



Çok amaçlı karma tam sayılı tesis yerleşim problemi modeli ve askeri tesiste uygulama

Multi objective mixed integer facility layout problem and application at military facility

Murat AKÇA^{1*}, Ramazan ŞAHİN²

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
mrtakca1@gmail.com

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
rsahin@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.03.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 26.07.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.26928
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

İşletmelerde günlük işlerin yerine getirilmesi için malzemeler, ürünler ve personel hareket etmek zorundadır. Motorlu araçlarla veya tesis içerisindeki taşıma sistemleriyle gerçekleşen bu hareketler, iş yerleri için önemli bir maliyet unsurudur. İyi bir tesis tasarımı yapılması durumunda, bölümler arasında gerçekleşen taşımaların azaltılmasıyla, bu maliyetler önemli oranlarda düşürebilmektedir. Fakat şimdiye kadar yapılan çalışmalar, üretim tesisleri üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer taraftan, askeri tesislerde yakıt tüketimi yüksek araçların ve sürekli hareket halinde olan personelin bulunması, burada da tesis yerleşiminin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada, literatürdeki bu eksikliği gidermek üzere, askeri tesislerin tasarımı üzerinde durulmuştur. Taşıma maliyetine ek olarak, insan sağlığı ve personel güvenliğini etkileyen revir ve müdahale merkezi gibi bölümlerin yerleşimi de dikkate alınmıştır. Bu iki amaçlı tesis yerleşim problemi için çok amaçlı karma tam sayılı matematiksel model kurulmuş ve gerçek verilerden yola çıkılarak bir uygulama çalışması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tesis yerleşim problemi, Askeri, Çok amaçlı optimizasyon, TYP

Abstract

Materials, products and workers have to move in order to perform the daily schedule of the organizations. This movement which is done by vehicles or material handling systems is an important cost element for the organizations. A good facility layout design may reduce this cost by minimizing the interdepartmental flow. Till today, most of the facility layout planning studies have been focused on production facilities. On the other hand, having vehicles with high fuel consumption and having continuously moving personnel makes facility layout important for also military facilities. In this study, in order to remedy this deficiency in the literature, we focused on military facilities. In addition to conventional transportation costs, the allocation of infirmary and quick reaction team which affects human health and personnel safety has also considered. We presented a multi-objective mixed integer programming model for this bi-objective facility layout problem. We applied this model on a military facility problem which is created by utilizing real data.

Keywords: Facility layout problem, Military, Multi objective optimization, FLP

1 Giriş

Tesis yerleşiminin amacı işletmeleri yüksek miktarda masraflardan kurtarabilmektedir. İyi bir tesis yerleşimi işletme maliyetlerini %30'a varan oranlarda düşürebilir [1]. Tesis kurulduktan sonra üzerinde değişiklik yapmak veya tesisi yeniden düzenlemek beraberinde büyük maliyetler getireceğinden, bu planlamanın başta en iyi şekilde yapılması çok önemlidir. Tompkins ve diğ. [1]'in tahminlerine göre, Amerika Birleşik Devletlerinin gayrisafi yurtiçi hasılasının %8'i yeni tesislere harcanmaktadır. Ülke ekonomisinde bu kadar büyük bir payı olan tesis planlaması üzerine çalışmaların yapılması önem arz etmektedir.

Hizmet sektöründe ülke güvenliğinin sürekliliğini sağlayan askeri tesislerin de planlanması üzerine çalışmalar yapıldığı takdirde, büyük faydalar elde edilecektir. Askeri tesisler birlikleri eğitirken bir yandan da günlük faaliyetleri yerine getirmektedir. Bu faaliyetlerde personel, araçlar ve teçhizat tesislerdeki bölümler arasında sürekli yer değiştirmektedir. Faaliyetler için gereken mali ihtiyaçlarını devletin kendilerine ayırdığı bütçeden karşılamaktadırlar. Askeri faaliyetlerde tanklar, zırhlı muharebe araçları, zırhlı personel taşıyıcılar ve arazi araçlarının kullanıldığı düşünüldüğünde, araçların büyük

bir maliyet unsuru olduğu görülmektedir. Motor güçleri ve dolayısıyla akaryakıt tüketimleri özellikle yüksek olan bu araçların, günlük faaliyetler ve eğitim faaliyetleri sırasında birlikler içerisindeki hareketleri de maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle askeri birliklerdeki bölümlerin yerleşimi maliyet açısından önemli bir karardır. Beş yüz bin üzerinde personelin görev yaptığı Türk Silahlı Kuvvetleri, ülkenin dört bir tarafında çok sayıda tesise sahiptir. Bu derece yüksek miktarda personele sahip olan bir kurumun tesislerinin en iyi şekilde planlanması, yapılacak iyileştirmenin etkisini artırmaktadır. İyi bir planlama, bir tesisi daha güvenli, etkili, verimli hale getirebilmekte ve personel motivasyonunu artırmaktadır. Bugüne kadar askeri tesislerin planlamasıyla ilgili yapılan çalışmalar, daha çok tesis yeri seçimi ile ilgili olmuştur. Tesis yerleşimi ile ilgili bir çalışmanın olmaması, bu çalışmanın yapılmasında motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu çalışmada, askeri tesislerin yerleşim optimizasyonu ele alınmıştır. Oluşturulan modelin gerçek hayattaki karşılığının en yüksek seviyede olması için, tesis yerleşiminde farklı boyutlu bölümler kullanılarak problem modellenmiştir. Kar amacı gütmeyen kurumlar olan askeri tesislerde, yerleşim için yalnızca maliyet faktörünün ele alınması yetersiz kalmaktadır. Yalnızca maliyet faktörü ele alındığında revir, itfaiye ve

müdahale merkezi gibi bölümlerin etkinliğini olumsuz etkileyecek tesis tasarımları ortaya çıkmaktadır. Acil durumlarda en hızlı şekilde müdahale etmesi gereken bu bölümlerin askeri tesislerde tüm birimlere mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir. Bu nedenle, tesis yerleşiminde bu bölümlerin etkinliği de güvenlik faktörü başlığı altında ele alınmıştır. Bu durum problemi çok amaçlı hale getirmektedir. Problemin çözümü için çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuş ve çözümü yapılmıştır.

