2.2 Tamsayı programlama modeli

Tamsayı programlama modeli TAM'ı her bir senaryo $\omega \in \Omega$, için oluşturduğumuz ve *rotalama çizgeleri* olarak isimlendirdiğimiz yönlü çizgeler $G(\omega) = (\bar{V}(\omega), A(\omega))$ üzerinden tanımlıyoruz. Düğüm seti $\bar{V}(\omega)$, ilgili seyahat kümesine $V(\omega)$, senaryodaki her bir paket $q \in Q(\omega)$ için sisteme giriş ve çıkışları gösteren q_1 ve q_2 düğümlerinin eklenmesi ile oluşur. Ayrıt kümesi $A(\omega)$ ise aşağıda belirtilen dört alt kümeden meydana gelmektedir.

- ✓ **ÜPS Dağıtım Ayrıtları:** Paketlerin KDD ile zamanında teslim edilemeyeceği durumlarda ÜPS tarafından dağıtılmasını modellemek amacıyla tanımlanmış olup $A_1(\omega) = \{(q_1, q_2) : q \in Q(\omega)\}$ kümesi ile gösterilmektedir,
- ✓ **Teslim Alma Ayrıtları:** Paketlerin GK'ler tarafından başlangıç noktalarından teslim alınmalarını modellemek amacıyla tanımlanmış olup $A_2(\omega) = \{(q_1, v) : q \in Q(\omega), v \in V(\omega), o_q = o_v, t_q \leq t_v, \bar{t}_v \leq \bar{t}_q - \tau_{d_v d_q}^{t_v}\}$ kümesi ile gösterilmektedir. Dikkat edilirse bir $v \in V(\omega)$ seyahatinin bir $q \in Q$ paketini başlangıç noktasından teslim alabilmesi için paketin teslim edildiği servis noktasına (o_q) paket gönderici tarafından teslim edildikten sonra uğrayacak olması (yani $o_q = o_v$ ve $t_q \leq t_v$ gerekliliklerini sağlaması) ve paketi d_v noktasına taşındıktan sonra teslimat noktasına d_q , zamanında ulaşabiliyor olması gerekmektedir ($\bar{t}_v \leq \bar{t}_q - \tau_{d_v d_q}^{t_v}$),
- ✓ **Transfer Ayrıtları:** Paketlerin GK'ler tarafından transfer edilmesini modellemek amacıyla tanımlanmış olup $A_3(\omega) = \{(v, \bar{v}) : v \in V(\omega), d_v = o_{\bar{v}}, t_{\bar{v}} \geq \bar{t}_v\}$ kümesi ile gösterilmektedir. Dikkat edilirse, transfer ayrıtları bir paketin bir seyahatten diğer seyahate aktarılmasını modellemekte bu sebeple iki seyahat arasında bu ayrıtların tanımlanabilmesi için ilgili seyahatlerin başlangıç/bitiş noktalarının ve zamanlarının uyumlu olmasını gerektirir.
- ✓ **Teslimat Ayrıtları:** Paketlerin GK'ler tarafından varış noktalarına ulaştırılmalarını modellemek için tanımlanmış olup $A_4(\omega) = \{(v, q_2) : v \in V(\omega), q \in Q(\omega), d_q = d_v, \bar{t}_v \leq \bar{t}_q\}$ kümesi ile gösterilmektedir. Dikkat edilirse bu tanımla, bir paketin $q \in Q(\omega)$, bir seyahat tarafından varış noktasına bırakılabilmesi için seyahatin paketin varış noktasına (d_q) son teslimat zamanından (\bar{t}_q) önce ulaşabiliyor olması gerektiği göz önüne alınmaktadır.

TAM'ın tanımlanmasında notasyon kolaylığı sağlaması için kullanılmaları durumunda bir $s \in S$ servis noktasında, $t \in T$ zamanında kapasite kullanılmaya başlanmasını gerektiren ayrıtların kümesini $A_s^t(\omega)$ ile gösteriyoruz:

$$A_s^t(\omega) = \{(q_1, v) \in A_2(\omega) : o_q = s, t_q = t\} \cup \{(v, \bar{v}) \in A_3(\omega) : d_{\bar{v}} = s, \bar{t}_{\bar{v}} = t\}. \quad (2)$$

Benzer şekilde, kullanıldığında $s \in S$ servis noktasında $t \in T$ zamanından itibaren kapasite kullanımının sonlandırılmasını sağlayan ayrıtları $\bar{A}_s^t(\omega)$ ile gösteriyoruz:

$$\bar{A}_s^t(\omega) = \{(v, q_2) \in A_4(\omega) : o_v = s, \bar{t}_v = t\} \cup \{(v, \bar{v}) \in A_3(\omega) : o_{\bar{v}} = s, t_{\bar{v}} = t\}. \quad (3)$$

Senaryo $\omega \in \Omega$ için, bir $q \in Q(\omega)$ paketinin, bir $a \in A(\omega)$ ayrıtları kullanıp kullanmayacağını gösteren ikili karar değişkenini $x_a^q(\omega)$ ile gösteriyoruz. Bir servis noktası $s \in S$ için kurulacak kapasite miktarını gösteren tam sayılı karar değişkeni ise y_s olarak tanımlanmıştır. KDDAT'ın modellenmesi için önerdiğimiz TAM modelini aşağıdaki gibi tanımlıyoruz.

$$\max U_\Omega - \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{q \in Q(\omega)} \sum_{a \in A(\omega)} p_\omega m_a x_a^q(\omega) - \sum_{s \in S} m_s y_s \quad (4)$$

$$\text{öyleki: } \sum_{(i,j) \in A(\omega)} x_{ij}^q(\omega) - \sum_{(j,i) \in A(\omega)} x_{ji}^q(\omega) = \begin{cases} 1, \text{ eğer } i = q_1 & i \in Q(\omega), \\ -1, \text{ eğer } i = q_2 & i \in \bar{V}(\omega) \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases} \quad \forall \omega \in \Omega, q \quad (5)$$

$$\sum_{\hat{t}=0}^{t-\hat{t}} \sum_{(i,j) \in A_s^{\hat{t}}(\omega)} x_{ij}^q(\omega) - \sum_{\hat{t}=0}^{t-\hat{t}} \sum_{(i,j) \in \bar{A}_s^{\hat{t}}(\omega)} x_{ij}^q(\omega) \leq y_s \quad \forall \omega \in \Omega, s \in S, \hat{t} \in \mathcal{T} \quad (6)$$

$$x_a^q(\omega) \in \{0,1\} \quad \forall \omega \in \Omega, q \in Q(\omega), a \in A(\omega) \quad (7)$$

$$y_s \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall s \in S \quad (8)$$

Amaç beklenen toplam gelirden (ciro) beklenen taşıma maliyetleri (GK'ler ve ÜPS için yapılan ödemeler) ve servis noktalarının açılıp işletilmesi için gereken harcamaların düşülmesi ile hesaplanan günlük beklenen kârın en çoklanmasıdır. Her bir senaryo $\omega \in \Omega$, ve bu senaryolarda sisteme ulaşacak her bir talep $q \in Q(\omega)$, için $G(\omega)$ çizgesinde sanal başlangıç ve bitiş noktaları q_1 ve q_2 arasında bir rota planlanması, akış denge kısıtları (5) ile sağlanmaktadır. Dikkat edilirse söz konusu akış denge kısıtları ilgili talebin ÜPS ile $((q_1, q_2)$ ayrıtları kullanarak) ya da bir dizi GK seyahati ile taşınmasını sağlamaktadır. Bu şekilde planlanan rotaların, servis noktalarındaki depolama limitlerine uygun olması ise Kısıt (6) tarafından sağlanmaktadır. Bu eşitsizlikler, her bir senaryoda $\omega \in \Omega$, her bir servis noktası $s \in S$ için, bir $t \in T$ anına kadar bu servis noktasına ulaşan paketlerin sayısından, yine bu t anına kadar s servis noktasından ayrılan paketlerin sayısı çıkarıldığında elde edilen sayının (t anında s noktasında muhafaza edilen paketlerin sayısı) kapasiteden (y_s) küçük ya da eşit olmasını sağlamaktadır. Son olarak, Kısıt (7) ve (8), değişkenlerin tanım kümelerini belirtmektedir.

