**Harekâta Hazır Amfİbİ Gruplar İçİn Personel ve Kargo Aktarmalı Hava Vasıtası Rotalama Problemİ**

**Ertan YAKICI[[1]](#footnote-1)**

***ÖZET***

*Bir Amfibi Grubun harekâta hazır olarak idame edilebilmesi için çoğunlukla harekâta katılan gemiler ve kıyıda konuşlu üslerden oluşan istasyonlar arasında günlük personel ve kargo nakliyatına ihtiyaç duyulur. Hava vasıtaları ile icra edilen nakliye harekâtının günlük planlaması, heterojen ve kapasite kısıtlı bir araç filosu ve iki farklı tipte yükü olan, çok depolu, zaman pencereli ve belirli durumlar için iki vasıtanın beraber uçuşunu gerektiren zengin bir araç rotalama probleminin çözümünü gerektirir. Söz konusu problem mevcut uygulamada yükün vasıtalar arası aktarımı göz önüne alınmadan çözülmekte ve aktarmaların sağlayabileceği tasarruf tespit edilememektedir. Bu makalede, bahse konu problemin taşınan personelin ve kargonun hava vasıtaları arasında aktarılabildiği daha genelleştirilmiş hali doğrusal tamsayılı programlama modeli olarak formüle edilmiştir. Pratikte gerçekleşebilecek senaryolar kullanılarak aktarmasız ve aktarmalı problem modelleri arasında karşılaştırma yapılmış ve aktarmaların dahil edildiği modelin uygulanması ile önemli ölçüde tasarruf sağlanabileceği görülmüştür.*

***Anahtar Sözcükler:*** *Araç Rotalama Problemi, Doğrusal Tamsayılı Programlama, Askeri Uygulamalar.*

**Aircraft Routing Problem with Personnel and Cargo TRANSHIPMENTs for Amphibious Ready Groups**

***ABSTRACT***

*For an Amphibious Ready Group to remain operational, daily transportation of personnel and cargo is often required between stations (ships and coastal bases). Daily planning of transportation operation executed by aircrafts requires the solution of a rich vehicle routing problem characterized by a heterogeneous capacitated vehicle ﬂeet, two load types, multiple depots, time windows, and synchronized flight of two vehicles in certain cases. In the current practice, the introduced problem is solved without considering load transhipment between vehicles. Therefore, the economy that may be provided by transhipment cannot be detected. In this study, the generalized version of the problem including personnel and cargo transhipment is formulated as an integer linear program. The problem versions with and without transhipments are compared using the test instances representing practical scenarios. It is observed that employing the model which allows transhipments provide significant benefits.*

***Keywords:*** *Vehicle Routing Problem, Integer Linear Programming, Military Applications*

**1. GİRİŞ**

Harekâta Hazır Amfibi Grup, gemiler ve hava vasıtalarından oluşur. İcra edilen amfibi harekât kapsamında personel ve kargonun, gemiler ve kıyıdaki üslerin oluşturduğu noktalar arasında hava vasıtaları ile taşınmasına ihtiyaç duyulur. Söz konusu nakliyatın kısıtlı zamanda bilgisayar destekli bir eniyileme aracı kullanılmadan planlanması etkin olmayan planlar üretebilir.

Amfibi harekât kapsamındaki gemilerin, hava vasıtalarının ve kıyıdaki üslerin özellikleri, hava vasıtalarının taşıma yaptığı noktalar arasındaki uçuş riski, iniş/kalkış platformlarının ve hava vasıtalarının eş zamanlı olarak başka harekâtları da icra etme zorunluluğu taşıma planlaması üzerinde bazı kısıtlamalara neden olur. Bu kısıtlamalar sistem uyumsuzlukları nedeniyle bazı hava vasıtalarının bazı platformlara iniş/kalkış yapamamasına, hava vasıtaları ve platformların iniş/kalkış icra edebilecekleri zaman pencerelerinin tam olarak örtüşmemesine ve taktik limitler nedeniyle bazı hava vasıtalarının belirli rota bacakları üzerinde tek başına uçuş icra edememelerine neden olmaktadır.

Söz konusu problem genel tanımıyla zengin bir araç rotalama problemidir (ARP). ARP literatürü oldukça geniş bir literatür olup problem ilk defa 1959 yılında Dantzig ve Ramser (1959) tarafından tek depolu kamyon rotalama problemi olarak ortaya atılmıştır. Müteakiben problemin farklı uygulamalarda karşılaşılan kısıtlamaları da içerecek şekilde birçok farklı versiyonu geliştirilmiştir. Bu makalede ele alınan problem özellikle son dönemde literatürde yer bulan zaman pencereli, toplama ve dağıtımlı, aktarmalı araç rotalama problemleri (ARP) ile yakınlık göstermektedir. Ancak hava vasıtalarının bazı durumlarda beraber uçuş yapma zorunluluğu ve her bir hava vasıtası için tüm platformların başlangıç veya bitiş yeri olarak tanımlanabilmesi bu örtüşmenin dışında kalan başlıca özelliklerdir.

Desaulniers vd. (2002), Cordeau ve Laporte (2007) ile Parragh vd. (2008) tarama makalelerinde zaman pencereli, toplama ve dağıtımlı ARP’ye ilişkin tam ve sezgisel çözüm yöntemlerine değinmişler, Drexl (2012) ise araç rotalamada senkronizasyon içeren çalışmaları incelemiş, karşılaşılan senkronizasyon gereksinimlerini sınıflandırmıştır. Drexl (2013) ile Rais vd. (2014) rotalama ve aktarma içeren problem türlerinin modellenmesini ele almıştır. Söz konusu problem belirli görevlerin yapılma zorunluluğunun yanı sıra araçlar için uzay-zaman senkronizasyonu ile yük hareketine ilişkin senkronizasyon gerektirmesi açısından incelenen problemle benzerlikler göstermektedir.

Literatürde, bu makalede sunulan probleme bazı açılardan benzerlik gösteren uygulama çalışmaları bulunmakta olup bunlar genelde hava vasıtalarının farklı konseptler dahilinde rotalanması ile ilgilidir. Belirli bir depo ile petrol çıkarma platformları arasındaki taşımayı konu alan Timlin ve Pulleyblank (1992), tek bir helikopterin rotalanmasına ilişkin olarak Velasco vd. (2009) ve helikopterlerin afet anında insani yardım maksatlı kullanılması kapsamında Barbarasoğlu vd. (2002) ve Özdamar (2011) tarafından yapılan çalışmalar bunlara örnek olarak verilebilir. Stentoft Arlbjorn vd. (2011), Halskau (2014) ve Gribkovskaia vd. (2015) yolcu güvenliğini esas alan helikopter rotalama problemlerini ele almışlardır.