İkinci bölümde, tesis yerleşim problemi ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Üçüncü bölümde, askeri tesis yerleşimi ve askeri tesisin özellikleri anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde, oluşturulan karma tam sayılı matematiksel modelin tanıtımı yer almaktadır. Beşinci bölümde, çözümün uygulanması ve elde edilen yerleşim planı bulunmaktadır. Son bölümde ise, sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

2 Tesis yerleşim problemi

Tesis; ürün ya da hizmetin üretilmesini sağlayan her türlü araç, gereç ve makineleri ve bu süreçleri yöneten insanları içinde barındıran bina ve alanlar olarak tanımlanmaktadır. Tesislerin faaliyetlerini amaçları doğrultusunda verimli ve etkili bir şekilde yerine getirebilmeleri için uygun bir şekilde planlanmaları gerekmektedir.

Tesis yerleşim problemi ise, bir tesisi oluşturan bölümlerin belirli amaçlar doğrultusunda tesis içerisindeki konumlarının belirlenmesi problemidir [2]. Problemin çözülmesi sonucunda, bölümlerin birbirlerine göre konumlarını gösteren blok yerleşim planı oluşturulmaktadır. Yedi bölümden oluşan bir üretim tesisi için oluşturulan blok yerleşim planı Şekil 1'de verilmiştir.

OFİSLER	ISIL İŞLEM	BOYAMA
DEPO	ÜRETİM	
	SEVKİYAT	GÜÇ KAYN.

Şekil 1: Örnek blok yerleşim planı.

Tesis yerleşim problemleri literatürde ilk olarak Koopmans ve Beckmann [3] tarafından ortaya konulmuştur. Problemin matematiksel yapısı incelendiğinde, karmaşık problemler kategorisine girmektedirler ve problem zorluğu NP-Zor olarak kabul edilmektedir. NP-Zor olması nedeniyle özellikle büyük boyuttaki problemlerin çözümü konusunda optimal bir çözüm ortaya konulamamaktadır. Bu nedenle, bu problemlerin çözümü için araştırmacılar sürekli çaba sarf etmektedirler [4].

Tesis yerleşim problemi ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu, taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi üzerine odaklanmış olsa da, son yıllarda yapılan çalışmaların çok amaçlı optimizasyona yöneldiği görülmektedir. Çünkü yalnızca bölümler arasındaki akış verilerini kullanarak yapılan optimizasyonlar, birçok faktörü yok saymakta ve gerçekçi olmayan çözümler üretmektedirler. Tesis yerleşim problemini

çok amaçlı olarak ilk ele alan Rosenblatt'tır [5]. Çalışmasında nicel amaç olan taşıma maliyetlerini azaltmaya ve nitel amaç olan yakınlık ilişkisi derecesini yükseltmeye çalışmıştır. Geliştirdiği algoritmayla alternatif yerleşim planları oluşturmuş ve ardından amaçlar için belirlenen ağırlıklarla en iyi yerleşim planını seçmiştir. Dutta ve Sahu ise amaç fonksiyonunu nitel ve nicel amaçlar arasındaki fark olarak tanımlamışlardır [6]. Verilen bir başlangıç çözümünü ikili bölüm değişiklikleriyle sistematik olarak geliştiren bir algoritma oluşturmuşlardır. Malakoti ve Tsurushima karar vericiyi bu süreçte daha fazla dâhil etmek istemişlerdir [7]. Karar vericiyle etkileşime girerek tercihlerini yansıtan bir uzman sistem geliştirmişlerdir. Raoot ve Rakshit ise yerleşim probleminde çok kriterli karar verme yöntemi kullanmışlardır [8]. Yerleşim alternatiflerini oluşturduktan sonra ELECTRE yöntemini kullanarak en iyi alternatifleri sıralayan ve karar vericiye sunan bir yöntem geliştirmişlerdir. Maniya ve Bhatt ise amaç ağırlıklarını belirlemenin subjektif yargılar içermesinin bir sorun olduğunu öne sürmüşlerdir [9]. Bu nedenle uzman görüşüne ihtiyaç duymayan öncelik seçim indeksi (preference selection index) yöntemini kullanmışlardır. Çok amaçlı tesis yerleşimi çalışmalarında farklı yöntemler kullanıldığı gibi birçok farklı amaç da dikkate alınmıştır. Saraswat ve diğ. [10] ortalama ara mamul miktarını ve malzeme taşıma araç sayısını minimize eden bir model ortaya koymuşlardır. Hathhorn ve diğ. [11] taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesine ek olarak tesis kurma maliyetinin en küçüklenmesini de dikkate almıştır. Şahin [12] taşıma maliyetlerini minimize ederken aynı zamanda bölümler arasındaki ilişkileri tanımlayan yakınlık derecesini maksimize etmeye çalışmıştır. Aiello ve diğ. [13] geliştirdikleri çok amaçlı modelde farklı olarak uzaklık isteklerinin ve en-boy oranı isteklerinin en büyüklenmesini amaç olarak eklemişlerdir. Yang ve Deuse ise çalışmalarında amaca enerji verimliliğini de katmışlardır [14].

