

ÇOK AMAÇLI TESİS YERLEŞİM PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR MELEZ SEZGİSEL ALGORİTMA

Ramazan ŞAHİN ve Orhan TÜRKBEY

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570, Ankara
rsahin@gazi.edu.tr, turkbev@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 07.04.2008 ; Kabul/Accepted: 19.02.2010)

ÖZET

Bu makalede, Çok Amaçlı Tesis Yerleşim Probleminin (ÇATYP) çözümü için, tabu listesi ile desteklenmiş, Tavlama Benzetimi'ne (TB) dayalı yeni bir melez sezgisel algoritma önerilmektedir. TB'ne tabu listesinin eklenmesiyle oluşturulan yeni melez sezgisel algoritmanın en önemli avantajı, TB'nin olasılıklı yapısı korunurken, aynı zamanda kısa dönemli hafıza (tabu listesi) ile daha önce üretilen komşu çözümlerin tekrar üretilmesinin engellenmesidir. Yeni melez sezgisel algoritmanın amacı, ÇATYP'nin etkin çözümler kümesini (pareto optimal set) oluşturan çözümleri kısa zaman içinde bulmaktır. Yeni melez sezgisel algoritmanın etkinliği 8 bölüm ve 4 amaçtan oluşan bir örnek problem üzerinde gösterilmiştir. Algoritma ile önceden belirlenmiş ağırlıklar için en iyi yerleşim planı ile aynı zamanda problemin etkin çözümlerinin oluşturduğu pareto çözümler kümesi bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tesis yerleşim problemi, çok amaçlı eniyileme, pareto optimalite, melez sezgisel algoritma.

A NEW HYBRID HEURISTIC ALGORITHM FOR THE MULTI OBJECTIVE FACILITY LAYOUT PROBLEM

ABSTRACT

In this paper, we propose a new hybrid meta-heuristic algorithm based on simulated annealing supplemented with tabu list for the Multi Objective Facility Layout Problem (MOFLP). It is a SA approach supplemented with a tabu list. The main advantage of this approach is that a short term memory provided by the tabu list can be used to avoid solution re-visits while preserving the stochastic nature of the SA method. The goal of the new hybrid heuristic algorithm is to find the solutions forming the set of efficient solutions (pareto optimal set) of the MOFLP's in a relatively short time. The hybrid meta-heuristic is illustrated with a practical example of plant with 8 departments and 4 objectives. An efficient set of layouts corresponding to pre-determined weights are obtained. And also the set of efficient pareto-optimal solutions of the problem are determined.

Keywords: Facility layout problem, multi objective optimization, pareto optimal, hybrid heuristic algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tesis yerleşim tasarımı bir imalat sisteminin verimliliğini etkileyen en önemli konulardan birisidir. Tesis yerleşimi şirketler için kilit öneme sahiptir ve planlama sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır. Tesis Yerleşim Problemi (TYP), bir tesisin verimli bir şekilde çalışması için tesis içindeki fiziki bölümlerin düzenlenmesi ile ilgilidir. TYP, disiplinler arası önemi nedeniyle pek çok araştırmaya konu olmuştur. Jajodia vd.'ne göre, TYP için iyi bir çözüm işlemlerin etkinliğinin bütününe katkı yapar. Kötü bir yerleşim ise, süreç içi stokların birikmesine, malzeme taşıma sistemlerinin aşırı yüklenmesine, hazırlık zamanlarının artmasına ve malzeme kuyruklarının uzamasına

sebeplendirir [1]. Bu nedenle, TYP'nin çözülmesi, bütün işletmeler için yapılması gereken stratejik bir çalışmadır.

Genel olarak, TYP'ni çözmek için iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Birincisi bölümler arasındaki yakınlık ilişkisi skorlarının toplamını en büyükmeye çalışan nitel yaklaşımdır. Muther [2] tarafından geliştirilen Sistematik Düzenleme Planlaması (Systematic Layout Planning) prosedürü, bu konudaki en önemli çalışmalardan birisidir. İkincisi ise, bölümler arasındaki malzeme taşıma maliyetlerinin toplamını en küçükmeye çalışan nicel yaklaşımdır. Armour ve Buffa [3] tarafından yapılan çalışma bu yaklaşım için örnek olarak verilebilir.

Literatürdeki pek çok çalışma TYP'ni çözmek için, nitel ve nicel yaklaşımları ayrı kullanmışlardır. Ancak pek çok araştırmacı TYP'ni çözmek için tek bir kriteri dikkate almanın uygun olup olmadığını sorgulamışlardır. Her iki yaklaşımın da sahip olduğu avantaj ve dezavantajları vardır [4]. Ancak tek bir ölçütü dikkate alan modeller açıklayıcı değildir. Çünkü tesis yerleşimini etkileyen pek çok ölçüt vardır. Gerçekte, TYP hem nitel hem de nicel kriterleri içermek zorundadır. Dolayısıyla çok amaçlı tesis düzenleme problemi kategorisi içinde yer almaktadır [5].

Malakooti'ye göre, ÇATYP'nin amacı karar vericiye sunulmak üzere etkin yerleşim planı seçenekleri üretmektir. Böylece, karar verici birbiriyle çelişen amaçları göz önünde bulundurarak en iyi yerleşim planı seçeneğini tercih edebilir. Bu problemin çözümü için üç farklı yöntem vardır. Birincisi, yerleşim planı seçeneklerinin etkin kümesi bulunur ve bunlar karar vericiye sunulur. İkincisi, önce karar vericinin tercihleri belirlenir ve sonra bu tercihlere göre en iyi yerleşim planı seçeneği bulunur. Üçüncüsü ise, en iyi yerleşim planı seçeneğinin bulunması için etkileşimli bir yöntemin kullanılmasıdır [6].