Gerçekçi bir senaryoda, binlerce paket ve GK seyahatinin bulunacağı göz önüne alındığında, ilgili paket rotalama çizelgelerindeki ayrıtların ve buna bağlı olarak, her bir senaryo için TAM modelinde yer alacak atama karar değişkenlerinin sayısının çok büyük boyutlara ulaşacağı açıktır. Bu sebeple, öncül çalışmalarımızda da tespit ettiğimiz gibi, gelecekteki belirsizliklerin yeterli bir şekilde hesaba katılarak kapasite kararlarının verilebilmesi için gereken yüksek sayıdaki senaryoları içeren gerçekçi problem örnekleri için TAM modelinin doğrudan çözülmesi mümkün değildir. Sıradaki bölümde, söz konusu hesapsal zorluğun ortadan kaldırılması amacıyla geliştirdiğimiz Benders Ayrıştırma yaklaşımının detaylarını sunuyoruz.

2.3 Benders ayrıştırma algoritması

TAM incelendiğinde, kapasite kararlarının sabitlenmesi durumunda, formülasyonun her bir senaryo için bağımsız olarak ve kolay bir şekilde çözülebileceği görülmektedir. Dolayısıyla, kapasite kararlarının ana problemde, paket rotalama kararlarının ise her bir senaryo için oluşturulacak ayrı alt problemlerde belirlendiği bir Benders Ayrıştırma algoritması [24] ile TAM'ın gerçekçi boyutlardaki problem örnekleri için çözülebileceği mümkündür. Söz konusu yaklaşım aslen iki aşamalı belirsiz programlama modellerinin (two state stochastic programming models with recourse) çözümleri için Van Slyke ve Wets [25] tarafından geliştirilen "L" şekilli bir algoritma yapısına sahiptir. Önerdiğimiz Benders Ayrıştırma algoritmasında ikinci seviye karar değişkenleri olan rotalama değişkenlerini (x değişkenleri) model dışına yansıtılmaktadır. Bu şekilde elde edilen *ana problem* çok daha az sayıdaki birinci seviye karar değişkenleri (bizim durumumuzda y değişkenleri) yanında çok sayıda kısıt içermektedir. Tipik olarak birçoğu en iyi çözümde aktif olmayan söz konusu kısıtlar literatürde *Benders Kesileri* (BK) olarak adlandırılmakta [26] ve ana problemin bu kesilerin iteratif olarak eklendiği bir dal kesi yöntemiyle çözülmesi Benders Ayrıştırma yöntemi olarak nitelendirilmektedir [27]. Ana modelin herhangi bir iterasyondaki gevşetilmiş halinde açılacak servis noktalarının ve bu servis noktalarının kapasiteleri göz önüne alındığında hangi BK'lerin eklenmesi gerektiğinin tespit edilebilmesi için, her senaryo $\omega \in \Omega$ için, verili $|S|$ boyutlu tam sayılı bir vektör \mathbf{y}^* , tarafından belirlenen aşağıda tanımladığımız *alt problemin* çözülmesi gerekmektedir.

$ALT_\omega(\mathbf{y}^*)$:

$$\max U_\omega - \sum_{q \in Q(\omega)} \sum_{a \in A(\omega)} p_\omega m_a x_a^q(\omega) \quad (9)$$

$$\text{öyleki: } \sum_{(i,j) \in A(\omega)} x_{ij}^q(\omega) - \sum_{(j,i) \in A(\omega)} x_{ji}^q(\omega) = \begin{cases} 1, \text{ eğer } i = q_1 & q \in Q(\omega), i \in \bar{V}(\omega) \\ -1, \text{ eğer } i = q_2 & \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{\hat{t}=0}^{t-\hat{t}} \sum_{(i,j) \in A_s^{\hat{t}}(\omega)} x_{ij}^q(\omega) - \sum_{\hat{t}=0}^{t-\hat{t}} \sum_{(i,j) \in \bar{A}_s^{\hat{t}}(\omega)} x_{ij}^q(\omega) \leq y_s^* \quad s \in S, \hat{t} \in \mathcal{T} \quad (11)$$

$$x_a^q(\omega) \in \{0,1\} \quad q \in Q(\omega), a \in A(\omega) \quad (12)$$

Amaç fonksiyonu (9), verili bir ω senaryosu için elde edilecek gelirlerden $U_\omega = \sum_{q \in Q(\omega)} v_\omega u_{o_q d_q}$, taşıma faaliyetleri için yapılacak harcamaların çıkarılmasıyla elde edilecek kârın en çoklanmasını öngörmektedir. TAM modelindeki gibi Kısıt (10) paketlerin ÜPS veya GK seyahatleri kullanılarak göndericiler tarafından teslim edildikleri servis noktasından alıcı tarafından alınacakları servis noktasına aktarılmasını sağlamaktadır. Bu aktarımların, gevşetilmiş (sadece ilgili iterasyona kadar eklenen BK kısıtlarını içeren) ana problemin en iyi çözümündeki kapasite miktarları y_s^* , $s \in S$ ile uyumlu olması Kısıt (11) ile sağlanmaktadır. Rotalama karar değişkenlerinin tanım kümesi Kısıt (12) ile belirtilmiştir.

Klasik Benders Ayrıştırma algoritmalarından farklı olarak, tanımladığımız alt problem tamsayılı bir modeldir. Bu sebeple BK'lerin tespit edilebilmesi için *mantıksal kesiler* [28], [29] ve ALT_ω doğrusal gevşetmelerinin çözümlerinden elde edilen klasik eşitsizliklerin beraber kullanıldığı bir yaklaşım önermekteyiz. Söz konusu yöntemin detaylarının açıklanmasında kullanmak üzere, BD algoritmasındaki bir k iterasyonunda verilen kapasite kararları \mathbf{y}^k göz önüne alınarak, her bir senaryo $\omega \in \Omega$ için tanımlanacak $ALT_\omega(\mathbf{y}^k)$ probleminin rotalama değişkenlerinin 0 ile 1 arasında sürekli bir değer alabildiği gevşetmesini $\overline{ALT}_\omega(\mathbf{y}^k)$ ile gösterelim. Elde edilen doğrusal programlama modelinin en iyi çözümünü $\bar{\mathbf{x}}^k(\omega)$ bu çözümün değerini $z^k(\omega)$ ile göstereceğiz. Çözüm $\bar{\mathbf{x}}^k(\omega)$ için $ALT_\omega(\mathbf{y}^*)$ formülasyonunda Kısıt (10)'a karşılık gelen dual değişkenlerin değerleri $\delta_i^q, q \in Q(\omega), i \in \bar{V}(\omega)$; Kısıt (11)'e denk gelen dual değişkenlerin değerini ise $\lambda_s^t, s \in S, t \in T$, olsun.