Tesis yerleşim problemi literatürde çok çalışılan bir problemdir ve birçok literatür tarama makalesi de yayınlanmıştır. Tesis yerleşim probleminin modellenmesi, sınıflandırılması ve çözüm yöntemleri konusunda detaylı bilgi edinmek için Anjos ve Vieira [15], Moslemipour ve diğ. [16], Drira ve diğ. [4] ile Singh ve Sharma [17] tarafından yapılan literatür taraması çalışmalarına bakılabilir.

3 Askeri tesis yerleşimi

Askeri tesislerde eğitim ve günlük faaliyetler esnasında meydana gelen hareket ve taşımalar bu tesisler için bir maliyet oluşturmaktadır. Askeri tesisler aynı zamanda birer yaşam alanı olduğu için, içerisinde revir, yemekhane, itfaiye gibi bölümler de vardır. İtfaiyedeki yangın söndürme araçları günlük rutin olarak bir hareket oluşturmadığı için akış maliyetlerinde çok küçük bir maliyet değerine sahiptir. Bu nedenle olası bir çözümde matematiksel modelin, itfaiyeyi tesisin sınır noktalarına yakın bir yere atması muhtemeldir. Fakat acil durumlarda etkin olabilmesi için itfaiyenin, askeri tesis içerisindeki tüm bölümlere en kısa zamanda müdahale edebilmesi gerekmektedir. Aynı şekilde revirin de sağlıkla ilgili bir sorun olduğunda en hızlı müdahaleyi yapabilmesi için tesisdeki tüm bölümlere mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir. Ayrıca askeri kışlalarda güvenlik ihlallerinde müdahale edebilecek bir ani müdahale timi bulundurulmaktadır. Bu timin yerleşiminin de tüm bölümlere en kısa zamanda müdahale edebilecek şekilde yerleştirilmesi güvenlik açısından önemlidir. Askeri kışladaki personel ve tesis güvenliğini istenen seviyede tutabilmek için, bu üç bölümün

diğer bölümlere olan maksimum mesafesinin minimize edilmesi gerekmektedir.

Literatürde askeri tesislerin yerleşim problemi ile ilgili çok az çalışma bulunmaktadır. Robertson ve diğ. [18] askeri kamp için tesis yeri seçimi ve tesis yerleşimine dair bir çalışma yapmıştır. İlişki şemalarını kullanarak CRAFT algoritmasıyla problemi çözmüşlerdir. Stewart [19] patlayıcıların güvenlik mesafesini dikkate alarak askeri tesisler için bir çözüm geliştirmiştir. ABD'nin savunma bakanlığı tarafından kullanılan ESS (Explosives Safety Sitting) adlı bir yazılımla birlikte kullanılan bir genetik algoritma önerisi sunmuştur. Fakat hem personel güvenliğini dikkate alan hem de taşıma maliyetlerini minimize eden bir tesis yerleşim problemine literatürde rastlanmamıştır.

Askeri birliğin büyüklüğüne göre, birlikte bulunan personel sayısı, birliğin kapladığı toplam alan ve birlikte bulunan bölümler de değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışmada, tugay büyüklüğündeki bir askeri tesis yerleşimi dikkate alınmıştır. Oluşturulacak modelin uygulanabilirliğinin yüksek olması için, birçok ülkenin askeri birlik yapısı incelenmiş ve askeri birliklerde ortak olan bölümler belirlenmiştir. Bu bölümler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Askeri tesisin bölümleri.

ID	Tesis Adı	ID	Tesis Adı
1	Tatbikat Alanı	10	Koşuşlar ve Yemekhane
2	Tank Taburu	11	Mekanize Piyade Taburu
3	Topçu Taburu	12	Eğitim Alanı
4	Muhabere Destek Taburu	13	Atış Alanı
5	Lojistik Destek Taburu	14	Yakıt İkmal Merkezi
6	Dershaneler	15	Revir
7	Eğitim Destek Merkezi	16	Ani Müdahale Timi
8	Köpek Timi Merkezi	17	İtfaiye
9	Spor Tesisleri	18	Ana Giriş

Askeri tesisler genelde eğitim amaçlı kuruldukları için rutin faaliyetler de askerlerin faaliyetleri ve eğitimi üzerine kurulu olmaktadır. Bölümler arasındaki araç ve personel hareketliliğinin ortaya çıkarılabilmesi için bir askerin günlük rutini dikkate alınmıştır. Ece [20] tarafından yapılan çalışmadaki aylık rutin verileri kullanılarak günlük rota ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Bir askerin günlük rotası (Şekil 2) kullanılarak akış matrisi elde edilmiştir.

Askeri tesislerdeki toplam akışın en küçüklenmesi için, belirlenen personelin ve araçların günlük akış rotaları ve sıklıkları dikkate alınarak, aylık akış maliyetleri matrisi oluşturulmuştur. Taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi için akış matrisinden elde

edilen veriler uzaklık matrisiyle çarpılarak toplam maliyet bulunmaktadır.

Uzaklık matrisinde mesafelerin hesaplanmasında kullanılacak iki yöntem vardır; dik doğrusal uzaklık ve Öklid uzaklık. Tesiste gerçekleştirilecek olan hareketler araç yolları üzerinden olacağından ve yolların tasarımı dik doğrusal uzaklıkla hesaplanmaya daha uygun olduğundan, çalışmada tesisler arası mesafenin hesaplanmasında dik doğrusal uzaklık yöntemi kullanılmıştır.