Benzer konular askeri alanda daha önce de çalışma konusu olmuştur. Brown vd. (2013) harekât esnasında nakledilen personelin patlayıcı tehlikesine maruz kaldığı kara nakliyatını azaltmak maksadıyla önceliklendirilmiş personel ve kargonun havadan nakliyatının ençoklanmasını sağlayan problem üzerinde çalışmışlardır.

Harekâta hazır amfibi grupların taşınmasını konu alan çalışma Hartman (2015) tarafından yüksek lisans tezi olarak çalışılmış, ancak bu tezde vasıtalar arasında personel ve kargo aktarımı problem kapsamı dışında tutulmuştur. Koşulların elvermesi halinde aktarmalar hava vasıtaları için hem yakıt tasarrufu, hem de zaman yönetimi açısından faydalı olabilmektedir. Bu makalede Hartman (2015) tarafından tanımlanan problem daha da genelleştirilerek vasıtalar arasında personel ve kargo aktarımı mümkün hale getirilmiş, problem Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli olarak formüle edilmiştir. Makalenin literatüre katkısı varsayımlarından dolayı oldukça zengin olan özel bir problemin tanıtılması ve formüle edilerek tanımlanması olmuştur. Ayrıca bu makalede tanımlanan problem çözümünün, aktarmaları içermeyen problem çözümü üzerine yapabileceği verimlilik artışı test problemleri çözümleri karşılaştırılarak somut olarak gösterilmiştir.

Makalenin ilerleyen bölümlerinde uygulanan varsayımlar açıklanarak model tanımlaması yapılmış, geliştirilen model pratikte gerçekleşebilecek senaryolar ile test edilerek aktarmalı ve aktarmasız modeller arasındaki maliyet etkinlik farkı ortaya konulmuştur.

**2. VARSAYIMLAR VE YÖNTEM**

Bu bölümde ilk önce varsayımlar açıklanmış ve müteakiben problem tamsayılı programlama modeli olarak formüle edilmiştir.

**2.1. Varsayımlar**

Yapılan varsayımlar, gemilerin amfibi harekât için konuşlanmasını tamamladıktan sonraki periyot için geçerlidir. Bu nedenle gemilerin alargadaki küçük çaptaki hareketlerinin ihmal edilebileceği, dolayısıyla iniş/kalkış platformları arasındaki mesafelerin sabit olduğu varsayılmıştır. Taşıma harekâtına katılan hava vasıtalarının toplam iniş/kalkış sayısı karar verici tarafından belirlenecek bir parametre ile sınırlandırılmış, bu sayede çok iniş/kalkış gerektiren durumlar için vasıtalar arasındaki iş dağılımı üzerinde dolaylı bir denge kurulmuştur. İniş/kalkış platformlarının en fazla iki zaman pencereli oldukları varsayılmış, herhangi bir hava vasıtasının zaman pencereleri olması halinde bu zaman pencerelerini modellemek yerine her zaman penceresi için ayrı hava vasıtaları modele dahil edilmiştir. Bir hava vasıtasının her inişinde, platforma sabitlenme, gerektiği taktirde yakıt ikmali ve uçucu personel değişimi, amfibi personel ile kargo indirme/yükleme ve platformdan ayrılma işlemleri için belirli bir sürenin geçeceği kabul edilmiştir. Taktik nedenlerle tek hava vasıtasının uçuş icra edemediği rota bacaklarında, beraber uçuş icra edilecek hava vasıtası ile aynı noktadan kalkış yapılacağı ve iki vasıtanın kalkış ve iniş zamanları arasındaki farkın belirlenen bir azami sürenin altında olacağı varsayılmıştır.

Hava vasıtaları herhangi bir noktada birbirleri arasında yük aktarımı yapabildikleri gibi, kendileri tarafından belirli bir noktaya getirilmiş yükü orada bırakarak, söz konusu noktaya daha sonra yaptıkları inişlerde alabilmektedirler. Bu özellik problemi daha da genelleştirerek çözüm kümesini genişletmekte ve mümkün olduğunda daha fazla tasarruf elde edilebilmesine imkan sağlamaktadır. Bu problemin aktarmasız taşıma yapan hali, Hartman (2015) tarafından formüle edilmiştir. Aktarmaların modele dahil edilebilmesi için yük alındığı yerden götürülmesi gereken yere giderken, taşıyan hava vasıtasından herhangi bir ara noktada kısmen veya tamamen bırakılabildiğinden, bu yükün rotası üzerinde aktarmaların yapıldığı noktada/noktalarda da takip edilmesi gerekmektedir. Bir taşıma talebine ait yükün ne kadarının nerede olduğunun takibine ilave olarak, yükü aktarma noktasından alacak vasıtanın o noktaya yükün bırakılmasından sonra gelmesi gereği de ayrıca takip edilmesi gereken zaman senkronizasyonuna ilişkin diğer bir husustur. Bu nedenle aktarmasız modelde (Hartman, 2015) gerek duyulmayan talep kümesi bu model kapsamında yaratılarak bir noktadan diğerine olan taşıma talebine ilişkin taşınacak tüm personel ve kargoyu temsil eden indis, ihtiyaç duyulan karar değişkenleri ve parametrelerde kullanılmıştır.

Önerilen modeli diğer birçok araç rotalama modellerinden ayıran ve dikkat çekilmesinde fayda olduğu değerlendirilen diğer bir husus da, vasıtaların ziyaret ettikleri noktaları tekrar ziyaret edebilmeleridir. Bu özellik vasıtaların bir noktadan diğerine olan hareketini tanımlayan karar değişkenine ilave bir boyut (uçuş bacağı boyutu) eklenerek sağlanmıştır. Modelin açıklamasında da belirtildiği üzere rotayı belirleyen $U\_{ijhs}$karar değişkeni $h$ indisli vasıtanın $s$ numaralı uçuş bacağında $i$ noktasından $j$ noktasına uçuş yapıp yapmadığını belirleyen değişkendir. İniş/kalkış yapılan noktalar (gemiler ve üsler) kümesini $I$ ile, azami uçuş bacağı sayısını $|S|$ ile tanımlarsak, bu durumda modelde varsayıldığı gibi her bir vasıtanın ilk kalkış ve son iniş noktasının sabit olduğu ve vasıtanın son iniş noktasında bulunduğu yerde kalmasının da bu nokta üzerinde bir uçuş bacağı olarak sayıldığı göz önüne alınırsa, bir vasıta için olabilecek toplam rota sayısına bir üst sınır olarak $|I|^{\left|S\right|-1}$ verilebilir.