Kesi türetilmesi yöntemlerinin detaylarından bahsetmeye başlamadan önce rotalama değişkenlerinin formülasyon dışına yansıtıldığı ana problemin (AP) resmi tanımını şu şekilde yapabiliriz.

$$\max \sum_{\omega \in \Omega} \theta_\omega - \sum_{s \in S} m_s y_s \quad (13)$$

$$\text{öyleki: } \theta_\omega \leq F_\omega(\mathbf{y}) \quad \forall \omega \in \Omega, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_+^{|S|} \quad (14)$$

$$\theta_\omega \leq U_\omega \quad \forall \omega \in \Omega \quad (15)$$

Vekil değişkenler $\theta_\omega, \omega \in \Omega$, alt problemleri amaç fonksiyonunda temsil etmektedirler. Bu değişkenlerin alacağı değerler, sonraki paragraflarda açıklanacağı şekilde, olası her kapasite kararı $\mathbf{y} \in \mathbb{Z}_+^{|S|}$ için ilgili alt problemin çözümünden elde edilecek $F_\omega(\mathbf{y})$ terimleri ile sınırlandırılmaktadır (14). Teknik olarak, problemin Kısıt (14) deki eşitsizliklerden sadece bir kısmını içeren, herhangi bir gevşetmesi için sınırlı bir çözümünü garanti etmek amacıyla, her bir vekil değişken θ_ω yi, alabileceği en büyük değer olan U_ω ile sınırlandırıyoruz (15).

BD'ye AP formülasyonunun Kısıt (14) deki eşitsizliklerden hiçbirini içermeyen bir gevşetmesi AP^0 ile başlıyoruz. Her bir iterasyon k esnasında, Kısıt (14) de belirtilen eşitsizliklerden sadece önceki iterasyonlarda modele dâhil edilen BK'leri içeren gevşetilmiş AP^k ana problemini çözerek amaç fonksiyonu değeri z^k , kapasite kararlarını ve vekil değişkenlerin değerlerini (\mathbf{y}^k, θ^k) elde ediyoruz. Sonrasında, her bir senaryo $\omega \in \Omega$ için öncelikle $\overline{ALT}_\omega(\mathbf{y}^k)$ çözüyor, eğer çözüm tamsayılı ise ve çözüm değeri ilgili vekil değişkenin değerinden küçük

(yani $z^k(\omega) < \theta_\omega^k$ ise), $F(\mathbf{y}^k)$ terimini Eşitlik (16) da gösterildiği gibi belirleyerek ihlal edilmiş olan $\theta_\omega \leq F_\omega(\mathbf{y}^k)$ eşitsizliğini AP^k ye ekliyoruz.

$$F_\omega(\mathbf{y}^k) = \sum_{q \in Q(\omega)} (\delta_{q_1}^q - \delta_{q_2}^q) + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \lambda_s^t y_s, \quad (16)$$

Yaptığımız ön çalışmalarda, \overline{ALT}_ω çözümlerinin çalıştığımız büyük ölçekli problem örneklerinin hepsinde tamsayılı bir çözüm verdiğini gözlemledik. Her ne kadar kuramsal olarak bunun her zaman geçerli olmayacağı söylenebilirse de, paketlerin servis istasyonlarında sadece bir birimlik saklama kapasitesi kullanıyor olması, Yıldız [3] tarafından da gözlemlendiği gibi paketlerin büyük bir çoğunlukla iki ve daha az GK seyahati kullandığı (rotalarının G çizelgelerinde az sayıda içermesi) gibi sebeplerle bu durumun gerçekleştiğini değerlendiriyoruz. Ancak, önerdiğimiz BD algoritmasının kuramsal bütünlüğünü sağlamak maksadıyla alt problem çözümlerinin tamsayılı olmadığı durumlarda eklenecek BK kesilerini aşağıda açıkladığı şekilde belirliyoruz.

Ekleyeceğimiz kesilerin temel mantığı kapasite kararları değişmediği sürece θ_ω vekil değişkenin $ALT_\omega(\mathbf{y}^k)$ en iyi çözüm değeri $z(\mathbf{y}^k)$ ile sınırlandırılması, bu kararların değiştirilmesi halinde ise söz konusu kısıtın yardımcı karar değişkenlerini tanımlıyor ve aşağıdaki kısıtları AP^k modeline ekliyoruz.

$$r_s^{k+} - r_s^{k-} = (y_s^k - y_s), \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$r^k = \sum_{s \in S} (r_s^{k+} + r_s^{k-}) \quad (17)$$

$$r_s^{k+} \geq 0 \quad (18)$$

$$r_s^{k-} \geq 0 \quad (19)$$

Dikkat edilirse, Kısıtlar (16)-(19), $r^k = \sum_{s \in S} |y_s^k - y_s|$ ilişkisini doğrusal denklemlerle ifade etmektedir. Şu halde, M yeterince büyük bir sayıyı (ör. $M = \sum_{q \in Q(\omega)} m_{o_q d_q}$) ifade edecek şekilde $F(\mathbf{y}^k)$ terimini aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$F(\mathbf{y}^k) = z(\mathbf{y}^k) + M r^k \quad \forall s \in S \quad (20)$$

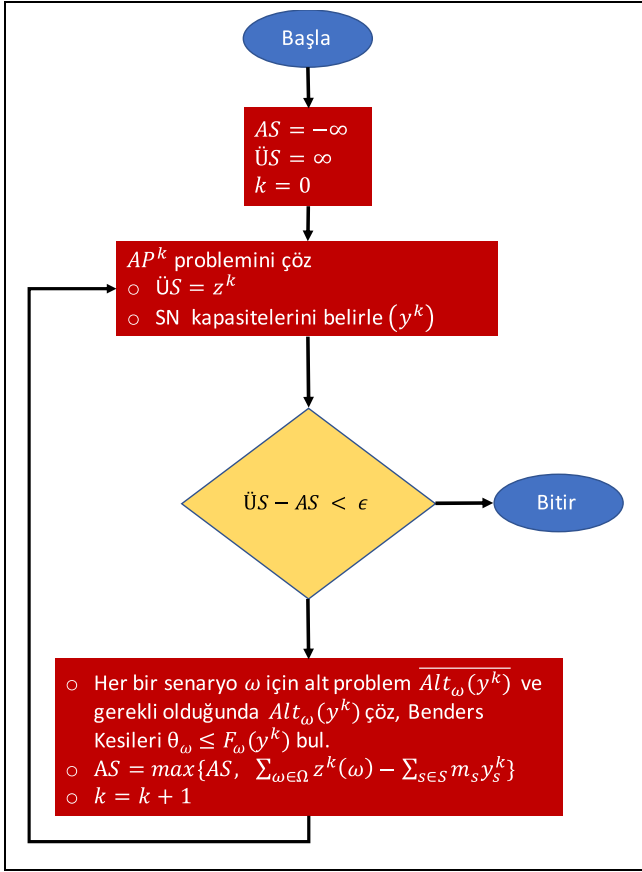
Böylelikle, kapasite değerleri \mathbf{y}^k değişmediği durumlarda r^k , değişkeninin 0 değerini alması ile Eşitlik (20) aktif hale gelecek, diğer durumlara sağ taraf değerinin büyümesi nedeniyle $\theta_\omega \leq F(\mathbf{y}^k)$ istendiği gibi gevşetilmiş olacaktır. BD algoritmasının akış diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur.