4 Matematiksel model

Tesis yerleşim problemlerinde; problemin gösterimi kurulacak matematiksel modelin temelini oluşturmaktadır. Aynı zamanda problem yapısını, çözüm yöntemi ve etkinliğini önemli oranda etkilemektedir [21]. Gösterim yöntemleri temelde iki ana kategoriye ayrılır; kesikli gösterim ve sürekli gösterim. Kesikli gösterim kullanıldığında tüm bölümler eşit alanlı varsayılarak problem basitleştirilmekte ve gerçeklikten uzaklaşmaktadır. Sürekli gösterimde ise, farklı boyutlardaki bölümler dikkate alınarak bir modelleme yapılmaktadır. Bu çalışmada gerçek hayat problemlerinin modellenenilmesi ve çözülebilmesi için sürekli gösterim kullanılmıştır.

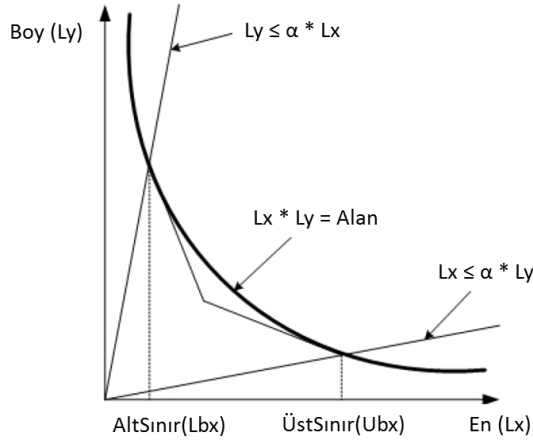
Tesisteki bölümlerin faaliyetlerini yerine getirebilmek için ihtiyaç duyduğu bir alan büyüklüğü vardır. Bu alanı sağlamak koşuluyla, modelin esnekliğini artırabilmek için bölümlerin en ve boyları karar değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bölümlerin alanları birbirinden farklıdır. Bölümlerin alanları sabit olmak üzere, en ve boyu karar değişkeni olarak aldığımızda, modelin oluşturacağı çözümdeki bölüm şekillerinin gerçeklikten uzak olmaması gerekmektedir. Uzunluğu veya genişliği orantısız olan bölüm şekilleri elde etmemek için modele bir en/boy oranı kısıdı eklenmiştir.

Alan kısıdı, en ve boy değişkenlerinin çarpımı olduğu için doğrusal değildir. Modelin doğrusal yapısını bozmamak için bu kısıt doğrusallaştırılmıştır. Doğrusallaştırma için Sherali ve diğ. [22] tarafından önerilen teğet destekler (Şekil 3) kullanılmıştır. Bu sayede alanlarda yalnızca %0.3'lük bir sapma ile modelin doğrusallığı korunmaktadır.

Bölümlerin koordinat düzleminde çakışmasını engellemek için modele, tesislerin birbirlerine göre olan konumlarını ifade edecek kısıtlar eklenmelidir. Birbirlerinin sınırlarına göre biri diğerinin solunda, sağında, üstünde veya altında olmak zorundadır. Modelde bunu ifade edebilmek için, her bir tesisin diğer tesislerle olan göreceli konumunu tanımlayacak ikili değişkenler eklenmiştir. Bu değişkenler problemi doğrusal programlama modelinden karma tam sayılı programlama modeline dönüştürmektedir.

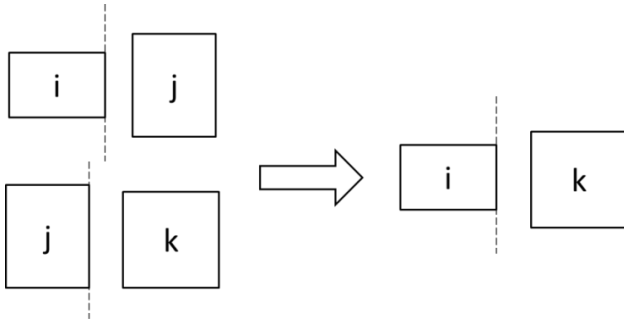


Şekil 2: Askerin günlük rotası.



Şekil 3: Alan kısıdının doğrusallaştırılması [13].

Bu ikili değişkenlerin oluşturduğu uygun olmayan çözümler kümeleri vardır. Bu durum Şekil 4'te üç bölümün birbiriyle ilişkisini gösteren bir örnekle açıklanmıştır. Eğer j bölümü i'nin sağında ve k bölümü de j'nin sağında ise, k bölümü i'nin sağında olmak zorundadır.



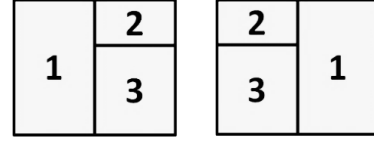
Şekil 4: Uygun çözüm kümesinde olması gereken durum.

Bahsedilen durumda, k bölümü ile i bölümü arasındaki ilişkiyi gösteren ikili değişkenin, k bölümünü i'nin solunda gösterdiği çözümler uygun değildir. Bu gibi uygun olmayan çözümleri engellemek için geliştirilen çift sıralı gösterim yöntemi modelde kullanılmıştır. İlk olarak transistörlerin tek bir yonga üzerinde verimli bir şekilde birleştirilerek devrelerin oluşturulması için geliştirilmiş bu tekniğin sonraki yıllarda tesis yerleşim problemi için de kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür [23]. Çift sıralı gösterim yönteminde, bölümlerin birbirlerine göre olan konumlarını tanımlamak için bölümlerden oluşan iki adet sıra oluşturulur. Bölümlerin bu sıralardaki konumlarına göre tesis yerleşimindeki birbirlerine göre konumları belirlenir. Karma tam sayılı programlama modeline çift sıralı gösterim eklendiğinde uygun olmayan ikili değişken setlerinin elenmesiyle problemin zorluk derecesi büyük oranda azalmaktadır.