**2.2. Model**

**2.2.1. İndis ve Kümeler**

$i,j\in I$ : İniş/kalkış yapılan istasyonlar (gemiler ve üsler).

$c\in C$ : Yük tipi (personel ya da kargo).

$r\in R$ : Taşıma talebi (farklı noktalar arasındaki her bir taşıma talebine ayrı bir $r$ indisi değeri verilir, $i$ noktasından $j$ noktasına olan personel ve kargo taşıma talebi bir bütün olarak aynı indisle gösterilir.)

$s,t\in S$ : $s$ ya da $t$, belirli bir vasıta tarafından icra edilen her iki nokta arasındaki uçuş bacağı için ya da yapılan her iniş için sayaç teşkil eder. Sayacın 1’den başladığı kabul edilmiştir. Ancak, modelin bazı kısıtlarında sıfır değeri aldığı durumlar olup, bu durumlar ilgili vasıtanın ilk başlangıç noktasında yapılan işlemi ifade etmektedir.

$h,k\in H$ : Hava vasıtası.

$(i,j)\in I2$ : Uçuş bacakları için mümkün olabilen tüm başlangıç ve bitiş noktaları kombinasyonu. Bu kombinasyon kümesi müteakiben açıklanan iki kümenin oluşturulmasında kullanılabilir. (Bir nokta için kendinden kendine olan rotalar kombinasyon kümesi dışında tutulmuş, ancak vasıtalar için tanımlanmış olan son iniş noktaları için kendinden kendine olan uçuşlar kombinasyon kümesine dahil edilmiştir.)

$(i,j,h)\in I2H$ : $h$ indisli vasıta tarafından aralarında taşıma yapılabilecek noktalar kombinasyonu. (Platform ve vasıta uyumsuzlukları ile tek başına mümkün olmayan uçuşlar kombinasyon kümesi dışında tutulmuştur.)

$(i,j,h)\in I2HH$ : $h$ indisli vasıta tarafından ancak başka bir vasıta eşliğinde taşıma yapılabilecek uçuş noktaları kombinasyonu: Platform ve vasıta uyumsuzlukları ile tek başına mümkün olan uçuşlar kombinasyon kümesi dışında tutulmuştur.

**2.2.2. Parametreler**

$tk\_{hc}$ : $h$ indisli vasıta için $c$ tipi yükü taşıma kapasitesi.

$ym\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için intikalde iken dakikada yapılan yakıt masrafı.

$bs\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için iniş sonrası kalkıştan önce minimum bekleme süresi.

$tt\_{rc}$ : $r$ indisli talep içindeki $c$ indisli yük miktarı.

$ii\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için ilk kalkış noktası.

$si\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için son iniş noktası.

$to\_{r}$ : $r$ indisli talep kapsamındaki yükü gönderen nokta.

$td\_{r}$ : $r$ indisli talep kapsamındaki yükü alan nokta.

$pb\_{1i}$ : $i$ indisli iniş/kalkış noktası için ilk zaman penceresi başlangıç anı.

$ps\_{1i}$ : $i$ indisli iniş/kalkış noktası için ilk zaman penceresi bitiş anı.

$pb\_{2i}$ : $i$ indisli iniş/kalkış noktası için ikinci zaman penceresi başlangıç anı.

$ps\_{2i}$ : $i$ indisli iniş/kalkış noktası için ikinci zaman penceresi bitiş anı.

$pb\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için zaman penceresi başlangıç anı.

$ps\_{h}$ : $h$ indisli vasıta için zaman penceresi bitiş anı.

$tz\_{ijh}$ : $h$ indisli vasıta için *i* noktasından $j$ noktasına olan transfer zamanı.

$as$ : taşıma harekâtı başlangıç ve bitiş zamanı arasındaki süre.

$af$ : çift vasıta uçuşlar için vasıtaların kalkış anı arasındaki azami zaman farkı.

$tc$ : taşınmayan her birim yük (personel ya da kargo) için varsayılan ceza maliyeti.

**2.2.3. Değişkenler**

$U\_{ijhs}$ : eğer $h$ indisli vasıta $s$ numaralı uçuş bacağını $i$ noktasından $j$ noktasına yaptıysa 1, aksi taktirde 0.

$L\_{hs}$ : $h$ indisli vasıtanın $s$ numaralı uçuş bacağının sonundaki iniş zamanı.

$P\_{rc}$ : $c$ indisli yük için $r$ indisli taşıma talebinin karşılanamayan kısmı.

$M\_{ijschr}$ : $h$ indisli vasıta tarafından yapılan$ s$ numaralı uçuş bacağında $i$ noktasından $j$ noktasına götürülen $r$ indisli talebe ait $c$ indisli yük miktarı.

$TS\_{ishtkcr}$: $r$ indisli talebe ait $c$ tipi yükün herhangi bir miktarı $h$ indisli vasıta tarafından $s$ numaralı uçuş bacağının sonunda $i$ noktasına getiriliyor ve $k$ indisli vasıta tarafından $t$ numaralı uçuş bacağının sonunda o noktadan alınıyorsa 1, aksi taktirde 0.

$S\_{ishtkcr}$ : $r$ indisli talebe ait $c$ tipi yük için, $h$ indisli vasıta tarafından yapılan $s$ numaralı uçuş bacağının sonunda $i$ noktasına getirilerek $k$ indisli vasıta tarafından $t$ numaralı uçuş bacağının sonunda o noktadan alınan yük miktarı.

$B\_{hkijst}$ : $U\_{ijhs}=1$ ve $h$ indisli vasıta $i$ noktasından $j$ noktasına olan $s$ numaralı uçuş bacağını $k$ indisli vasıtanın $t$ numaralı uçuş bacağı eşliğinde yapıyorsa 1, aksi taktirde 0.

$L\_{ish}$ : $h$ indisli vasıta $s$ numaralı uçuş bacağının sonunda $i$ noktasına, $i$ noktası için tanımlanan ikinci zaman penceresinde iniyorsa 1, aksi taktirde 0.