3 Hesapsal çalışmalar

Bu bölümde, araştırma sorularımızı yanıtlamak amacıyla hazırladığımız deney tasarımı ve uygulama ayrıntılarını açıklıyor elde ettiğimiz önemli çıkarımları tartışıyoruz.

3.1 Örnek problemlerin türetilmesi

Örnek problemlerin türetilmesinde temel olarak Yıldız [3] tarafından izlenen yöntemi kullanıyoruz. Bütünsellik açısından bu kısımda söz konusu adımların üzerinden geçiyor çalışmamızda göz önüne aldığımız spesifik problem parametrelerini belirtiyoruz. Deneylerimizde gün içerisinde KDD platformunun faaliyetlerini yürüteceği zaman aralığı olarak sekiz saatlik bir süreyi göz önüne alıyoruz ve ayrı bir zaman uzayı elde etmek için 1'er dk.'lık zaman aralıkları kullanıyoruz ($T = \{0, \dots, 480\}$).



Şekil 2. BD algoritması akış diyagramı.

Figure 2. BD algorithm flow diagram.

Paket başında platform tarafından talep edilen ücretin sabit bir ücret (\bar{m}) üzerine, taşıma mesafesi için km başına 2TL ücret eklenerek belirlendiğini kabul ediyoruz. GK'lere paket başına ödenen sabit ücretin 5TL, ÜPS dağıtımları için ise km başına 2TL ücret ödenecek şekilde dağıtım maliyetlerini belirliyoruz. KDD platformu için değişik kâr paylarını incelemek üzere $\bar{m} = \{0, 3, 5, 7, 10\}$ TL seviyelerini problem örneklerimizde inceliyoruz. Belirtilen fiyat ve maliyet değerlerinin öngörülen KDD yapısının henüz uygulamada bir örneği olmaması nedeniyle gerçek veri göz önüne alınarak belirlenemediğini belirtmek isteriz. Ancak, literatürdeki mevcut çalışmalar [3],[6],[7],[30] ve kurye hizmetleri yürüten firmaların mevcut fiyatlandırma yaklaşımları göz önüne alındığında, kullanılan değerlerin önerilen modelleme yönteminin etkinliğinin değerlendirilebilmesi ve stratejik seviyede genel çıkarımlar yapılabilmesine olanak tanıyacak şekilde gerçekçi bir ücretlendirme ve maliyet yapısını temsil ettiğini düşünüyoruz. Devam edilen bölümde deney sonuçları üzerinde yapılacak incelemeler esnasında daha net olarak görülebileceği gibi, çalışmada elde edilen sonuçlar GK kaynaklı dağıtım seçeneklerinin fiyat olarak klasik dağıtım yöntemlerine karşı avantajlı olduğu sürece geçerli olacaktır.

Servis bölgesini, talep ve GK gelişlerini aşağıda anlatıldığı gibi üretiyoruz.

3.1.1 Servis bölgesi

Literatürde benzer çalışmalarda uygulandığı gibi (ör. [3], [12]), bir kenar uzunluğu $L = 25$ km olan kare şeklinde bir servis bölgesini göz önüne alıyoruz. Bölge içindeki herhangi iki nokta arasındaki uzaklık için Öklid mesafesi hesabını kullanıyor ve

GK'ler için 40 km/saat'lik bir hız kabulünde bulunuyoruz. Problem örneklerindeki aday servis noktalarının sayısı 100 dür ($|S| = 100$). Servis noktalarının koordinatlarını $[0, L] \times [0, L]$ üzerinde dağılmış ayrık çift değişkenli tekdüze bir dağılımdan elde ediyoruz. Bir servis noktasının $s \in S$, hizmet sunabileceği nüfus göz önüne alınarak belirlenen ağırlık değerlerini pop_s ile ifade ediyoruz. Söz konusu ağırlık parametreleri, ileride bahsedileceği üzere talepleri üretirken önemli bir rol oynayacaklar. Kentsel alanların tekdüze olmayan (belli merkezlerde yoğunlaşan) nüfus dağılımlarını problem örneklerine yansıtma amacıyla, ilk beş servis noktasının ağırlıkları sırasıyla 1000, 500, 250, 125, 125 olarak kabul edilecek, geri kalan servis noktaları için ise ağırlıklar tekdüze dağılıma uygun şekilde [10],[50] aralığından seçilecektir. Servis noktalarındaki birim kapasite için günlük maliyet miktarları (TL) aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$m_s = \begin{cases} 20, & \text{eğer } pop_s \geq 500, \\ 15, & \text{eğer } 125 \leq pop_s < 500 \quad \forall s \in S \\ 10, & \text{eğer } pop_s < 125 \end{cases} \quad (20)$$

3.1.2 Talepler

İşletmelerle müşteriler arasındaki (B2C) paket alışverişini gözetten bir dağıtım problemi göz önüne alıyoruz ve iki tip paket akışını inceliyoruz. Bunlar, ileri akış ve geri akış olarak listelenebilir. İleri akış, mağaza/depolarından müşteriye teslimatı temsil ederken (satın alınan eşyaların teslimatı), geri akış ise müşteriden mağaza/depolarına transferleri (iade edilen eşyaların toplanması) ifade etmektedir. Depo/mağazaların kümesi servis noktalarının bir alt kümesidir $\bar{S} \subset S$. Bu noktalar ileri ve geri akışlar için sırasıyla çıkış ve varış noktalarıdır. Birden çoğa, birkaçtan çoğa, çoktan çoğa gibi farklı akış şekillerini gösterebilmek için $|\bar{S}| = \{1, 3, 5, 7, 9\}$ parametreleri kullanılarak problem örnekleri türetilmiştir. Problem örneklerinde farklı talep seviyelerini incelemek için, $|Q| = \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$ olduğu örnekleri üretiyoruz. İleri akış oranı için ise (mağazalardan müşterilere) $\Psi = 0.75$ seviyesini göz önüne almaktayız. Bir senaryo ω için, talep kümesini belirlerken her bir paket $q \in Q(\omega)$ için ilk olarak $[0, 1]$ üzerinde tanımlanmış tekdüze dağılımdan bir değer çekmekte ve bu değer ilgili Ψ seviyesinden büyükse bu talebi ileri akış olarak kabul etmekteyiz. Sonrasında, ileri (geri) akışlar için, \bar{S} kümesinden rastgele bir çıkış (varış) noktası seçmekteyiz. Burada, her $s \in \bar{S}$ seçilme olasılığının için pop_s ile orantılı olduğunu varsaymaktayız. Benzer şekilde, varış (çıkış) noktası için de bir $s \in S$ noktasının seçilme olasılığı pop_s ağırlığına orantılı olacak şekilde S 'ten bir servis noktası seçiyoruz. Talep geliş zamanlarını $[0, T - h]$ aralığından tek düze dağılıma uygun olarak seçiyoruz.

3.1.3 GK seyahatleri

Farklı GK katılım seviyelerini incelemek için $|V| \in \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$ şeklindeki problem örneklerini göz önüne alıyoruz. Her bir kurye $v \in V$ için S 'ten rassal olarak çıkış ve varış (teslim alma ve teslim etme) noktaları seçiyoruz. Bunların seçilme olasılıklarını talep gelişleri için yaptığımız gibi her $s \in \bar{S}$ için pop_s ağırlığı ile orantılı olarak belirliyoruz. GK seyahatlerinin geliş zamanlarını belirlemek için yine paketler için öngördüğümüz tekdüze bir dağılımı $U[0, T]$, kullanıyoruz.