Tesis yerleşiminde aynı sonuçları veren fakat koordinatlar açısından simetrik olan çözüm kümeleri oluşabilmektedir. Bu simetrik çözümlerden kurtulmak, çözüm süresini daha da aşağıya indirecektir. Örneğin Şekil 5'te görülen iki çözüm de aynı sonucu ifade etmelerine rağmen, model bu iki çözümü farklı kabul ettiği için bu tür çözümler, araştırılan çözüm kümesini büyütmede ve modelin sonuç vermesini zorlaştırmaktadır.

Simetrik çözümleri ortadan kaldırarak çözüm uzayını küçültmek için, en yüksek alana sahip p bölümü ve ikinci en

yüksek alana sahip q bölümü ele alınarak p bölümünün q bölümüne göre x ve y eksenlerinde geride kalması sağlanmıştır. Çok amaçlı karma tam sayılı matematiksel model oluşturulmuştur. Modelde kullanılan parametreler ve değişkenler Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 5: Simetrik çözümler.

Tablo 2: Parametreler.

N	Toplam bölüm sayısı
i, j	Yerleşimi yapılacak bölümlerin setleri ($i, j = 1, 2, 3, \dots, N$)
W_k	k amacının ağırlığı
f_{ij}	i ve j bölümleri arası toplam akış maliyeti
a_i	i bölümünün kaplayacağı alan
α_i	i bölümü için en/boy oranının üst sınırı, bölümün uzun ve kısa kenarı arasındaki müsaade edilebilir oran ($\alpha_i \geq 1$)
as_i^x	i bölümünün x koordinat düzleminde uzunluğunun alt sınırı
us_i^x	i bölümünün x koordinat düzleminde uzunluğunun üst sınırı
as_i^y	i bölümünün y koordinat düzleminde uzunluğunun alt sınırı
us_i^y	i bölümünün y koordinat düzleminde uzunluğunun üst sınırı
U^x	x koordinat düzleminde tesisin uzunluğu (eni)
U^y	y koordinat düzleminde tesisin uzunluğu (boyu)

Tablo 3: Değişkenler.

x_i	i bölümünün x koordinatındaki konumu
y_i	i bölümünün y koordinatındaki konumu
d_{ij}^x	i ve j bölümleri arasında x koordinatındaki mesafe
d_{ij}^y	i ve j bölümleri arasında y koordinatındaki mesafe
u_i^x	i bölümünün x koordinatındaki uzunluğunun yarısı
u_i^y	i bölümünün y koordinatındaki uzunluğunun yarısı
z_{ij}^*	i bölümünün j bölümüne göre birinci sıradaki konumunu gösteren ikili değişken
z_{ij}^*	i bölümünün j bölümüne göre ikinci sıradaki konumunu gösteren ikili değişken
$damx_i$	i bölümünün diğer bölümlere olan maksimum uzaklığıdır, acil durumlarda müdahale etmesi gereken bölümlerin yerleşimi için kullanılır

Modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları şu şekildedir;

$$\min W_1 \sum_i \sum_j f_{ij} (d_{ij}^x + d_{ij}^y) + W_2 \sum_{i \in A} damx_i \quad (1)$$