ÇATYP'ni çözmek için pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda, etkin yerleşim planı seçeneğini bulmak için, her bir amaca önceden belirlenen ağırlıklar verilerek birleştirilmiş ve tek bir amaç elde edilmiştir. ÇATYP'ni modellemek için genellikle kareli atama problemi (KAP) (quadratic assignment problem) formülasyonu kullanılmıştır.

ÇATYP için KAP formülasyonu aşağıda verilmiştir [7].

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ijkl} X_{ij} X_{kl} \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \quad i, j = 1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

Burada;

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ bölümü } j \text{ alanına atanmışsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda,} \end{cases}$$

A_{ijkl} = i bölümü j alanına ve k bölümü l alanına atandığı zaman oluşan maliyettir.

Eşitlik (1)'deki A_{ijkl} terimi çok amaçlı tesis yerleşim problemi modellerinde nitel ve nicel amaçların birleşimini temsil etmektedir. Eşitlik (2), bir alanın sadece bir bölüme tahsis edilmesini garanti eder. Eşitlik (3) ise, bir bölümün sadece bir alana atanmasını sağlar. Eşitlik (4), karar değişkenini göstermektedir.

Çok amaçlı tesis yerleşim problemini çözmek için 1979 yılından beri birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan pek çoğu yukarıda açıklanan iki kriteri (nitel ve nicel) dikkate alan çalışmalardır. Bu çalışmalar amaç değerlerini birleştirme yöntemleri açısından farklılıklar göstermektedirler.

Bu alanda ilk çalışma Rosenblatt [8] tarafından yapılmıştır. Rosenblatt [8], toplam malzeme taşıma maliyetini en küçükleyecek ve toplam yakınlık ilişkisi skorunu en büyükleyecek şekilde, nicel ve nitel amaçları birleştirerek çözen bir sezgisel algoritma önermiştir. Eşitlik (1) deki A_{ijkl} terimini

$$A_{ijkl} = \alpha_2 C_{ijkl} - \alpha_1 R_{ijkl} \quad \text{şeklinde tanımlamıştır.}$$

Burada, C_{ijkl} nicel amaç olan toplam malzeme taşıma maliyetini, R_{ijkl} nitel amaç olan toplam yakınlık ilişkisi

skorunu α_1 ve α_2 ise bu amaçlara atanan ağırlıkları ifade etmektedir. Rosenblatt [8] sadece etkin yerleşimleri içeren bir kesikli etkin sınır kümesi bulmuştur. Sonra bu amaçlara farklı ağırlıklar vererek en iyi yerleşim planını bulmaya çalışmıştır. Dutta ve Sahu [9], Rosenblatt'ın [8] önerdiğine benzer bir model önermişlerdir. Onlar başlangıç yerleşim planını geliştirmek için ikili değiştirme metodunu (pair-wise exchange method) kullanmışlardır. Fortenberry ve Cox [10], Eşitlik (1)'deki A_{ijkl} terimini,

$A_{ijkl} = f_{ik} d_{jl} r_{ik}$ olarak tanımlamışlar ve "çeşitlilik modeli" (multiplicity model) olarak adlandırmışlardır.

Burada f_{ik} , i ve k bölümleri arasındaki malzeme akışlarını, r_{ik} ise, i ve k bölümleri arasındaki yakınlık ilişkisi skorlarını ve d_{jl} ise, j ve l alanları arasındaki uzaklığı göstermektedir. Urban [11], ekleyici model (additive model) isimli bir çalışma yapmıştır. Bu modelde, nitel kriter uygun bir ağırlık değeriyle çarpılarak, nicel kritere eklenmiş ve nicel ve nitel kriterler birleştirilmiştir. Urban Eşitlik (1)'deki A_{ijkl} terimini, $A_{ijkl} = d_{jl} (f_{ik} + cr_{ik})$ olarak tanımlamıştır. Burada f_{ik} , i ve k bölümleri arasındaki malzeme akışlarını, r_{ik} , i ve k bölümleri arasındaki yakınlık ilişkisi skorlarını, d_{jl} , j ve l alanları arasındaki uzaklığı göstermektedir. c ise, malzeme akışlarına göre yakınlık ilişkisi skorlarının önemini belirleyen sabit bir