3.2 Deney tasarımı

Araştırma sorularımızı yanıtlamak ve sistem dinamikleri hakkında önemli çıkarımlar elde etmek için, altı ayrı deney

grubu üzerine çalışıyoruz. Bu deney gruplarının her birini, detayları bir sonraki paragrafta belirtilen bir *temel düzenek* (TD) üzerinden, incelemek istediğimiz problem dinamiğine bağlı olan parametre değeri için farklı seviyeler kullanarak tanımlıyoruz. TD için $h = 120$, $|\bar{S}| = 5$, $|Q| = 1000$, $|V| = 1000$, $|\Omega| = 40$ parametre değerlerini öngörüyoruz.

Hesapsal çalışmalarımızda göz önüne aldığımız deney grupları şunlardır.

- Birinci deney grubumuz E1’de belirsiz talep ve dağıtım kapasitesi durumlarını yeterli bir şekilde göz önüne alabilmek için türetilmesi gereken senaryo sayısının ne olması gerektiğini araştırıyoruz. Bu kapsamda, diğer problem parametreleri TD değerleri halinde sabit kalırken $|\Omega| = \{5, 10, 20, 30, 40, 50\}$ olan problem örneklerini inceliyoruz,
- İkinci deney grubumuz E2’de, talep büyüklüğünün ağ tasarımı ve performans üzerine etkilerini araştırıyoruz. Bu sebeple, diğer problem parametreleri TD değerlerinde sabit kalırken $|Q| = \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$ olan problem örneklerini inceliyoruz,
- Üçüncü deney grubumuz E3’de, GK katılım seviyelerinin ağ tasarımı ve performansı üzerine etkilerini araştırıyoruz. Bu sebeple, diğer problem parametreleri TD değerlerinde sabit kalırken $|V| = \{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$ olan problem örneklerini inceliyoruz,
- Dördüncü deney grubumuz E4’de, KDD platformunun kâr payındaki değişikliklerin ağ tasarımı ve performansı üzerindeki etkilerini araştırıyoruz. Bu sebeple, diğer problem parametreleri TD değerlerinde sabit kalırken $\bar{m} = \{0, 2.5, 5, 7.5, 10\}$ olan problem örneklerini inceliyoruz,
- Beşinci deney grubumuz E5’de, KDD platformunun garanti ettiği hizmet süresinin ağ tasarımı ve performansı üzerindeki etkilerini araştırıyoruz. Bu sebeple, diğer problem parametreleri TD değerlerinde sabit kalırken $h = \{60, 90, 120, 150, 180\}$ dk. olan problem örneklerini inceliyoruz,
- Altıncı deney grubumuz E6’da, servis alanındaki mağaza/depo sayısının sistem performansı üzerine etkilerini araştırıyoruz. Bu sebeple, diğer problem parametreleri TD değerlerinde sabit kalırken $|\bar{S}| = \{1, 3, 5, 7, 9\}$ olan problem örneklerini inceliyoruz.

Deneylerimizi 16 GB RAM ve 3.6 GHz, Intel Core i7-4790 işlemcili, Windows 7 işletim sistemi kullanan bir masaüstü bilgisayar ile gerçekleştirdik. Makalede önerdiğimiz BD algoritmasını JAVA dilinde kodlayıp, karışık-tamsayı ve doğrusal problemlerin çözümlerinde CPLEX 12.9 çözücüsünü kullandık.

3.3 Analiz

Deneylere ait detaylı sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur. Tablodaki “Grup” sütunu ilgili problem örneğinin ait olduğu deney grubunu göstermektedir. Her satır için, ilgili problem örneğini karakterize eden (TD’den farklı olan) parametre değeri “Problem” sütununda gösterilmiştir. BD algoritması boyunca ana probleme eklenen kesilerin sayısı “Eklenen kesi sayısı” sütununda, algoritma sonlandığında elde edilen çözüm değeri (beklenen kâr) ise “BD çözüm değeri” sütununda belirtilmektedir. “Benzetim çözüm değeri” sütunu ise, BD çözümünde öngörülen kâr miktarının doğruluğunu test etmek üzere, çözümde belirlenen kapasiteler sabitlenerek ve çözüm

esnasında kullanılanlardan farklı 50 yeni senaryoda en iyi rotalama kararları göz önüne alındığında (TAM bu yeni senaryolar için kapasite değerleri sabitlenerek çözüldüğünde) elde edilen ortalama kâr miktarını göstermektedir. BD çözüm değerinin, benzetim çözüm değerinden ne kadar büyük olduğu (yüzde olarak) incelemede kolaylık sağlaması açısından “Fark” sütununda belirtilmektedir (eksi farklar benzetim çözümünün daha büyük olduğu durumları göstermektedir). BD çözümünde toplamda kaç servis noktasının açıldığı (sıfırdan büyük kapasite kurulduğu) ve toplamda kurulan saklama kapasitesi sırasıyla “Açılan SN sayısı” ve “Açılan kapasite” sütunlarında gösterilmiştir. Son olarak benzetim koşullarında, paketlerin yüzde kaçının GK seyahatleri ile taşındığı “GK dağıtım oranı” sütununda açıklanmıştır. Devam edilen kısımlarda, Tablo 2 de sunulan sonuçlar kapsamında elde ettiğimiz önemli hesapsal ve yönetsel çıkarımları detaylı olarak tartışacağız.

3.3.1 BD algoritmasının hesapsal performansı

Tablo 2’de sunulan deney sonuçları incelendiğinde ilk göze çarpan husus BD algoritmasının ele alınan büyük boyutlu problem örneklerinin çözümünde sağladığı başarıdır. Problem örneklerinin tamamının 5000 sn.’nin altında çözülebildiğini, ortalama çözüm zamanının ise 1500 sn.’nin altında olduğunu görüyoruz. KDDAT problemini literatüre tanıtan ilk çalışma bizimkisi olduğu için söz konusu hesapsal performans değerlerinin bir başka algoritmanın performansı ile karşılaştırma imkânı bulunmamaktadır. Ancak benzer ağ tasarımı problemleri için önerilen kesin çözüm yöntemlerinin ör: Yıldız ve diğ. [23], Yıldız ve diğ. [31]) hesapsal performansları göz önüne alındığında, BD’nin üst düzey bir performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Beklendiği gibi, çözüm sürelerinin paket sayısı, GK seyahatlerinin sayısı servis sürelerinin ve göz önüne alınan senaryo sayılarının yüksek olduğu problemlerde daha uzundur. Doğal olarak çözüm süreleri eklenen kesi sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Algoritma boyunca eklenen kesi sayısının, ele alınan problem örneklerinin büyüklüğüne kıyasla küçük olduğu (eklenen kesi sayısının ortalaması 1554.4’tür) söylenebilir. Gerek kesi sayılarının azlığı, gerekse alt problemlerin etkin bir şekilde çözülebiliyor olması BD algoritmasının üst düzey hesapsal performansının en önemli sebepleri olduğu değerlendirilebilir.