$$d_{ij}^x \geq x_i - x_j \quad (2)$$

$$d_{ij}^x \geq x_j - x_i \quad (3)$$

$$d_{ij}^y \geq y_i - y_j \quad (4)$$

$$d_{ij}^y \geq y_j - y_i \quad (5)$$

$$x_i + u_i^x \leq U^x \quad (6)$$

$$y_i + u_i^y \leq U^y \quad (7)$$

$$x_i \geq u_i^x \quad (8)$$

$$y_i \geq u_i^y \quad (9)$$

$$2u_i^x \geq as_i^x \quad (10)$$

$$2u_i^x \leq us_i^x \quad (11)$$

$$2u_i^y \geq as_i^y \quad (12)$$

$$2u_i^y \leq us_i^y \quad (13)$$

$$z_{ij}^+ + z_{ji}^+ = 1 \quad (14)$$

$$z_{ik}^+ \geq z_{ij}^+ + z_{jk}^+ - 1 \quad (15)$$

$$x_i + u_i^x \leq x_j - u_j^x + U^x(2 - z_{ij}^+ - z_{ji}^-) \quad (16)$$

$$y_i + u_i^y \leq y_j - u_j^y + U^y(1 + z_{ij}^+ - z_{ji}^-) \quad (17)$$

$$a_i u_i^x + 4\bar{x}_i^2 u_i^y \geq 2a_i \bar{x} \quad (18)$$

$$\bar{x}_i = as_i^x + \frac{\lambda}{\Delta - 1} (us_i^x - as_i^x) \quad (19)$$

$$damx_i \geq d_{ij}^x + d_{ij}^y \quad (20)$$

$$x_p \leq x_q \quad (21)$$

$$y_p \leq y_q \quad (22)$$

(1) numaralı denklem amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. İki amacın ağırlıklarını dikkate alarak minimize etmektedir. Uzaklıklarla akış maliyetinin çarpımlarının toplamını, yani toplam maliyeti minimize etmektedir. Aynı zamanda acil durumlarda müdahale etmesi gereken bölümlerin diğer bölümlere olan maksimum uzaklığını minimize etmektedir. (2-5) numaralı kısıtlar dik doğrusal uzaklık şeklinde tanımlanan mesafelerin modele tanımlanmasıdır. Normalde iki adet mutlak değerli kısıt ile ifade edilen eşitsizlikler, modelin doğrusal olabilmesi için bu şekilde getirilmiştir. (6-7) numaralı kısıtlar bölümlerin sınırlarının x ve y koordinatlarında toplam tesis alanının üst sınırlarını geçmemesini sağlamaktadır. (8-9) numaralı kısıtlar da bölümlerin tesisin alt sınırlarını geçmemesini sağlamaktadır. (10-13) numaralı kısıtlar bölümlerin enlerinin ve boylarının en/boy oranı kısıdını sağlaması için eklenmiştir. En/boy oranı kullanılarak bölüm uzunluklarının alt ve üst sınır değerleri (23-24) numaralı denklemlere göre belirlenmiştir. (14) numaralı kısıt çift sıra gösteriminde herhangi iki i ve j çiftinden birisinin diğerinden önce veya sonra gelmek zorunda olduğunu belirten kısıttır. (15) numaralı kısıt ise yukarıda belirtildiği gibi i bölümünün j'den, j'nin de k'den önce gelmesi durumunda i'nin k'den önce gelmesi gerektiğini sağlayan kısıttır.

$$as_i = \sqrt{\frac{a_i}{\alpha_i}} \quad (23)$$

$$us_i = \sqrt{a_i \alpha_i} \quad (24)$$

(16-17) numaralı kısıtlar çift sıralı gösterime göre tesis içerisindeki bölüm yerlerinin belirlendiği kısıttır. Bu kısıt sayesinde bölümlerin birbirleri ile çakışması engellenmektedir.

Burada U^x ve U^y parametreleri yeterince büyük sayı oldukları için kullanılmaktadır. (18-19) numaralı kısıtlar bölümlerin ve boylarının çarpımının bölümlerin alanlarına eşit olmasını sağlayan kısıtlardır. Burada doğrusal olmayan kısıtları doğrusal hale getirebilmek için Sherali [13] tarafından önerilen teğet destekler kullanılmıştır. Destekler eşit bir dağılımla bölümlerin eninin alt ve üst sınırları arasında oluşturulmaktadır. Teğet destek sayısı arttıkça da doğrusallaştırmanın doğruluğu artmaktadır. (20) numaralı kısıt ise acil durumlarda müdahale etmesi gereken revir ve itfaiye gibi bölümlerin diğer bölümlere olan uzaklıklarının maksimumunun belirlendiği kısıttır. (21-22) numaralı kısıtlar simetrik çözümleri ortadan kaldıran kısıtlardır.