katsayıdır ve herhangi iki bölüm arasındaki en yüksek malzeme akış değerine eşit olarak almıştır. Harmonosky ve Totho [12], ikiden fazla amacın dikkate alındığı ve amaçların birleştirilmeden önce normalleştirildiği bir yaklaşım önermiştir. Bütün amaçların yerleşim üzerindeki etkilerinin aynı düzeyde olması için, normalleştirme işleminin gerekli olduğunu söylemişlerdir. Suresh ve Sahu [13], çalışmalarında ÇATYP’ni çözmek için sezgisel yöntem olan TB algoritmasını kullanmışlardır. Chen ve Sha [14], çalışmalarında ÇATYP için önerilen çözümün kalitesiyle ilgilenmişlerdir. Önerilen çözümlerden hangisinin daha iyi olduğunu belirlemek için “baskınlık indeksi” (dominant index) geliştirmişlerdir. Chen ve Sha [5], ÇATYP’nin çözümünü için beş aşamadan oluşan bir sezgisel prosedür önermiştir. Sha ve Chen [7], bu çalışmalarında da, önerilen çözümlerden hangisinin daha iyi olduğunu ölçmek için, “üstünlük olasılığı” (probability of superiority) isimli yeni bir yöntem önermişlerdir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, önceki yapılan çalışmaların pek çoğunda amaçlara ağırlıklar verilerek, tek bir çözüm elde edilmiştir ve bu çözüm karar vericiye sunulmuştur. Bununla birlikte, günümüzde müşterilerin tercihleri ve piyasa şartları sürekli değişmektedir. Önerilen bir yerleşim planı önerildiği zamanda iyi bir yerleşimken koşullardaki değişmelere bağlı olarak etkinliğini kaybedebilmektedir. Aynı zamanda, karar vericinin seçimleri de zaman içinde değişebilmektedir. Bu nedenle, karar vericiye tek bir yerleşim planı seçeneğinin önerilmesi yerine, etkin yerleşim planlarını içeren bir kümenin sunulması ve karar vericinin bu etkin yerleşim planları arasından tercihleri doğrultusunda seçim yapması daha gerçekçi ve tutarlı olacaktır. Bu makalede, ÇATYP için etkin çözümler bulan bir melez sezgisel algoritma önerilmiştir. Önerilen melez sezgisel algoritma TB tabanlı olup, aynı zamanda tabu listesi eklenmiştir. Amaç, problem için etkin yerleşim planları kümesinin oluşturulması ve karar vericinin, tercihleri doğrultusunda bu etkin yerleşim planları arasından seçim yapmasıdır.

2. ÇOK AMAÇLI TESİS YERLEŞİM PROBLEMİNİN FORMULASYONU (THE FORMULATION OF THE MULTI OBJECTIVE FACILITY LAYOUT PROBLEM)

Gerçek hayat problemlerin pek çoğu birden fazla amaç içerir. Bu problemler, çok amaçlı eniyileme problemleri olarak adlandırılırlar. Çok amaçlı eniyileme problemlerinde, amaçlar genellikle birbiriyle çelişirler. Bu nedenle problemin çözümü birden fazladır. Bu çözümlere etkin çözümler (pareto çözümler) denir. Pareto en iyi (bastırılmayan çözüm) kavramı, çok amaçlı eniyileme problemlerinin en iyi çözümünü ifade etmek için kullanılmaktadır. Bir en küçükleme problemi için, (5) numaralı eşitliği sağlayan başka bir x çözümü yok ise, x^* etkin çözüm (pareto en iyi çözüm) olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned} f_i(x) &\leq f_i(x^*) \quad \forall i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ için} \\ f_i(x) &< f_i(x^*) \quad \text{en az bir } i \text{ için} \end{aligned} \quad (5)$$

Diğer bir ifadeyle, diğer amaç değerlerinin en az bir tanesi kötüleşmeden bir amaç değerinde herhangi bir iyileşme sağlanamıyorsa, bu çözüme etkin çözüm denir. Etkin çözümlerin hepsi aynı derecede önemlidir. Herhangi bir etkin çözüm için diğerlerinden daha iyidir denilemez. Literatürde etkin çözümlerin bulunması için pek çok yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada ise, ÇATYP’nin etkin çözümlerini elde etmek için TB’ne dayalı bir melez sezgisel algoritma kullanılmıştır.

TYP genellikle Kareli Atama Problemi (KAP) olarak modellenir. KAP, bölümler arasındaki malzeme taşıma maliyetlerinin toplamını en küçükleyecek şekilde N adet bölümün N adet alana atamasıyla ilgilendir. KAP’nin en iyi çözümünü bulmak için birçok yöntem önerilmiştir. Ancak KAP’nin NP-zor yapısı nedeniyle, kabul edilebilir zaman dilimi içinde şimdiye kadar en fazla 30 bölümden oluşan problemler için en iyi çözüm bulunabilmiştir [15]. Bu nedenle, problemin çözümü için daha çok sezgisel algoritmalar (genetik algoritma, tavlama benzetimi, tabu arama, karınca kolonisi sistemi v.b.) kullanılmıştır. Sezgisel yöntemler en iyi sonucu garanti etmemelerine rağmen, kısa zaman diliminde en iyiye yakın sonuçlar bulabilmektedirler. Bu makalede, ÇATYP’ne iyi bir çözüm bulabilmek için TB tabanlı melez bir sezgisel algoritma önerilmiştir.

2.1. Notasyonlar ve Karar Değişkenleri (Notations and Decision Variables)

Modelde kullanılan notasyon ve karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

i, k : Yerleştirilecek bölümlerin indisleri ($i, k = 1, 2, \dots, n$)

j, l : Bölümlerin yerleştirileceği alanlar ($j, l = 1, 2, \dots, n$)

n : Bölümlerin ve alanların sayısı,

r : Amaçların sayısı,

$f_r(x)$: r ’inci amaç için amaç fonksiyonu,

A_{ijkl}^r : r ’inci amacın amaç fonksiyonunun katsayıları,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ bölümü } j \text{ alanına atanmışsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$X_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ bölümü } l \text{ alanına atanmışsa.} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

Çok Amaçlı Tesis Yerleşim Problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [5, 6].

Problem (çok amaçlı KAP)

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \min f_1(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ijkl}^1 X_{ij} X_{kl} \\ Z_2 = \min f_2(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ijkl}^2 X_{ij} X_{kl} \\ \vdots \\ Z_r = \min f_r(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ijkl}^r X_{ij} X_{kl} \end{array} \right. \quad (6)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Modelde (6) numaralı eşitlik her bir amaç için, amaç fonksiyon değerlerini, (7) numaralı kısıt bir alana sadece bir bölümün atanabileceğini, (8) numaralı kısıt bir bölüme sadece bir alanın tahsis edilebileceğini ve (9) numaralı kısıt ise, karar değişkenlerinin 0 ve 1 olduğunu göstermektedir.