Önerdiğimiz iki seviyeli belirsiz programla modelinin talep ve GK seyahatleri için gelecekteki belirsizlikler yeterince hesaba katabilmesi için göz önüne alınması gereken senaryo sayısının ne olduğu kritik bir sorudur. Bu sorunun cevabı kapsamında E1 sonuçları bize önemli ipuçları sunmaktadır. Senaryo sayılarının 5 ile 50 arasında değiştiği bu örneklerin çözümleri incelendiğinde sadece 5 senaryonun göz önüne alındığı BD çözümü ile benzetim çözümü arasındaki farkın %5 civarında olduğunu, senaryo sayısı 40’ün üzerine çıktığında ise bu farkın %2 civarına düştüğünü görüyoruz.

Toplamda 40 senaryo kullanılarak yapılan E2-E6 deneylerinde, BD çözümü ile benzetim sonucu arasındaki farkın ortalama %1.8 civarında oluşunun da gösterdiği gibi, ele alınan problem örnekleri için, 40 ve üzerindeki senaryo sayılarının yüksek kalitede çözümler elde edilmesi için yeterli olduğu söylenebilir. İlginç bir çıkarım olarak, daha yüksek sayıda senaryolarla elde edilen çözümlerin genel olarak daha fazla kapasite açarak değil, söz konusu kapasiteyi daha doğru bir şekilde konumlandırarak daha iyi çözümler elde edebildiği görülmektedir.

Tablo 3. Deney sonuçları.
Table 3. Experiment results.

Grup	Problem	BD zaman (sn.)	Eklenen kesi sayısı	BD çözüm değeri	Benzetim çözüm değeri	Fark (%)	Açılan SN sayısı	Açılan kapasite	GK dağıtım oranı (%)
E1	$ \Omega = 5$	445	409	10603.7	10087.8	4.86	47	68	42.05
	$ \Omega = 10$	924	823	10432.6	10127.8	2.92	44	65	42.21
	$ \Omega = 20$	772	1020	10409.7	10130.7	2.68	45	65	42.24
	$ \Omega = 30$	1449	1459	10413.3	10140.0	2.62	42	62	42.05
	$ \Omega = 40$	1501	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$ \Omega = 50$	1870	2559	10401.8	10147.3	2.45	44	64	42.26
E2	$ Q = 500$	337	734	5145.2	5021.9	2.40	10	19	39.32
	$ Q = 750$	978	1527	7757.2	7557.6	2.57	31	46	41.47
	$ Q = 1000$	1504	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$ Q = 1250$	1824	1783	13115.3	12810.7	2.32	54	79	42.61
	$ Q = 1500$	2725	1872	15788.8	15498.0	1.84	60	89	42.84
E3	$ V = 500$	147	530	7881.5	7795.2	1.10	7	29	23.95
	$ V = 750$	583	1223	9205.7	9002.0	2.21	25	47	33.31
	$ V = 1000$	1505	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$ V = 1250$	2221	1766	11391.3	11242.9	1.30	58	75	49.78
	$ V = 1500$	4989	2071	12371.5	12167.6	1.65	64	79	56.02
E4	$\bar{m} = 0$	1738	1814	5394.6	5149.4	4.54	44	64	42.27
	$\bar{m} = 2.5$	1339	1674	7894.6	7649.4	3.11	44	64	42.27
	$\bar{m} = 5$	1506	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$\bar{m} = 7.5$	1619	1626	12894.6	12649.4	1.90	44	64	42.27
	$\bar{m} = 10$	1435	1780	15394.6	15149.4	1.59	44	64	42.26
E5	$ \bar{S} = 1$	1591	1846	11022.9	10979.8	0.39	56	66	50.35
	$ \bar{S} = 3$	1227	1575	10548.8	10472.0	0.73	53	64	48.27
	$ \bar{S} = 5$	1480	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$ \bar{S} = 7$	1074	1567	9569.7	9552.1	0.18	37	62	35.42
	$ \bar{S} = 9$	1110	1831	8803.8	8830.1	-0.30	33	57	31.35
E6	$h = 60$	76	515	7394.9	7335.3	0.81	5	8	20.09
	$h = 90$	281	805	8954.5	8846.0	1.21	16	29	31.69
	$h = 120$	1470	1842	10394.6	10149.4	2.36	44	64	42.27
	$h = 150$	4434	2171	11602.6	11392.1	1.81	60	84	50.37

3.3.2 Yönetimsel çıkarımlar

Ele alınan problem örneklerinin çözümleri sistem tasarımı açısından önemli sonuçlar sunmaktadır. Bu bölümde, her birinde farklı bir sistem dinamiğini araştırdığımız deney gruplarının sonuçlarını teker teker inceleyerek elde ettiğimiz önemli çıkarımları tartışacağız.

KDD ağının yapısını ve ortaya koyacağı performansı belirleyecek olan en önemli unsurlardan birisi sistem tarafından karşılanacak talebin boyutlarıdır. Bu kapsamda, E2 sonuçlarını incelediğimizde, beklendiği gibi açılan servis noktalarının ve kurulan kapasite miktarının talep sayısı ile doğru orantılı bir şekilde değiştiğini görüyoruz. Ancak ilginç bir sonuç olarak paket sayıları büyürken GK'ler tarafından yapılan dağıtımlarının oranlarının da arttığını görmekteyiz. Bunu sebebi, GK'ler tarafından yapılacak taşımalar için gerekli SN noktaları için yatırım yapılmasının, ancak talep belirli seviyeleri geçtikten sonra ÜPS ile taşımaya göre daha avantajlı bir hale gelmesidir. Bu durumun bir yansıması olarak, günlük talep miktarı 500 iken aday noktalardan sadece %10'una SN kurulurken, talep miktarı 1500 civarına geldiğinde bu oran %60'a yükselmektedir.

Diğer bir önemli problem parametresi GK seferlerinin sayısıdır. Bu kapsamda E3 deneyleri incelendiğinde, beklendiği gibi, artan GK sefer sayıları ile sistem karlılığının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. ÜPS ile yapılan dağıtımlara nazaran çok daha düşük maliyetlerle dağıtım imkânı sunan GK seferleri arttıkça bu seferlerle karşılanabilecek taleplerde artmaktadır. Bu artışa paralel olarak daha fazla servis noktasının daha yüksek kapasitelerle açıldığını gözlemliyoruz. GK'ler tarafından yapılan dağıtımlarının oranları incelendiğinde, saatlik dağıtım gibi oldukça zorlu ve yüksek maliyetli lojistik faaliyetlerinin oldukça önemli bir kısmının yolcuların atıl kapasiteleri kullanılarak maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Bu noktada, yeterli büyüklükte GK katılımı sağlanmasının sistem performansı açısından sahip olduğu kritik önem bir kere daha gözler önüne serilmektedir.