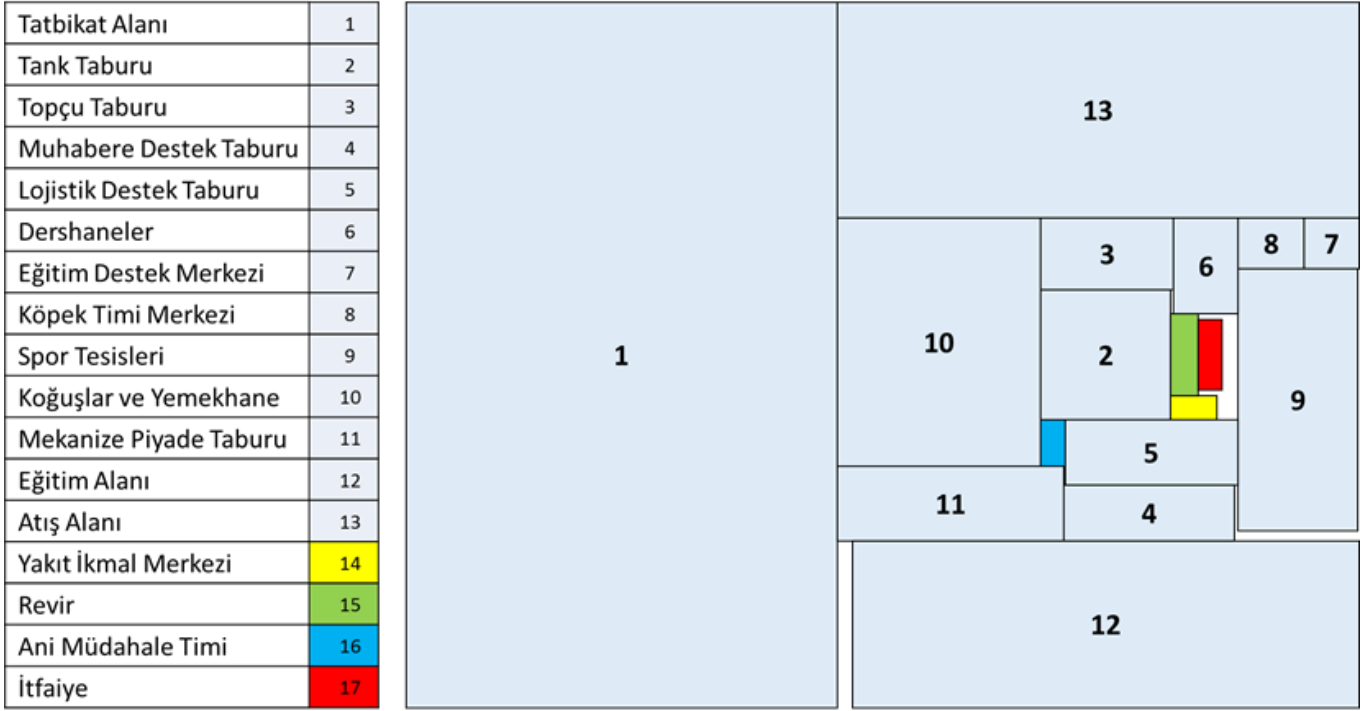
5 Uygulama

İki amaçlı problemin amaç ağırlıkları uzman görüşüne danışılarak birinci amaç için %80 ve ikinci amaç için %20 olarak belirlenmiştir. Amaçların birimleri birbirinden farklı olduğu için, amaç fonksiyonlarını normalize etmek gerekmektedir. Ağırlıklı toplama yöntemi kullanılarak modellenen çok amaçlı optimizasyon problemlerinde normalizasyon işlemi, amaç fonksiyonlarının pareto optimal set içerisinde değişen aralığı kullanılarak yapıldığında, en iyi normalizasyon sonuçlarını vermektedir [15]. Amaç fonksiyonu Grodzewich'in [15] çalışmasında gösterdiği şekilde normalize edilmiştir. Bu durumda normalize edilmiş yeni amaç fonksiyonu z^N (25) numaralı denklem kullanılarak elde edilmiştir.

$$z^N = \lambda_1 \left(\frac{f_1(x) - z_1^{\min}}{z_1^{\max} - z_1^{\min}} \right) + \lambda_2 \left(\frac{f_2(x) - z_2^{\min}}{z_2^{\max} - z_2^{\min}} \right) \quad (25)$$

Burada, λ_i amaç fonksiyonlarının uzmanlar tarafından belirlenen ağırlıklarını, $f_i(x)$ amaç fonksiyonlarının normalize edilmemiş halini ifade etmektedir. Denklemdeki z_i^{\min} değerleri, problem her bir amaç için ayrı ayrı çözüldüğünde elde edilen iyi değerlerdir. Birbiriyle çatışan iki amaçlı bir problem olması nedeniyle, her bir amaç için pareto optimal set içerisindeki en kötü değeri veren çözümler z_i^{\max} , bir diğer amacın optimum olduğu noktada elde edilen değerlerdir.

Bölüm şekillerinin çok ince ve uzun olmaması için en/boy oranı 3 olarak belirlenmiştir. Modelin çözüme daha kolay ulaşabilmesi için, tesisin toplam alanında %0.7'lik bir esneklik payı eklenmiştir. Problem her bir amaç için ayrı ayrı çözümlenerek normalizasyon işlemi için gerekli olan z_i^{\min} ve z_i^{\max} değerleri elde edilmiştir. Ardından normalize edilmiş amaç fonksiyonu z^N ile problem çözülerek sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6). Problem 6GB ram ve 1.74Ghz işlemcili bir bilgisayar kullanılarak, GAMS yazılımında modellenerek, CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Problemin karmaşık yapısı nedeniyle GAMS modeline 12 saat boyunca mevcut çözümde herhangi bir ilerleme görülemediği durumda programın durması komutu eklenmiştir. Bu doğrultuda, mevcut problemin optimal sonucu elde edilemezken, 2218 dakika sonucunda o ana kadar bulunan geçerli bir çözüm elde edilmiştir. Elde edilen çözümde birinci amaç olan taşıma maliyetleri için aylık 43.431 TL değeri, ikinci amaç olan tesis güvenliğinin sağlanmasında revir, itfaiye ve müdahale timinin diğer tesislere olan en büyük uzaklıkların toplamı ise 2212 m olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışma bir uygulama çalışması olması nedeniyle literatürdeki test problemleriyle uyuşmamaktadır. Bu nedenle literatür ile ilgili herhangi bir karşılaştırma yapılamamıştır.



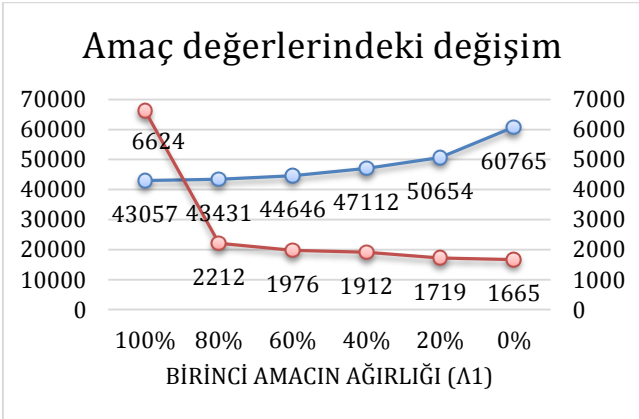
Şekil 6: Askeri problemin çözümü.

Problemin, amaç ağırlıklarının değişimine nasıl tepki verdiğini değerlendirmek için, farklı ağırlık kombinasyonlarında problem çözülmüş ve Tablo 4'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4: Farklı ağırlık kombinasyonları için bulunan değerler.

Deneme	λ_1	λ_2	Amaç1	Amaç2
1	%100	%0	43057	6624
2	%80	%20	43431	2212
3	%60	%40	44646	1976
4	%40	%60	47112	1912
5	%20	%80	53654	1719
6	%0	%100	60765	1665

Aynı zamanda, birinci amaç için verilen ağırlık değerlerine (λ_1) karşılık olarak bulunan sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: Amaç değerlerindeki değişim.