3. ÖNERİLEN MELEZ SEZGİSEL ALGORİTMA (PROPOSED HIBRYD HEURISTIC ALGORITHM)

Bu bölümde, kısaca TB'nden bahsedilecek, sonra önerilen melez sezgisel algoritma anlatılacaktır.

3.1. Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)

TB, ilk olarak Kirkpatrick vd. [16] tarafından eniyileme problemleri için kullanılmaya başlanmıştır. TB yerel en iyilerden kurtulabilme özelliğine sahip olan olasılıklı bir arama algoritmasıdır ve pek çok farklı alana yaygın olarak uygulanmaktadır. Kolay uygulanabilirliği, yakınsama özelliği ve yerel minimumlardan kurtulabilme özelliği nedeniyle son yıllarda yaygın bir yaklaşım olmuştur. TB katıların tavlama işlemi ile kombinatoriyal eniyileme problemlerinin çözümü arasındaki benzerliğe dayalı bir yöntemdir. TB algoritması adım adım iyileştirme yapan bir algoritmadır. Bu iyileştirmeler esnasında, sadece iyi çözümler değil aynı zamanda belli bir olasılık ile kötü çözümleri de kabul eder. Bu olasılığa kabul olasılığı denir. Kabul olasılığı sıcaklık parametresi tarafından kontrol edilir. Yüksek sıcaklık değerlerinde kötü bir çözümün kabul olasılığı da yüksektir. Sıcaklık düştükçe kötü bir çözümün kabul edilme olasılığı da düşmektedir.

TB diğer sezgisel yöntemlerle (bunlar genetik algoritma, tabu arama ve yapay sinir ağları v.b.) karşılaştırıldığında bazı güçlü yanlara ve zayıf yanlara sahiptir. Detaylı değerlendirme için [17]'ye bakınız. TB'nin güçlü yanları olarak diğer yöntemlere göre problemlere daha kolay uygulanabilir olması ve pek çok kombinatoriyal eniyileme problemleri için iyi sonuçlar sağlama yeteneğidir. TB'nin zayıf tarafları ise, problemlerin çözümü için yüksek bilgisayar zamanına ihtiyaç duyması ve parametre seçiminin dikkatli bir şekilde yapılması ihtiyacıdır [18]. TB'nin performansı büyük oranda parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle TB için uygun parametrelerin belirlenmesi önemli bir konudur. Geleneksel olarak, TB için gerekli parametrelerin belirlenmesi bazı deneysel verilere dayanılarak veya deneme yanılma yöntemiyle belirlenmektedir. Ancak son zamanlarda parametre seçiminin sistematik olarak belirlenmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur [19].

3.2. Çok Amaçlı Tesis Yerleşim Problemi için Melez Sezgisel Algoritma (The Hybrid Heuristic Algorithm for the Multi Objective Facility Layout Problem)

Tabu Arama (TA) kombinatoriyal eniyileme problemleri için geliştirilen modern sezgisel arama yöntemlerinden birisidir. TA ilk olarak Glover [20] tarafından önerilmiştir ve pek çok araştırmacı çeşitli alanlara başarıyla uygulamışlardır. TA yerel en iyilerden kaçınmak için hareket yapılması yasaklanan komşu çözümlerin tutulduğu bir liste kullanır ve bu liste Tabu Listesi olarak adlandırılır. Yerel en iyilerden kaçınmaya ek olarak tabu listesinin kullanılması, çözüm uzayındaki daha önce uğranılmış çözümlere yapılacak hareketleri yasaklayarak veya cezalandırarak algoritmanın döngüye girmesini engelleyebilir. Böylece hesaplama zamanından tasarruf sağlar.

Yukarıda bahsedildiği gibi, TA yerel en iyilerden kaçınmak için daha önce ziyaret edilen çözümlerin tutulduğu kısa dönemli bir hafıza olan tabu listesi kullanır. Belirli yapısına rağmen, TA yöntemi bir döngüden kaçınmayabilir. Bununla birlikte, TB olasılıklı bir arama yöntemidir ve bir döngüden kaçınabilir ancak yüksek hesaplama zamanına ihtiyaç duyar. Bu iki yöntemin kısıtlanmalarından kurtulmak için, literatürde bu iki yöntemin güçlü yanlarını birleştiren melez sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalara, Zolfaghari ve Liang [21], Swarnkar ve Tiwari [22], Zhang ve Deng [23], ile Şahin ve Türkbey [24] tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir. Yapılan bu çalışmalarda, literatürdeki problemler için daha iyi sonuçların bulunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da, ÇATYP'nin çözümü için temeli TB olan yeni bir melez sezgisel algoritma önerilmiştir. Bu melez sezgisel algoritma tabu listesi ile güçlendirilmiş bir TB yaklaşımıdır. Böylece, yeni melez algoritma ile döngüden kaçınırken aynı zamanda hesaplama zamanı da azaltılmaktadır.

3.2.1. Önerilen melez sezgisel algoritmanın elemanları (Elements of the proposed hybrid heuristic algorithm)

Başlangıç Çözüm: Algoritma, bir sezgisel yöntem kullanılarak üretilen veya rastsal olarak üretilen bir başlangıç çözümle başlar. Bu çalışmada kullanılan başlangıç çözüm algoritma tarafından rastsal olarak üretilmektedir.