$T\_{ish}$ : $h$ indisli vasıta $s$ numaralı uçuş bacağının başında $i$ noktasından, $i$ noktası için tanımlanan ikinci zaman penceresinde kalkıyorsa 1, aksi taktirde 0.

**2.2.4. Formülasyon**

Problem amaç fonksiyonu (1) ve kısıtlar (2-35) ile tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonu ve kısıtlar sırasıyla açıklanmıştır.

**2.2.4.1. Amaç Fonksiyonu**

Min $\sum\_{(i,j,h)\in I2H}^{}\sum\_{s}^{}ym\_{h}tz\_{ijh}U\_{ijhs}$ + $\sum\_{r}^{}\sum\_{c}^{}tcP\_{rc}$ (1)

Amaç fonksiyonu hava vasıtalarının uçuş maliyetleri ile taşıma taleplerinin karşılanamayan her birimi için verilen ceza maliyetinin toplamını ifade etmektedir. Bir birimlik ceza maliyeti, bir personel ya da kargonun taşınamaması halinde operasyona olan etkisinin kullanılan parasal ölçekte bir ifadesi olup, karar vericinin mevcut koşullar altında yaptığı değerlendirmeye bağlı olacaktır.

**2.2.4.2. Rotalama ve Zaman İlişkili Kısıtlar**

$L\_{h(s+1)}\geq L\_{hs}+\sum\_{\left(i,j\right);\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}(tz\_{ijh}+bs\_{h})U\_{ijh(s+1)}$$∀$$s$*:* $s<|S|, h$(2)

$L\_{jsh}$$\leq \sum\_{i:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}U\_{ijhs} $$∀$$j$*,* $s$*,* $h$(3)

$T\_{ish}$$\leq \sum\_{j:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}U\_{ijhs}$$∀$$i$*,* $s$*,* $h$(4)

$L\_{hs}\geq \sum\_{\left(i,j\right):\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}max⁡(pb\_{1j},pb\_{h})U\_{ijhs}+ \sum\_{j}^{}max⁡(0,pb\_{2j}-max⁡(pb\_{1j},pb\_{h}))L\_{jsh}$$∀$$s$*,* $h$(5)

$L\_{hs}\leq \sum\_{\left(i,j\right):\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}min⁡(ps\_{1j},ps\_{h})U\_{ijhs}+ \sum\_{j}^{}max⁡(0,ps\_{2j}-min⁡(ps\_{1j},ps\_{h}))L\_{jsh}$$∀$$s$*,* $h$(6)

$L\_{hs}\geq \sum\_{\left(i,j\right):\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}(max⁡(pb\_{1i},pb\_{h})+tz\_{ijh})U\_{ijhs}+ \sum\_{i}^{}max⁡(0,pb\_{2i}-max⁡(pb\_{1i},pb\_{h}))T\_{ish}$$∀$$s$*,* $h$(7)

$L\_{hs}\leq \sum\_{\left(i,j\right):\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}(min⁡(ps\_{1i},ps\_{h})+tz\_{ijh})U\_{ijhs}+ \sum\_{i}^{}max⁡(0,ps\_{2i}-min⁡(ps\_{1i},ps\_{h}))T\_{ish}$$∀$$s$*,* $h$(8)

$U\_{ijhs}$$=\sum\_{k:k\ne h}^{}\sum\_{t}^{}B\_{hkijst}$$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2HH, s$(9)

$B\_{hkijst:h\ne k}\leq $$U\_{ijkt}$$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2HH, s, t, k$(10)

$L\_{hs}- L\_{kt}\leq af$$B\_{hkijst}+ as (1-B\_{hkijst})$$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2H, s, t, k:k\ne h$(11)

$L\_{kt-1}-L\_{hs-1}\leq af$$B\_{hkijst}+ as (1-B\_{hkijst})$$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2H, s, t, k:k\ne h$(12)

$\sum\_{j:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}U\_{ijhs}=1 $$∀$$h$*,* $i$*:* $i=ii\_{h}$*,* $s=1$(13)

$\sum\_{i:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}U\_{ijhs}=1 $$∀$$h$*,* $j$*:* $j=si\_{h}$*,* $s=|S|$(14)

$U\_{ijhs} =\sum\_{i':\left(j,i^{'},h\right)\in I2H}^{}U\_{ji^{'}h(s+1)} $$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2H$*:* $i=ii\_{h}$*,* $s=1$(15)

$\sum\_{i:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}U\_{ijhs} =\sum\_{i:\left(j,i, h\right)\in I2H}^{}U\_{jih(s+1)} $$∀$$j$*,* $h$*,* $s:1<s<|S|$(16)

Kısıt (2) her uçuş bacağı için varılan noktaya en erken iniş zamanını belirler. Kısıt (3) ve (4) ancak uygun rotalama yapıldığı taktirde ikinci zaman penceresinde iniş ve kalkışın mümkün olduğunu ifade eder. Kısıt (5), (6), (7) ve (8) iniş ve kalkışların mümkün olan en erken ve en geç zamanlar içerisinde gerçekleşme şartını, Kısıt (9) ve (10) bir hava vasıtası için tek başına uçuşun mümkün olmadığı uçuş bacaklarının ikinci bir hava vasıtası ile beraber yapılma şartını sağlar. Kısıt (11) ve (12) çift vasıtalı uçuşlarda iki vasıtanın kalkış ve iniş zamanlarının arasındaki farkın belirlenen azami sürenin altında olmasını, Kısıt (13) ve (14) her vasıta için ilk kalkış ve son inişin o vasıta için belirlenmiş olan noktalarda yapılmasını sağlar. Kısıt (15) ve (16) vasıta iniş/kalkışları için her noktada akış dengesini tanımlar. Kısıt (15) ilk kalkış noktasından olan ilk uçuş bacağı sonunda inilen noktadan tekrar kalkışın ikinci uçuş bacağında olmasını, Kısıt (16) ise ilk uçuş bacağı haricindeki bacaklarda inilen noktalardan kalkışların müteakip ilk bacaklarda olmasını sağlar. Kısıt (15)’te $i$ ve $j$ indisleri başka amaçlarla kullanıldığından bu indislerle aynı işlevi görecek ilave bir indise ihtiyaç duyulmuş, bu nedenle $i^{'}$ indisi kullanılmıştır. Kısıt (5), (6), (7) ve (8)’de kullanılan, “$max$” ve “$min$” olarak ifade edilen fonksiyonlar girdi olarak aldığı parametrelerin sırasıyla en büyüğünü ve en küçüğünü hesaplamaktadır. Bu fonksiyonlar girdi olarak karar değişkeni içermediğinden eniyileme öncesi hesaplanabilmekte ve doğrusallığı bozmamaktadır.