Ön görülen sistemin gerçek hayatta uygulanabilirliğinin en önemli belirleyicilerinden birisi de alternatif dağıtım metotlarına göre elde edilecek maliyet avantajının boyutudur. Bu kapsamda, E4 deneyleri incelendiğinde, ÜPS dağıtımlarının maliyeti hangi boyutta olursa olsun, bu seçenek GK seferleri ile taşıma yapılmasından daha pahalı olduğu müddetçe öngörülen sistemin ciddi avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir. Deney sonuçlarında gördüğümüz gibi, kâr payındaki büyük değişikliklere rağmen SN sayısı ve kapasitelerinde herhangi bir değişiklik olmamış, GK ile yapılan dağıtımların oranları aynı kalmıştır. Doğal olarak, ÜPS için yapılan ödemeler azaldıkça (yani \bar{m} arttıkça) GK'ler ile zamanında teslimat yapılması mümkün olmayan paketlerden elde edilen kâr miktarı artmakta, bu da toplam kârlılığı olumlu etkilemektedir. Bu kapsamda önemli bir yönetimsel çıkarım olarak, KDD sistemlerinin en azından başlangıç safhalarında klasik dağıtım faaliyetlerini destekler bir konumda hayata geçirilmesinin faydalı olabileceğini görüyoruz. Müteakiben düşecek maliyetler ve buna bağlı olarak müşterilerden istenilen ücretlerin azalması neticesinde artacak talep ve özellikle daha çok GK'nin katılım sağlanması ile KDD ağlarının geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

Taşıma taleplerinin mekânsal olarak dağılık olup olmaması da KDD sistemlerinin performansını etkileyecek önemli unsurlardan birisidir. Bu kapsamda, E5 deneylerinin sonuçları

incelendiğinde, artan mağaza sayısı ve buna paralel olarak GK seyahatleri ile tamamlanabilecek dağıtımların sayısının azalması sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, özellikle çoktan çoğa olan dağıtım modellerinde KDD'nin daha etkin kullanılabilmesi için GK katılımlarının daha üst seviyeye çıkarılması için tedbirler alınması gerektiği görülmektedir. Deney sonuçlarındaki SN sayılarının ve kapasitelerinin daha yakından incelenmesi ilginç bir sistem dinamiğini ortaya koymaktadır. Mağaza sayısı artıp, talep hizmet alanı içerisinde daha seyrek bir şekilde dağılmaya başladığında, KDD ağının daha az sayıda SN'yi daha fazla kapasite ile açtığını görüyoruz. Bu durum talep seyreklikçe SN'lerin aktarma noktaları olarak görevlerinin daha da kritik bir hale geldiğini göstermektedir.

KDD ağ yapısını ve performansını etkileyecek en önemli unsurlardan birisi de dağıtım hizmetleri için müşterilere sunulan servis süresi garantileridir. Bu durum, E6 deney sonuçlarında açıkça görülmektedir. Dağıtım süresi düştüğünde, GK seferleri ile paketlerin eşleştirilmesi imkânı azaldığı gibi aktarımlarla bu eşleştirmelerin artırılması da süre kısıtları sebebiyle zorlaşmaktadır. Ancak ilginç bir sonuç olarak 60dk gibi oldukça kısıtlı bir dağıtım süresi için bile dağıtımların beşte birinin halen GK seferleri ile yapıldığını görmekteyiz. Doğal olarak dağıtım sürelerinin azalıp GK seferleri ile yapılan dağıtımların azaldığı durumlar için çok daha az sayıda SN açılırken hizmet süresinin uzamasıyla beraber daha kapsamlı bir ağı teşkil edildiğini görüyoruz.

4 Sonuç

Şehir içi ulaştırma faaliyetlerinin daha düşük ekonomik ve çevresel maliyetlerle artan talep ve müşteri beklentilerini karşılayabilecek şekilde yürütülebilmesi için yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Sunduğu özgün fırsatlar ve mevcut teknolojilerle doğrudan uygulamaya geçirilebilme imkânı ile KDD modeli gerek uygulamacılar gerekse akademisyenler tarafından yoğun bir ilgi görmektedir. Bu çalışmada KDD yaklaşımı ile şehir içinde hızlı paket taşımacılığı hizmetlerinin maliyet etkin bir şekilde yapılabilmesi için çözülmesi gereken servis ağı tasarımı problemini literatüre tanıtıyor, söz konusu problemin çözümü için etkin bir Benders Ayrıştırma algoritması öneriyoruz. Gerçekleştirdiğimiz geniş kapsamlı hesapsal çalışmalar geliştirdiğimiz çözüm yönteminin etkinliğini ortaya koymasının yanında ağ tasarımı kapsamında önemli yönetimsel çıkarımlar sunmaktadır. Elde ettiğimiz sonuçlar, hızlı paket taşımacılığı gibi oldukça zorlu ve maliyetli (ekonomik ve çevresel) bir dağıtım faaliyeti için doğru tasarlanmış bir KDD yaklaşımının önemli kazanımlar sunma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Nispeten küçük sayıda (çalıştığımız problem örneklerinde en fazla 60 adet) servis noktaları ile dağıtımların önemli bir kısmının (çalıştığımız problem örneklerinde %56'ya kadar) "kitle" tarafından yapıldığı etkin bir dağıtım ağı teşkil etmenin mümkün olabileceği anlaşılmaktadır.

Hesapsal çalışmalarımızda göz önüne aldığımız problem örneklerinin yapay verilerle üretilmiş olması çalışmanın en önemli sınırlılıklarından birisini teşkil etmektedir. Her ne kadar ilgili problem parametreleri mümkün olduğunca gerçekçi bir şekilde tespit edilmeye çalışılmışsa da, elde edilen yönetimsel çıkarımların daha güvenilir olabilmesi için özellikle talep ve GK katılımı konusunda saha çalışmaları yapılarak (anketler, market araştırmaları) daha somut verilere ulaşılması

gereklidir. Böylelikle öngörülen yenilikçi ulaştırma sistemlerinin daha verimli bir şekilde teşkil edilmesi mümkün olacaktır.

Halen gelişmekte olan bir lojistik model olarak, ilgili uygulama alanının kendine özgü ihtiyaçları kapsamında farklı KDD uygulamaları mevcuttur. Çalışmamızda bu alternatiflerden sadece birisi üzerine odaklanılarak ilgili ağ tasarımı problemi ele alınmıştır. Gelecek çalışmalarımızda, bu makalede incelenen spesifik sistem yapısından farklı olarak paket rotalama kararlarının dinamik olarak verilmesi gerektiği durumlar için bu makalede geliştirdiğimiz çözüm yaklaşımlarının genişletilmesi üzerinde çalışmayı planlamaktayız. Bunun yanında, talep eden müşteriler için gönderici adresinden ilk servis noktasına ve son servis noktasından alıcının adresine olan ilk ve son adım transferlerin de göz önüne alındığı daha bütüncül bir dağıtım sisteminin geliştirilmesi hususunun incelenmesinin de literatüre önemli bir katkı sunabileceğini değerlendiriyoruz. Bu kapsamda, söz konusu nispeten kısa mesafeli ilk ve son adım taşımacılar için, düşük maliyetli (ekonomik ve çevresel) alternatifler sunan yeni otonom ve elektrikli araç teknolojilerinin (uçan gözler, dağıtım robotları, elektrikli bisikletler, vb.) göz önüne alınmasıyla ortaya çıkacak yeni çalışmaların gerek araştırmacılar gerekse uygulamacılar tarafından büyük bir ilgiyle karşılanacağını düşünmekteyiz.

5 Conclusion

With the rising concerns over the increasing costs and negative externalities of city logistics, the need for innovative approaches to come up with low-cost and environmentally friendly distribution systems is on the rise. One such innovative approach is crowd-shipping (CS), attracting significant attention from researchers and practitioners due to its unique advantages to offer an asset light and flexible distribution system. In this study, we introduce the crowd-shipping network design problem, which needs to be solved to establish efficient CS delivery systems. We offer a novel Benders Decomposition algorithm to solve this challenging problem. The results of our comprehensive numerical studies attest to the efficacy of the approach to solve practical size problem instances and provide significant managerial insights. In particular, our results show that by carefully choosing the locations and the capacities of the service points, it is possible to carry out a significant portion of express deliveries with the crowd provided delivery capacity (up to 56% in our experiments) without deploying a very large number of them (less than 60 in all our experiment) in the region, indicating the strong potential and applicability of the CS delivery systems in real world delivery operations.