Komşu Çözümün Üretilmesi: Algoritmada, arama işlemi mevcut çözümden komşu çözüme yapılan bir hareketle olur. Komşu çözümün seçimi ikili yer değiştirme işlemiyle yapılmaktadır. Rastsal olarak iki bölüm seçilir ve sonra bu bölümlerin atandıkları yerler değiştirilir. Bu şekilde komşu çözüm üretilmiştir.

Tabu listesi: Tabu listesi, listede yakın zamanda ziyaret edilmiş komşu çözümlerin tutulduğu listedir ve tekrar ziyaret edilmesinden kaçınmak içindir. Tabu listesinin uzunluğu bir hareketin kaç iterasyon boyunca tabu listesinde kalacağını belirlemeye yarar. Tabu listesi, arama sırasında hesaplama zamanından önemli miktarda tasarruf yapılmasını sağlar. Eğer tabu listesinin uzunluğu çok kısa tutulursa, algoritma döngüye girebilir. Eğer tabu listesinin uzunluğu çok büyük olursa, o zaman da iyi çözümlere ulaşma şansı kaybedilebilir. Bu nedenle tabu listesinin uzunluğu iyi belirlenmelidir. Bu çalışmada tabu listesinin uzunluğu, çözümü araştırılan problemin bölüm sayısı olarak belirlenmiştir.

Aspirasyon ölçütü: Bazı durumlarda yapılan bir hareket ile elde edilen sonuç, o ana kadar elde edilen en iyi sonuçtan daha iyi ise, hareket tabu listesinde olsa bile kabul edilir. Buna aspirasyon ölçütü denir.

Soğutma Çizelgesi: Tavlama parametrelerinin belirlenmesi işlemine soğutma çizelgesi veya tavlama çizelgesi adı verilir. Soğutma çizelgesindeki parametrelerin belirlenmesi işlemi çok önemlidir. Burada belirlenen parametreler problemin çözümüyle elde edilecek sonuçla doğrudan bağlantılıdır. Soğutma çizelgesi başlangıç sıcaklığının belirlenmesi, her bir sıcaklıkta yapılacak hareketlerin sayısı ve sıcaklık azaltma yönteminin belirlenmesi parametrelerini içerir. Arama işleminin başlangıcında yüksek oranlı rastsallık oluşturmak için başlangıç sıcaklığı yeterince yüksek belirlenmelidir. Bu şekilde, algoritma başlangıç çözümüne bağlı kalmaksızın yeni çözümler üretir. Böylece arama işleminin başlarında komşu çözüm için yapılan hareketlerin pek çoğu kabul edilir. Bu çalışmada, başlangıç sıcaklığı birçok deneme sonucunda gözlem yoluyla belirlenmiştir.

İyi bir çözüm bulmak için, sıcaklık azaltma işlemi yavaş yapılmalıdır. Eğer bu yapılmazsa, elde edilen sonuç genellikle bir yerel en iyi noktası olmaktadır. Literatürde bir kaç tane sıcaklık azaltma fonksiyonu vardır. Aritmetik fonksiyon, geometrik fonksiyon, logaritmik fonksiyon v.b. örnek olarak verilebilir. Bu makalede, geometrik fonksiyon kullanılmıştır. Geometrik fonksiyon, algoritmanın sıcaklıkta hızlı bir

azalma ile başlamasına neden olur (küçük soğutma oranı için) ve daha sonraki sıcaklık adımlarında daha yavaş bir soğutma sağlar [25]. Geometrik fonksiyon $T_k = \alpha T_{k-1}$ ile ifade edilir. Burada, α soğutma oranıdır ve 0 ile 1 arasında bir değerdir. Ancak soğutma oranı 1'e yakın olmalıdır. Bu çalışmada soğutma oranı 0.999 olarak alınmıştır.

Algoritmayı sonlandırmak için literatürde bir kaç yöntem önerilmiştir. Bunlardan bazıları şunlardır: toplam iterasyon sayısına ulaşılması, verilen belli bir sayıdaki iterasyon boyunca herhangi bir iyileşmenin olmaması ve verilen bir son sıcaklık değerine ulaşılması. Bu çalışmada algoritmayı sonlandırmak için verilen bir en büyük iterasyon sayısına (el_{max}) ulaşılması kullanılmıştır. ÇATYP için önerilen melez sezgisel algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir;

Adım 1: TB için parametreleri tanımla: T_{in} = başlangıç sıcaklığı, α = soğutma oranı, HS = aynı sıcaklıkta gerçekleştirilecek hareketlerin sayısı, el_{max} = en büyük iterasyon sayısı, TLU = tabu listesinin uzunluğu.

Adım 2: Rastsal olarak bir başlangıç çözüm oluştur (S_{in}), ve her bir amaç için başlangıç çözümün amaç fonksiyon değerlerini hesapla.

Adım 3: S_{best} (En iyi çözüm) = S_c (Mevcut Çözüm) = S_{in} ve T (Mevcut sıcaklık) = T_{in} , el (iterasyon sayacı) = 1, il (aynı sıcaklıkta gerçekleştirilen hareketlerin sayacı) = 1, TL (tabu listesi) = \emptyset . Başlangıç çözümün ağırlıklı toplam maliyetini (C) hesapla ve C_{best} (En iyi ağırlıklı toplam maliyet) = C_c (Mevcut ağırlıklı toplam maliyet) = C yap. Başlangıç çözümü pareto kümesine ilave et.