**2.2.4.3. Taşıma ve Aktarma Kısıtları**

$\sum\_{j:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}\sum\_{s}^{}\sum\_{h}^{}M\_{ijschr}= tt\_{rc}- P\_{rc} $$∀$$i$*:* $i=to\_{r}$*,* $r$*,* $c$(17)

$\sum\_{i:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}\sum\_{s}^{}\sum\_{h}^{}M\_{ijschr}= tt\_{rc}- P\_{rc} $$∀$$j$*:* $j=td\_{r}$*,* $r$*,* $c$(18)

$\sum\_{i:\left(i,j,h\right)\in I2H}^{}\sum\_{s}^{}\sum\_{h}^{}M\_{ijschr}= \sum\_{i:\left(j,i,h\right)\in I2H}^{}\sum\_{s}^{}\sum\_{h}^{}M\_{jischr} $$∀$$j$*:* $j\ne to\_{r} ⋀ j\ne td\_{r} $*,* $r$*,* $c$(19)

$\sum\_{r}^{}M\_{ijschr}\leq tk\_{hc} U\_{ijhs}$$∀$ *(*$i$*,* $j$*,* $h$*)*$ \in I2H$*,* $s$*,* $c$(20)

$L\_{kt}- \sum\_{j:\left(i,j,k\right)\in I2H}^{}tz\_{ijk}U\_{ijkt}-L\_{hs}\geq (TS\_{ish(t-1)kcr}-1)\* as$

$∀$$i$*:* $i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $s$*,* $h$*:* $h\ne k$*,* $t$*,* $k$*,* $c$*,* $r$(21)

$L\_{kt}- \sum\_{j:\left(i,j,k\right)\in I2H}^{}(tz\_{ijk}+bs\_{k})U\_{ijkt}-L\_{hs}\geq (TS\_{ish(t-1)kcr}-1)\* as$

$∀$$i$*:* $i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $s$*,* $h$*:* $h=k$*,* $t$*,* $k$*,* $c$*,* $r$(22)

$\sum\_{j}^{}U\_{jihs}+\sum\_{j}^{}U\_{ijk(t+1)}\geq 2\* TS\_{ishtkcr} $$∀$$i$*:* $i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $s$*,* $h$*,* $t:t<|S|$*,* $k$*,* $c$*,* $r$(23)

$\sum\_{s}^{}\sum\_{h}^{}S\_{ish\left(t-1\right)kcr}=\sum\_{j:\left(i,j,k\right)\in I2H}^{}M\_{ijtckr} $$∀ i: i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $t$*,* $k$*,* $c$*,* $r$(24)

$\sum\_{t}^{}\sum\_{k}^{}S\_{ish(t-1)kcr}=\sum\_{j:\left(j,i,h\right)\in I2H}^{}M\_{jischr} $$∀ i: i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $s$*,* $h$*,* $c$*,* $r$(25)

$tt\_{rc}\* TS\_{ishtkcr} \geq S\_{ishtkcr} $$∀$$i$*:* $i\ne to\_{r} ⋀ i\ne td\_{r}$*,* $s$*,* $h$*,* $t$*,* $k$*,* $c$*,* $r$(26)

Kısıt (17) ve (18) herhangi bir talebin teslim edilemeyecek kısmının, talebin çıkış noktasında bırakılması, dağıtımı yapılmak üzere alınmış kısmının ise varış noktasına teslim edilmesi koşulunu ifade eder. Kısıt (19) yük için çıkış ve teslim noktası haricindeki her noktada akış dengesininin sağlanması şartını, Kısıt (20) her uçuş bacağında kapasite limitinin altında kalınması şartını tanımlar. Kısıt (21) ve (22) bir vasıtadan diğerine aktarılan yük için zaman senkronizasyonunu (yükün bir noktadan alınabilmesi için o noktaya daha önce getirilmiş olması şartını), Kısıt (23) aktarmanın gerçekleşebilmesi için rotalamanın uygun şekilde yapılmasını sağlar. Kısıt (24) ve (25) belirli bir uçuş bacağında belirli bir vasıta tarafından alınmak üzere bir noktaya getirilmiş yük toplamının o vasıta tarafından tanımlanmış uçuş bacağında o noktadan alınmasını sağlar. Kısıt (26) yük aktarma ile ilgili tanımlanmış olan değişkenlerin birbirleri ile bağlantısını kurar.

**2.2.4.4. Değişkenler İçin Değer Kümeleri**

$U\_{ijhs}\in (0,1)$(27)

$L\_{hs}$$\in R+$(28)

$P\_{rc}$$\in Z+$(29)

$M\_{ijschr}$$\in Z+$(30)

$TS\_{ishtkcr}$$\in (0,1)$(31)

$S\_{ishtkcr}$$\in Z+$(32)

$B\_{hkijst}$$\in (0,1)$(33)

$L\_{ish}$$\in (0,1)$(34)

$T\_{ish}$$\in (0,1)$ (35)

(27)’den (35)’e kadar olan kısıtlar karar değişkenlerinin tanımlandığı sayı kümelerini ifade eder. $R+$ ve $Z+$ kümeleri negatif sayılar hariç tutulmak koşuluyla, sırasıyla rasyonel sayılar ve tamsayılar kümelerini tanımlamaktadır.

**2.2.5. Küme Büyüklüklerinin Problem Büyüklüğüne Etkileri**

Problem büyüklüğü olarak ele alabileceğimiz değişken ve kısıt sayıları, problemde kullanılan kümelerin boyutları ile ilişkilidir. $I, H$ ve $S$ kümeleri bazı değişken ve kısıt sayılarını küme büyüklüklerinin kareleri ile orantılı olarak artırırken bazılarını da doğrusal orantı ile artırmaktadır. Bunlardan $I$ ve $H$ kümelerinin büyüklükleri çoğu durumda karar verici tarafından değiştirilmesi mümkün olmayan, değiştirilmesi halinde de söz konusu harekâtın başarısını etkileyebilecek olan unsurlardır. Ancak uçuş bacakları için bir sayaç olarak kullanılan $S$ kümesinin büyüklüğü karar verici ya da karar desteği sağlayan kişi tarafından dikkat edilerek seçilmesi gereken bir unsurdur. Gereğinden çok büyük tanımlanan bir $S$ kümesi problemin boyutunu gereksiz yere artıracak, ancak amaç fonksiyonuna herhangi bir katkıda bulunmayacaktır. $C$ ve $R$ kümeleri, nispeten az sayıda değişken ve kısıtın sayısını doğrusal orantı ile etkilemektedir.