One significant limitation of this study is considering problem instances that are generated with artificial data. Although we pay special attention to use problem parameters with realistic values, to improve the reliability of the managerial insights we derive, it is necessary to conduct field studies (e.g., surveys, market research) to obtain realistic demand and CS participation forecasts. Such detailed studies would be critical to improving the resulting system performance for this innovative delivery model.

Still, in their infancy, the CS models rapidly develop in different forms to address the specific needs of the particular application. As an obvious limitation, our study focusing only on one particular model. We plan to extend our solution approach to solve the network design problem, when one needs

to solve the package routing problem in a dynamic fashion. In addition, we think that studying more comprehensive approaches, where the first and last step deliveries (from senders' doors to the gateway service points and from the final service points to the receivers' doors) are also considered as a part of the delivery process, and the design problem is solved accordingly, can provide interesting new research directions to address important gaps in the literature. In that regard, considering emerging transportation technologies such as autonomous and electric vehicles (e.g., drones, delivery robots, electric bikes) to complete the relatively short distance first and last step deliveries would be of interest.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Barış YILDIZ fikrin oluşması, problemin tanımlanması, literatür taramasının yapılması, çözüm yönteminin geliştirilmesi, çözüm yönteminin kodlanması, deney düzeneğinin planlanması, problem örneklerinin türetilmesi, deney sonuçlarının analiz edilmesi, makalenin yazılması konularında katkıda bulunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Dolan S. "The challenges of Last Mile Delivery Logistics & the Technology Solutions Cutting Costs". <https://www.businessinsider.com/last-mile-delivery-shipping-explained?r=US&IR=T> (08.24.2020).
- [2] Marcucci E, Michela LP, Carrocci CH, Gatta V, Pieralice E. "Connected shared mobility for passengers and freight: Investigating the potential of crowdshipping in urban areas". *IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Napoli, Italy, 16-28 June 2017.
- [3] Yıldız B. "Express package routing problem with occasional couriers and transshipment locations". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102994>
- [4] Savelsbergh M, Van Woensel T. "50th anniversary invited article-city logistics: Challenges and opportunities". *Transportation Science*, 50(2), 579-590, 2016.
- [5] Yıldız B, Savelsbergh M. "Service and capacity planning in crowd-sourced delivery". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 177-199, 2019.
- [6] Raviv T, Tenzer EZ. "Crowd-Shipping of small parcels in a physical internet". https://www.researchgate.net/publication/326319843_Crowdshipping_of_small_parcel_in_a_physical_internet (01.06.2018).
- [7] Le TV, Ukkusuri SV. "Crowd-Shipping services for last mile delivery: Analysis from American survey data". *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100008>
- [8] Rai HB, Verlinde S, Merckx J, Macharis C. "Crowd logistics: an opportunity for more sustainable urban freight transport". *European Transport Research Review*, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0256-6>
- [9] Punel A, Stathopoulos A. "Modeling the acceptability of crowdsourced goods deliveries: Role of context and experience effects". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 18-38, 2017.

- [10] Archetti C, Savelsbergh M, Speranza MG. "The vehicle routing problem with occasional drivers". *European Journal of Operational Research*, 254(2), 472-480, 2016.
- [11] Macrina G, Pugliese LDP, Guerriero F, Laganà D. "The vehicle routing problem with occasional drivers and time windows". *International Conference on Optimization and Decision Science*, Serento, Italy, 4-7 September 2017.
- [12] Arslan AM, Agatz N, Kroon L, Zuidwijk R. "Crowdsourced delivery-A dynamic pickup and delivery problem with ad hoc drivers". *Transportation Science*, 53(1), 222-235, 2019.
- [13] Macrina G, Pugliese LDP, Guerriero F, Laporte G. "Crowdshipping with time windows and transshipment nodes". *Computers & Operations Research*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104806>
- [14] Chen C, Zhang D, Ma X, Guo B, Wang L, Wang Y, Sha E. "Crowddeliver: Planning city-wide package delivery paths leveraging the crowd of taxis". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(6), 1478-1496, 2016.
- [15] Chen C, Pan S, Wang Z, Zhong RY. "Using taxis to collect citywide E-commerce reverse flows: a crowdsourcing solution". *International Journal of Production Research*, 55(7), 1833-1844, 2017.
- [16] Chen W, Mes M, Schutten M. "Multi-hop driver-parcel matching problem with time windows". *Flexible services and manufacturing journal*, 30(3), 517-553, 2018.
- [17] Farahani RZ, Miandoabchi E, Szeto WY, Rashidi H. "A review of urban transportation network design problems". *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302, 2013.
- [18] Başkan Ö, Ceylan H. "Ulaşım ağ tasarımı problemlerinin çözümünde diferansiyel gelişim algoritması tabanlı çözüm yaklaşımları". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(9), 324-331, 2014.
- [19] Tekin G, Turgut Y, Yılmaz A, Arslan Ş, Çamcı A. "Deprem sonrası planlamaya yönelik lojistik ağ tasarımı: Ümraniye bölgesinde farklı deprem senaryoları için bir uygulama". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 98-105, 2019.
- [20] Yılmaz D, Gerçek H. "Analitik hiyerarşi yöntemi ile İstanbul'da bütünleşik bisiklet ağı kümelerinin önceliklendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 215-224, 2014.
- [21] Koç Ç, Özceylan E, Kesen SE, Çil ZA, Mete S. "İleri tedarik zinciri ağ tasarımı problemi: sezgisel yaklaşımlar". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 749-763, 2018.
- [22] Bayram V, Yaman H. "Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: A benders decomposition approach". *Transportation Science*, 52(2), 416-436, 2018.
- [23] Yıldız B, Olcaytu E, Şen A. "The urban recharging infrastructure design problem with stochastic demands and capacitated charging stations". *Transportation Research Part B: Methodological*, 119, 22-44, 2019.
- [24] Geoffrion AM. "Generalized Benders decomposition". *Journal of Optimization Theory and Applications*, 10(4), 237-260, 1972.
- [25] Van Slyke RM, Wets R. "L-shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic programming". *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(4), 638-663, 1969.
- [26] Bayram V, Yaman H. "Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: A benders decomposition approach". *Transportation Science*, 52(2), 416-436, 2018.
- [27] Orhan İ, Kapanoğlu M, Karakoç TH. "Havayolu operasyonlarında planlama ve çizelgeleme". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 181-191, 2010
- [28] Chu Y, Xia Q. "Generating benders cuts for a general class of integer programming problems". *International Conference on Integration of Artificial Intelligence (AI) and Operations Research (OR) Techniques in Constraint Programming*, Berlin, Germany, 10-14 April 2004.
- [29] Subulan K. "An interval programming based approach for fully uncertain resource constrained project scheduling problem considering project manager's attitude toward risk". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(4), 481-497, 2019.
- [30] Dietmann K. Crowdshipping the Last-Mile Delivery-An Empirical Investigation Into the Crowd's Willingness to Participate as Crowdshipping Drivers. MSc Université de Liège, Liège, Belgium, 2020.
- [31] Yıldız B, Arslan O, Karaşan O. "A branch and price approach for routing and refueling station location model". *European Journal of Operational Research*, 248(3), 815-826, 2016.