Adım 4: Mevcut çözümden rastsal olarak seçilen iki tesisin yerini değiştirerek bir komşu çözüm (S_n) üret. Bulunan komşu çözüm için, her bir amacın amaç fonksiyon değerlerini hesapla. Aynı zamanda, komşu çözümün ağırlıklı toplam maliyetini, her bir amaca verilen ağırlık değerleri ile o amaç için bulunan amaç fonksiyon değerini çarparak hesapla (C_n).

Adım 5: Komşu çözümü, pareto kümesindeki çözümlerle karşılaştır. Eğer komşu çözüm pareto kümesindeki herhangi bir çözüm tarafından bastırılıyorsa, komşu çözümü pareto kümesine alma. Eğer komşu çözüm pareto kümesindeki çözümlerden bazılarını bastırıyorsa, bastırılan çözümleri pareto kümesinden çıkar ve komşu çözümü pareto kümesine ilave et.

Adım 6: Eğer yapılan hareket tabu listesinde ise, Adım 7'ye git. Aç; aksi durumda Adım 8'e git.

Adım 7: Eğer komşu çözüm aspirasyon ölçütünü sağlıyorsa ($C_n < C_{best}$), bir sonraki adıma geç; aksi durumda Adım 4'e git.

Adım 8: Ağırlıklı toplam maliyetteki değişimi hesapla: $\Delta = C_n - C_c$.

Adım 9: Eğer ($\Delta < 0$) ise Adım 11'e git; aksi durumda bir sonraki adıma geç.

Adım 10: Düzgün dağılıma sahip (0-1) aralığında bir rastsal sayı (x) üret. Eğer $x < P = e^{(-\Delta / T)}$ ise, bir sonraki adıma geç; aksi durumda Adım 12'ye git.

Adım 11: $S_c = S_n$ ve $C_c = C_n$ yap ve tabu listesini güncelle.

Adım 12: Eğer $C_c < C_{best}$ ise, $S_{best} = S_c$ ve $C_{best} = C_c$ yap.

Adım 13: Eğer ($il < HS$) ise, $il = il + 1$ yap ve Adım 4'e git; aksi durumda Adım 14'e geç.

Adım 14: $el = el + 1$, $T_{el+1} = \alpha T_{el}$ ve $il = 1$ yap.

Adım 15: Eğer ($el < el_{max}$) ise, Adım 4'e git; aksi durumda bir sonraki adıma geç.

Adım 16: Algoritmayı durdur ve pareto çözümleri yaz.

4. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ (PERFORMANCE EVALUATION)

Önerilen melez sezgisel algoritmanın başarısını göstermek için, Chen ve Sha [5] tarafından verilen açıklayıcı bir örnek problemin çözümü yapılmıştır. Bu problem 4 adet amaç içermektedir. Bu amaçlar; malzeme taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi, bölümler arası toplam yakınlık skorlarının en küçüklenmesi, malzeme hareket zamanının en küçüklenmesi ve riskli malzemelerin taşıma uzaklığının en küçüklenmesidir. Chen ve Sha'dan [5] alınan problem için gerekli veriler Ek 1'de verilmiştir. Alanlar arasındaki uzaklıklar dik doğrusal olarak hesaplanmaktadır ve bütün alanların genişliği ve uzunluğu bir birim olarak alınmıştır. Problem 8 bölümden oluşmaktadır ve yerleşim planı Şekil 1'de verilmiştir. Önerilen melez sezgisel algoritmanın bilgisayar kodu Fortran-90 programlama dili ile kodlanmıştır ve çözümler Pentium III 800 MHz PC ile yapılmıştır. Problemin ortalama çözüm zamanı 20.32 saniye olarak bulunmuştur.

Önerilen melez sezgisel algoritma ile Chen ve Sha [5] tarafından verilen test problemi, farklı ağırlık kombinasyonları kullanılarak çözülmüştür. Her amaç için tahsis edilen ağırlıklar için 0 ile 1 arasında ve 0.1 birimlik değişimler kullanılmıştır. Amaçlar için tahsis edilen ağırlıkların toplamı 1'e eşittir. Böylece bütün ağırlık kombinasyonları için ağırlıklı toplam maliyet değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda problemin pareto çözümleri de elde edilmiştir. Yapılan bütün denemeler sonucunda elde edilen pareto çözümler kümesi 21 adet çözümden oluşmuştur. Pareto çözümler kümesini oluşturan çözümler Tablo 1'de verilmiştir.

Her bir ağırlık kombinasyonu ve ona karşılık gelen yerleşim planları Ek 2'de verilmiştir. Ek 2'de verilen tablodaki W_1 , W_2 , W_3 ve W_4 ağırlıkları, sırasıyla bölümler arası malzeme taşıma maliyeti, bölümler arası toplam yakınlık skorları, malzeme hareket zamanı ve riskli malzemelerin taşıma uzaklığı amaçla-

1	2	3	4
5	6	7	8

Şekil 1. Örnek problem için yerleşim planı (Layout for the example)

rına tahsis edilen ağırlıklardır. Chen ve Sha [5] tarafından verilen ağırlık değerlerine ($W_1=0.3243$, $W_2=0.2307$, $W_3=0.1998$ ve $W_4=0.2452$) karşılık olarak bulunan çözüm 3 8 5 1 4 6 7 2 ve amaç fonksiyon değeri 172.04 olarak hesaplanmıştır.