Sayısal bir örnek verecek olursak, tüm küme büyüklüklerinin 5 olduğunu varsayalım. Bu durumda yaklaşık değerlerle kesikli ve sürekli değişken sayıları 95’er bin, kısıt sayısı ise 185 bin olmaktadır. $I, H, S, C$ ve $R$ kümelerinin büyüklüklerini tek tek ve verilen sırayla 10’a çıkardığımızda söz konusu değerler yaklaşık olarak $I$ için 2,5-3 katına, $H$ ve $S$ için 4 katına, $C$ ve $R$ için 2 katına çıkmaktadır. Bu hesaplamalarda üzerinde doğrusal gevşetme yapılabilen kesikli değişkenler sürekli olarak sayılmış, değişkenlerin alabileceği değerlerin tanımlandığı kümeler kısıt olarak sayılmamıştır. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere vasıta sayısı ve uçuş bacağı sayacının üst sınırı değişken ve kısıt sayılarını en fazla etkileyen unsurlar olup bunları iniş-kalkış yapılan noktaların sayısı takip etmektedir. Taşıma talebi sayısı ile yük çeşitliliği problem büyüklüğünü doğrusal orantı ile etkilemektedir.

Burada belirtilmesinde fayda görülen diğer bir husus ise yukarıda bahsedilen kümelerden türetilen, $I2H$ ve $I2HH$ isimleri ile tanımlanan olurlu kombinasyonları içeren kümelerin kısıt sayısını azaltabileceği ve bu kümeler dışında kalan kombinasyonları içeren değişkenlerin sıfıra eşitlenebileceğidir.

**3. UYGULAMA ve BULGULAR**

Gerçekleşmesi muhtemel senaryolardan yola çıkılarak 10 adet test problemi oluşturulmuştur. Test problemlerinin elde edilmesinde, problemin aktarmalı ve aktarmasız olarak çözümünde aynı problem parametreleri geçerli olduğu ve bu iki çözüm birbirleriyle karşılaştırıldığı için rassal süreçlerle yaratılmış çok sayıda test probleminden ziyade gerçekçi ve birbirine benzemeyen alternatiflerin yaratılması ön planda tutulmuştur. Problemler hava vasıtasının özelliklerine, sayısına, gemi ve üs sayısına, bu noktalar arası taşıma taleplerine, vasıtalar için başlangıç ve bitiş noktalarına, vasıta ve gemiler/üslere ait zaman pencerlerine, vasıta-gemi uyumluluğuna ve belirli noktalar arasında çift vasıta uçuş gereksinimine göre farklılıklar göstermektedir. İstasyonlar (gemiler/üsler) konumlandırılırken bir istasyon merkezde ve diğer istasyonlar çevresindeki çember üzerinde homojen olarak dağıtılmış şekilde 4, 5, 6 veya 7 istasyon noktası kullanılmış, vasıta sayıları 4 ve 7 istasyonlu problemler için sırasıyla 2 ve 3 olarak belirlenmiş, 5 ve 6 istasyonlu problemlerde hem 2, hem de 3 vasıta kullanılmıştır. Senaryolarda kullanılan vasıtalardan birinin personel kapasitesinin 18, diğerinin (ya da diğerlerinin) 6 olduğu, kargo kapasitelerinin ise tüm vasıtalar için 1 olduğu kabul edilmiştir. Taşınacak personel sayıları 2’den 90’a kadar olacak şekilde bir test problemi haricinde 6’nın katları olarak, taşınacak kargo adetleri ise 5 ile 12 arasında belirlenmiştir. Bu rakamlar farklı ve gerçekçi kombinasyonlar yaratmak üzere test problemlerine atanmıştır. İstasyon vasıta uyumsuzluğu, toplam istasyon vasıta kombinasyonlarının % 15’i ile % 40’ı arasında olacak şekilde rassal olarak belirlenmiş, bir istasyonun tüm vasıtalarla uyumsuzluğu engellenmiştir. Beraber uçuş gerektiren bacak adedi her test probleminde en fazla bir tane olacak şekilde rassal olarak aralarında taşıma talebi olan istasyonları birleştiren bacaklar arasından, vasıta uyumsuzluklarının beraber uçuşu engelleme durumu (istasyonların sadece bir vasıta ile uyumlu olmaları hali) gözetilerek seçilmiştir. Zaman kısıtlamaları, olurlu çözüm kümesini kısıtlayacak şekilde test probleminin diğer tüm özellikleri (taşınacak personel ve kargo sayısı, vasıta istasyon uyumsuzluğu, beraber uçuş zorunluluğu) değerlendirilerek ve taşıma taleplerinin gerçekleşmesini önlemeyecek şekilde farklı alternatifler yaratacak şekilde belirlenmiştir. Çift vasıta uçuşlar için vasıtaların kalkış anı arasındaki azami zaman farkı 1 dakika, taşıma harekâtı başlangıç ve bitiş anı arasındaki süre azami 5 saat, iniş ve kalkışlar arasındaki süre asgari 15 dakika olarak kabul edilmiştir. Problemlerde, bir vasıta için azami uçuş bacağı sayısı 10 olarak alınmıştır. Herhangi bir taşınamayan personel ya da kargonun harekâtın başarısını olumsuz etkileyeceği, karar verici için bu etkinin yapılacak taşıma maliyeti yanında çok yüksek değerde olduğu varsayılarak taşınamayan personel ya da kargonun her birimi için büyük bir ceza maliyeti belirlenmiş olup (1.000.000 TL), test senaryolarında tüm taşıma taleplerinin karşılanabildiği görülmüştür.

Çizelge 1’de test problemlerinin özellikleri verilmiştir. Çizelgede, ilk sütunda her problem için bir numara verilmiş, diğer sütunlarda ise sırasıyla problem senaryosunda bulunan gemi/üs ve vasıta sayısı, toplam taşınacak personel sayısı ve kargo adedi, taşıma taleplerinin adedi, çift vasıta halinde uçuş gerektiren noktadan noktaya uçuş bacağı adedi, vasıtanın gemiye iniş yapmasını engelleyen toplam vasıta-gemi uyumsuzluklarının adedi, taşıma harekâtı için belirlenen tüm sürenin kullanımını kısıtlayan zaman pencerelerine sahip gemi/üs ve vasıta adedi belirtilmiştir.