Amaç 2'nin dikkate alınmadığı durumda, Amaç 2 dramatik şekilde çok yüksek çıkmıştır. Diğer kombinasyonlarda ise, daha düzgün bir değişim gözlenmektedir. Bu durum, tesis yerleşim problemlerinin çok amaçlı olarak ele alınmasının daha doğru olduğu tezini kanıtlar niteliktedir. Amaç fonksiyonlarının normalize edilerek kullanılması nedeniyle, farklı amaç ağırlıklarında elde edilen çözümlerin değerleri orantılı bir değişim göstermektedir.

6 Sonuçlar

Çalışmada askeri bir tesis için yerleşim problemi çok amaçlı olarak ele alınmıştır. Yalnızca taşıma maliyetleri amaç olarak ele alındığında, revir ve müdahale merkezi gibi birimlerin etkinliğini azaltan tasarımlar ortaya çıktığı için, tesis yerleşimine personel güvenliği amacı da dâhil edilmiştir. Bu sayede deneme 2 ile elde edilen çözüm ile yalnızca maliyet odaklı bir çözüme kıyasla, maliyet amacında yalnızca %1'lik bir kayıp ile güvenlik amacında %67 oranında bir kazanç elde edilmiştir. Bu durum, tesis yerleşim problemlerinde çok amaçlı modellerin ortaya konmasının, maliyette küçük bir miktar kayıpla problemin diğer açılardan daha etkin bir şekilde çözülebildiğini göstermektedir.

Çalışmada, tesisteki bölüm büyüklüklerinin büyük farklılık göstermesi nedeniyle, eşit alanlı olmayan tesis yerleşim modeli kurulmuştur. 18 bölümlü bir problem için matematiksel programlama ile optimum çözüme ulaşılamamış, fakat geçerli bir çözüm elde edilmiştir. Bu nedenle, bölüm sayısı yüksek olan problemlerin çözümü için ilerideki çalışmalarda sezgisel yöntemlerden faydalanılabileceği değerlendirilmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda, problem çözümünün çok yönlü olabilmesi için, tesislerdeki enerji verimliliği, tehlikeli madde depolarının konumu gibi amaçlar da dikkate alınabilir.

7 Kaynaklar

- [1] Tompkins A, White J, Bozer Y, Tanchoco MA. *Facilities Planning*. 4th ed. USA, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Lacksonen TA. "Static and Dynamic Layout Problems with Varying Areas". *The Journal of the Operational Research Society*, 45(1), 59-69, 1994.
- [3] Koopmans TC, Beckmann M. "Assignment problems and the location of economic activities". *Econometrica*, 25(1), 53-76, 1957.
- [4] Drira A, Pierreval H, Hajri-Gabouj S. "Facility layout problems: A survey". *Annual Reviews in Control*, 31 (2), 255-267, 2007.
- [5] Rosenblatt M. "The facilities layout problem: a multi-goal approach". *International Journal of Production Research*, 17(4), 323-332, 1979.
- [6] Dutta K, Sahu S. "A multigoal heuristic for facilities design problems: MUGHAL". *International Journal of Production Research*, 20 (2), 147-154, 1982.
- [7] Malakooti B, Tsurushima A. "An expert system using priorities for solving multiple-criteria facility layout problems". *International Journal of Production Research*, 27(5), 793-808, 1989.
- [8] Raoot A, Rakshit A. "A 'linguistic pattern' approach for multiple criteria facility layout problems". *International Journal of Production Research*, 31(1), 203-222, 1993.
- [9] Maniya KD, Bhatt MG. "An alternative multiple attribute decision making methodology for solving optimal facility layout design selection problems". *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 542-549, 2011.
- [10] Saraswat A, Venkatadri U, Castillo I. "A framework for multi-objective facility layout design". *Computers & Industrial Engineering*, 90, 167-176, 2015.
- [11] Hathhorn J, Sisikoglu E, Sir MY. "A multi-objective mixed-integer programming model for a multi-floor facility layout". *International Journal of Production Research*, 51(14), 4223-4239, 2013.
- [12] Şahin R. "A simulated annealing algorithm for solving the bi-objective facility layout problem". *Expert Systems with Applications*, 38(4), 4460-4465, 2011.
- [13] Aiello G, Enea M, Galante G. "A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(5-6), 447-455, 2006.
- [14] Yang L, Deuse J. "Multiple-attribute decision making for an energy efficient facility layout design". *Procedia CIRP*, 3(1), 149-154, 2012.
- [15] Anjos MF, Viera MVC. "Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions". *European Journal of Operational Research*, 261, 1-16, 2017.
- [16] Moslemipour G, Lee TS, Rilling D. "A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 11-27, 2012.
- [17] Singh SP, Sharma RRR. "A review of different approaches to the facility layout problems". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 425-433, 2006.
- [18] Robertson MU, Ezell BC, McGinnis ML. "Base camp facility layout". *2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 2064-2070, 2001.
- [19] Stewart C. Optimization of Military Installation Siting Based on Explosive Safety Standards Using Genetic Algorithms. MSc Thesis, Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2015.
- [20] Ece B. A Mixed Linear Integer Model for Military Facility Layout Optimization Problem. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2015.
- [21] Liu Q, Meller RD. "A sequence-pair representation and MIP-model-based heuristic for the facility layout problem with rectangular departments". *IIE Transactions*, 39(4), 377-394, 2007.
- [22] Sherali HD, Fraticelli BMP, Meller RD. "Enhanced model formulations for optimal facility layout". *Operations Research*, 51(4), 629-644, 2003.
- [23] Meller RD, Chen W, Sherali HD. "Applying the sequence-pair representation to optimal facility layout designs". *Operations Research Letters*, 35, 651-659, 2007.