Ek 2'de her bir ağırlık kombinasyonu için bulunan yerleşim planları, Tablo 1'de verilen pareto çözümler kümesi içinde bulunmaktadır. Aynı zamanda, Chen ve Sha [5] tarafından önerilen ağırlıklara karşılık olarak bulunan yerleşim planı da pareto çözümler kümesinde bulunmaktadır. Ek 2'den de görülebileceği gibi 286 farklı ağırlık kombinasyonu için yerleşim planları bulunmuştur. Bu yerleşim planlarından 238 tanesi, Tablo 1'de verilen pareto çözümlerden 1. çözüme karşılık gelmektedir. Geri kalanlardan 22 tane yerleşim planı Tablo 1'deki 9. pareto çözüme, 9 tane yerleşim planı 2. pareto çözüme, 4 tanesi 3. pareto çözüme, 3 tane yerleşim planı 19. pareto çözüme ve 2 adet yerleşim planı ise 7. pareto çözüme karşılık gelmektedir. Pareto kümedeki diğer çözümler için herhangi bir ağırlık kombinasyonu için herhangi bir yerleşim planı bulunamamıştır. Bu durum Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Çözümlerin görülme sıklıkları (Frequencies of the solutions)	
Yerleşim	Görülme Sıklığı
3 8 5 1 4 6 7 2	238
3 8 5 1 6 4 7 2	17
6 4 5 1 3 7 8 2	3
6 7 5 8 4 2 1 3	2
7 5 6 8 2 1 4 3	4
8 5 1 3 6 7 2 4	22

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede ÇATYP'nin çözümü yeni bir melez sezgisel algoritma ile incelenmiştir. Bu melez sezgisel algoritma, TB algoritmasına tabu listesinin eklenmesiyle oluşturulmuştur. Böylece yeni melez algoritmaya hem TB algoritmasının olasılıklı yapısının güçlü tarafı hem de tabu listesi ile kısa dönemli hafıza özelliği kazandırılmıştır. Önerilen melez sezgisel algoritmanın etkinliğinin ölçülmesi için Chen ve Sha [5] tarafından verilen 8 bölüm ve 4 amaç değerine sahip problem kullanılmıştır. 286 farklı ağırlık kombinasyonu için yerleşim planı araştırılmıştır. Aynı zamanda problemin pareto çözümler kümesi de araştırılmıştır. Geliştirilen melez sezgisel algoritma ile oluşturulan pareto çözümler kümesi, 286 farklı ağırlık verilerek bulunan çözümlerin hepsini kapsamaktadır. Problem çözümünde ağırlıklı toplam metodu (weighted sum method) kullanılmıştır. Bu metod Çok Amaçlı Eniyileme problemlerin çözümünde çoğunlukla kullanılan ve oldukça basit bir yöntemdir. Kullanılan ağırlıklar keyfi olarak belirlenmiştir. Farklı metotlar [26] numaralı kaynakta detaylı bir şekilde incelenmiştir. Önerilen melez sezgisel algoritma, karar vericiye tercihleri doğrultusunda en iyi yerleşim

Tablo 1. Bulunan pareto çözümler (Obtained pareto solutions)

No	Malzeme Taşıma Maliyeti	Yakınlık İlişki Skoru	Malzeme Hareket Zamanı	Riskli Malzeme Taşınması	Yerleşim
1	179	202	262.4	61	3 8 5 1 4 6 7 2
2	195	214	286.3	55	3 8 5 1 6 4 7 2
3	199	193	278.6	70	7 5 6 8 2 1 4 3
4	199	215	281.3	60	1 5 4 8 2 7 6 3
5	201	198	285.8	67	4 3 1 2 6 8 5 7
6	203	198	273.8	69	1 2 4 3 5 7 6 8
7	207	194	334.4	65	6 7 5 8 4 2 1 3
8	208	195	328.1	68	8 5 6 7 3 1 4 2
9	209	192	297.0	83	4 3 8 6 2 1 5 7
10	209	212	334.0	59	8 5 1 2 3 4 6 7
11	210	212	316.6	58	1 5 6 4 2 8 7 3
12	211	192	318.9	82	7 6 2 4 5 8 1 3
13	211	208	331.5	59	2 1 5 8 7 4 6 3
14	213	188	307.9	80	4 3 6 8 2 1 7 5
15	214	190	317.3	74	3 4 6 8 2 1 7 5
16	217	178	327.2	83	8 5 1 3 6 7 2 4
17	217	192	312.8	73	5 7 2 1 8 6 4 3
18	224	187	347.1	81	6 7 4 2 8 5 1 3
19	226	224	340.5	52	6 4 5 1 3 7 8 2
20	227	188	351.2	78	7 6 2 4 8 5 1 3
21	234	188	353.1	75	8 7 2 3 5 6 1 4