**Çizelge 1. Test Problemleri Özellikleri**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Problem Numarası** | **Gemi/Üs Sayısı** | **Vasıta Sayısı** | **Taşınacak Personel Sayısı ve Kargo Adedi** | **Gemi/Üs Arası Taşıma Talebi Adedi** | **Beraber Uçuş Gerektiren Bacak Adedi** | **Vasıta ve Gemi Uyumsuzluk Adedi** | **Zaman Kısıtlamalı Gemi/Üs ve Vasıta Adedi** |
|
|
|
| 1 | 4 | 2 | 2-12 | 2 | 0 | 2 | 4-2 |
| 2 | 4 | 2 | 18-5 | 6 | 0 | 3 | 2-2 |
| 3 | 5 | 2 | 18-5 | 7 | 0 | 4 | 4-2 |
| 4 | 6 | 2 | 90-10 | 6 | 1 | 2 | 0-1 |
| 5 | 6 | 2 | 72-12 | 7 | 0 | 2 | 0-1 |
| 6 | 5 | 3 | 18-5 | 6 | 1 | 4 | 3-2 |
| 7 | 5 | 3 | 36-6 | 7 | 0 | 4 | 4-2 |
| 8 | 5 | 3 | 30-8 | 8 | 1 | 3 | 2-3 |
| 9 | 6 | 3 | 18-5 | 8 | 0 | 5 | 3-3 |
| 10 | 7 | 3 | 24-6 | 9 | 1 | 3 | 3-2 |

Yük sayıları ile ilgili olan ve tamsayı değerler alan $P\_{rc}$,$ M\_{ijschr}$ ve $S\_{ishtkcr}$ değişkenleri sürekli hale getirildiğinde yine tamsayılı çözümler alındığından, test problemleri bu kısmi doğrusal gevşetme ile çözülmüştür. Test problemlerinde aktarmalı model için kısıt sayısı 23 bin ile 350 bin arasında, toplam değişken sayısı 20 bin ile 300 bin arasında, kesikli değişken sayısı ise 13 bin ile 160 bin arasında değişmektedir. Test problemleri doğrusal gevşetme sonrası kesikli değişken ve kısıt sayılarına göre küçük problemden büyük probleme doğru sıralanmıştır. Test problem büyüklüklerini, taşınan yük tipleri ile toplam uçuş bacağı sayısı sabit tutulduğu için gemi/üs sayısı, vasıta sayısı ve taşıma talebi adedi belirlemektedir.

Test problemlerinin her biri, modelde verilen amaç fonksiyonu sabit tutularak bir kez Hartman (2015) tarafından verilen aktarmasız taşıma modelinin kısıt seti ile, bir kez de bu çalışmada sunulan ve aktarmalara izin veren genelleştirilmiş modelin kısıt seti ile 1,9 GHz işlemci hızına ve 4 GB belleğe sahip kişisel bilgisayar kullanılarak CPLEX 12.6.2.0 çözücü ile çözülmüş ve aktarmaların taşıma harekâtı kapsamında sağladığı tasarruf oranları hesaplanmıştır. Bahse konu tasarruf, aktarmalı modelin, bir yükün herhangi bir yerde bırakılarak farklı bir vasıta ya da aynı vasıta tarafından tekrar alınmasına izin vermesi sayesinde oluşmaktadır. Bir başka deyişle, aktarma sayesinde olurlu çözüm kümesi genişlemekte, aynı amaç fonksiyonu bu genişlemiş çözüm kümesinde daha iyi değer alabilecek çözüm ya da çözümler bulabilmektedir. Çizelge 2’de bahse konu tasarruf oranları, aktarma yapılan gemi/üs sayısı ve aktarma sayısı ile aktarmalı problem için çözüm süreleri sunulmuştur. Test problemlerinin büyüklüklerine göre sıralandığı dikkate alındığında çözüm sürelerinin problem büyüklüğü ile pozitif bir korelasyon içinde olduğu görülmektedir. Aktarmasız taşıma probleminin en iyi çözümü, test senaryoları için azami 3 saniye içerisinde alınabilmiş, aktarmalı taşıma probleminin en iyi çözümüne ulaşmak ise daha uzun süreler gerektirmekle beraber Şekil 1’de de gösterildiği üzere en fazla kesikli değişken ve kısıta sahip iki test problemi haricinde kısa sayılabilecek süreler almıştır. Taşıma planlamalarının çoğunlukla günlük yapıldığı değerlendirildiğinde uzun sürelerde çözülebilen iki test probleminin çözüm sürelerinin dahi makul çözüm sürelerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir.

Belirli parametrelerin çözüm süresini nasıl etkilediğini görebilmek için bir test problemi seçilmiş ve her seferinde sadece bir parametre değiştirilerek çözüm süresi üzerinde duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analizde problemin çözüm süresini taşınacak personel ve kargo sayısının vasıta kapasitelerine oranı, zaman kısıtlamaları, vasıta-gemi uyumsuzlukları ve beraber uçuş gereksiniminin etkilediği görülmüştür. 3 numaralı test problemi üzerinde yapılan analizde vasıta kapasitelerinin yarı yarıya azaltılması 3 dakikaya yakın olan çözüm süresini yaklaşık 7 dakikaya çıkarmış, vasıta-gemi uyumsuzluk adedinin ya da beraber uçuş gereksiniminin bir tane artırılması ise çözüm süresini yaklaşık 15 dakikaya çıkarmıştır. Zamanın vasıtalar için yarı yarıya kısıtlanması da çözüm süresini yaklaşık 20 dakika artırmıştır. Parametresi çok fazla ve etkileşim içinde olan böyle bir modelde parametre değişiminin çözüm süresi üzerindeki etkisinin problemden probleme farklılık gösterebileceği açıktır.

**Şekil 1. Problem Büyüklüğünün Aktarmalı Problem Çözüm Süresine Etkisi**

**Çizelge 2. Test Sonuçları**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Problem** **Numarası** | **Tasarruf** **Oranı** | **Aktarma Yapılan Gemi/Üs Sayısı -** **Toplam Aktarma Sayısı** | **Çözüm Süresi****(Aktarmalı Problem)****(Saniye)** |
| 1 | 38 % | 1-1 | 15 |
| 2 | 13 % | 1-2 | 56 |
| 3 | 5 % | 1-1 | 172 |
| 4 | 10 % | 1-1 | 29 |
| 5 | 14 % | 1-1 | 33 |
| 6 | 19 % | 1-2 | 396 |
| 7 | 16 % | 1-1 | 1570 |
| 8 | 16 % | 1-2 | 510 |
| 9 | 22 % | 2-2 | 9286 |
| 10 | 17 % | 1-3 | 11533 |

Sağlanan tasarruf, test senaryoları için % 5 ile % 38 arasında gerçekleşmiştir. Elde edilen tasarrufun büyüklüğünü gemi/üs noktalarının birbirlerine göre nispi durumları başta olmak üzere gemi-vasıta uyumsuzluğu, taşıma taleplerindeki yük adetleri ve diğer parametreler etkilemektedir. Yapılan duyarlılık analizinde de beklendiği gibi vasıta kapasitesinin azalması aktarmalardan sağlanabilecek tasarrufu artırmıştır. Diğer parametreler üzerindeki değişiklik ise amaç fonksiyonunun en iyi çözümdeki değerini etkilememiştir. Amaç fonksiyonundaki parametreler ve karar değişkenlerinden de anlaşılacağı gibi, bu değerin değişmesi için birim zamandaki yakıt masrafının değişmesi, yük ile taşıma kapasitesi arasındaki oranın değişmesi ya da zaman penceresinin daraltılması, gemi-vasıta uyumsuzluğunun artırılması veya beraber uçuş gereksiniminin artırılması gibi kısıtlamalardaki artışın bazı yüklerin taşınmasını engellemesi gerekmektedir.

Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, karar verici tarafından izlenecek en uygun yöntemin taşıma talepleri ve diğer parametrelerin belirlenmesinden itibaren her iki kısıt seti için de ayrı ayrı çözüm süreçlerinin başlatılarak taşıma anına kadar olan süre dahilinde alınan en iyi çözümün uygulanması olacağı görülmektedir. Böylelikle olası aktarmaların sağlayacağı tasarruf imkanları da tespit edilmiş olacaktır.

**4. SONUÇ**

Bu makalede harekâta hazır amfibi gruplar için yük aktarmalı taşıma problemi Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli olarak formüle edilmiştir. Bu kendine özgü zengin araç rotalama problemi heterojen ve kapasite kısıtlı bir filonun farklı tipte yüklerden oluşan gemi/üsler arası taşıma taleplerini en az maliyetle karşılamasını amaçlamaktadır. Problem, aktarmaların gerektirdiği senkronizasyonun dışında taktik gereksinimler nedeniyle de ilave zaman ve senkronizasyon kısıtlamaları içermektedir.

Karşılaşılması muhtemel senaryolar için taktik durumun aktarmalara elverişli olması halinde, söz konusu formülasyonun kullanımı ile halihazırda kullanılan aktarmasız formülasyona göre önemli seviyelerde tasarruf sağlanabileceği sayısal örneklerle gösterilmiştir.

**KAYNAKÇA**

* BROWN, G. G., CARLYLE, W. M. ve DELL, R. F., (2013), **“Optimizing Intratheater Military Airlift in Iraq and Afghanistan**”, *Military Operations Research*, 18 (3), 35–52.
* CORDEAU, J-F. ve LAPORTE, G., (2007), **“The Dial-a-Ride Problem: Models and Algorithms”**, *Annals of Operations Research*, 153 (1), 29–46.
* DANTZIG, G. B. ve RAMSER, J. H., (1959), **“The Truck Dispatching Problem”**, *Management Science*, 6 (1), 80–91.
* DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., ERDMANN, A., SOLOMON, M. M. ve SOUMIS, F., (2002), **“VRP with Pickup and Delivery”**, *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 225–242.
* DREXL, M., (2012), **“Synchronization in Vehicle Routing – A Survey of VRPs with Multiple Synchronization Constraints**”, *Transportation Science*, 46 (3), 297–316.
* DREXL, M., (2013), **“Applications of the Vehicle Routing Problem with Trailers and Transshipments**”, *European Journal of Operational Research*, 227 (2), 275–283.
* GRIBKOVSKAIA, I., HALSKAU, Ø. ve KOVALYOV, M. Y., (2015), **“Minimizing Takeoff and Landing Risk in Helicopter Pickup and Delivery Operations**”, *Omega*, 55, 73–80.
* HALSKAU, Ø., (2014), **“Offshore Helicopter Routing in a Hub and Spoke Fashion: Minimizing Expected Number of Fatalities”**, *Procedia Computer Science*, 31 , 1124–1132.
* HARTMAN, T. A., (2015), ***Rapid Airlift Planning for Amphibious Ready Groups***, Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, Monterey, Kaliforniya, ABD.
* ÖZDAMAR, L., (2011), **“Planning Helicopter Logistics in Disaster Relief”**, *OR Spectrum*, 33 (3), 655–672.
* PARRAGH, S. N., DOERNER, K. F. ve HARTL, R. F., (2008), **“A Survey on Pickup and Delivery Problem”**, *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 (1), 21–51.
* RAIS, A., ALVELOS, F. ve CARVALHO, M. S., (2014), **“New Mixed Integer Programming Model for the Pickup-and-Delivery Problem with Transshipment”**, *European Journal of Operational Research,* 235 (3), 530–539.
* STENTOFT ARLBJØRN, J., QIAN, F., GRIBKOVSKAIA, I. ve HALSKAU SR, Ø., (2011), **“Helicopter Routing in the Norwegian Oil Industry: Including Safety Concerns for Passenger Transport”**, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41 (4), 401–415.
* TIMLIN, M. T. F. ve PULLEYBLANK, W. R., (1992), **“Precedence Constrained Routing and Helicopter Scheduling: Heuristic Design”**, *Interfaces*, 22 (3), 100–111.
* VELASCO, N., CASTAGLIOLA, P., DEJAX, P., GUERET, C. ve PRINS, C., (2009), **“A Memetic Algorithm for a Pickup and Delivery Problem by Helicopter”**, *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem*, Editör: Pereira, [F. B.](https://scholar.google.com.tr/citations?user=R8QTXJEAAAAJ&hl=tr&oi=sra) ve Tavares, [J.,](https://scholar.google.com.tr/citations?user=pvg3qTQAAAAJ&hl=tr&oi=sra) Springer Berlin Heidelberg, 173–190.
1. ***Ertan YAKICI,*** *Dr. Öğr. Üyesi, Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi.*

	* *Makale Gönderim Tarihi: 30.09.2016 Kabul Tarihi: 07.03.2017* [↑](#footnote-ref-1)