planı seçeneğini seçebilmesi için kısa zaman diliminde iyi çözümler sunmaktadır. Karar verici önerilen pareto çözümler kümesini kullanarak, değişen koşullara göre vereceği ağırlık değerleri ile uygun yerleşim planını bulabilecektir. Böylece daha etkin ve daha esnek bir karar ortamı sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Jajodia, S., Minis, I., Harhalakis, G. and Proth, J.M., "CLASS: computerized layout solutions using simulated annealing", **International Journal of Production Research**, Cilt 30, No 1, 95-108, 1992.
- Muther, R., **Systematic Layout Planning (SLP)**, 2nd Edition, Cahners Books, Boston, 1974.
- Armour, G.C. and Buffa, E.S., "A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities", **Management Science**, Cilt 9, 294-309, 1963.
- Houshyar, A., "Computer aided facilities layout: an interactive multi-goal approach", **Computers and Industrial Engineering**, Cilt 20, No 2, 177-186, 1991.
- Chen, C.-W. and Sha, D.Y., "Heuristic approach for solving the multi-objective facility layout problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 43, No 21, 4493-4507, 2005.
- Malakooti, B., "Multiple objective facility layout: a heuristic to generate efficient alternatives", **International Journal of Production Research**, Cilt 27, No 7, 1225-1238, 1989.
- Sha, D.Y. and Chen, C.-W., "A new approach to the multiple objective facility layout problem", **Integrated Manufacturing Systems**, Cilt 12, No 1, 59-66, 2001.
- Rosenblatt, M.J., "The facilities layout problem: a multi-goal approach", **International Journal of Production Research**, Cilt 17, No 4, 323-332, 1979.
- Dutta, K.N. and Sahu, S., "A multigoal heuristic for facilities design problems: MUGHAL", **International Journal of Production Research**, Cilt 20, No 2, 147-154, 1982.
- Fortenberry, J.C. and Cox, J.F., "Multiple criteria approach to the facilities layout problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 23, No 4, 773-782, 1985.
- Urban, T.L., "A multiple criteria model for the facilities layout problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 25, No 12, 1805-1812, 1987.
- Harmonosky, C.M. and Tothoro, G.K., "A multi-factor plant layout methodology", **International Journal of Production Research**, Cilt 30, No 8, 1773-1789, 1992.
- Suresh, G. and Sahu, S., "Multiobjective facility layout using simulated annealing", **International Journal of Production Economics**, Cilt 32, No 2, 239-254, 1993.
- Chen, C.-W. and Sha, D.Y., "A design approach to the multi-objective facility layout problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 37, No 5, 1175-1196, 1999.

15. Hahn, P.M. and Krarup, J., “A hospital facility layout problem finally solved”, *Cilt* 12, No 5-6, 487-496, 2001.
16. Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr.C.D. and Vecchi, M.P., “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, Cilt 220, No 4598, 671-680, 1983.
17. Blum, C. and roli, A., “Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison”, *ACM Computing Surveys*, Cilt 35, No 3, 268-308, 2003.
18. Elmohamed, S., Fox, G. and Coddington, P., “A Comparison of Annealing Techniques for Academic Course Scheduling”, **In proceedings of the 2nd International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling**, Syracuse, NY, USA, April 4, 146-166, 1998.
19. Zhang, L. and Wang L., “Optimal parameters selection for simulated annealing with limited computational effort”, **IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing**, Nanjing, China, December 14-17, 412-415, 2003.
20. Glover, F., “Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints”, *Decision Science*, Cilt 8, No 1, 156-166, 1977.
21. Zolfaghari, S. and Liang, M., “Jointly solving the group scheduling and machining speed selection problems: A hybrid tabu simulated and simulated annealing approach”, **International Journal of Production Research**, Cilt 37, No 10, 2377–2397, 1999.
22. Swarnkar, R. and Tiwari, M.K., “Modeling machine loading problem of FMSs and its solution methodology using a hybrid tabu search and simulated annealing-based heuristic approach”, **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Cilt 20, No 3, 199–209, 2004.
23. Zhang, D. and Deng, A., “An effective hybrid algorithm for the problem of packing circles into a larger containing circle”, **Computers and Operations Research**, Cilt 32, 1941–1951, 2005.
24. Şahin, R. and Türkbey, O., “A new hybrid tabu-simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem”, **International Journal of Production Research**, Cilt 47, No 24, 6855–6873, 2009.
25. Wattanapongsakorn, N. and Levitan, S.P., “Reliability optimization models for embedded systems with multiple applications”, **IEEE Transactions on Reliability**, Cilt 53, No 3, 406–416, 2004.
26. Deb, K., “Multi-Objective Optimization using evolutionary Algorithms”, 1st Edition, Wiley, New York, 2001.

Ek 1. Örnek problem için gerekli veriler (The data for example problem)

Bölmeler	1	2	3	4	5	6	7	8
Taşınan Malzeme Miktarları								
1	-	6	1	1	8	2	4	4
2	6	-	1	2	3	3	6	2
3	1	1	-	5	2	3	1	10
4	1	2	5	-	2	8	3	3
5	8	3	2	2	-	4	10	10
6	2	3	3	8	4	-	8	8
7	4	6	1	3	10	8	-	2
8	4	2	10	3	10	8	2	-
Bölmelerarası İlişki Skorları								
1	-	6	5	5	6	4	5	2
2	6	-	3	5	3	2	6	2
3	5	3	-	6	3	1	2	2
4	5	5	6	-	2	2	3	1
5	6	3	3	2	-	5	6	6
6	4	2	1	2	5	-	6	6
7	5	6	2	3	6	6	-	4
8	2	2	2	1	6	6	4	-
Malzeme Taşıma Zamanı								
1	-	1.5	0.5	1.4	1.5	0.5	1.0	0.6
2	1.5	-	1.5	1.6	1.5	1.0	2.0	1.8
3	0.5	1.5	-	2.0	0.7	3.0	1.5	1.6
4	1.4	1.6	2.0	-	2.2	1.0	0.3	2.0
5	1.5	1.5	0.7	2.2	-	1.5	2.0	0.8
6	0.5	1.0	3.0	1.0	1.5	-	1.4	2.2
7	1.0	2.0	1.5	0.3	2.0	1.4	-	2.5
8	0.6	1.8	1.6	2.0	0.8	2.2	2.5	-
Riskli Taşımalar								
1	-	4	0	0	4	0	0	0
2	4	-	1	0	0	0	4	2
3	0	1	-	0	0	3	0	3
4	0	0	0	-	3	6	2	0
5	4	0	0	3	-	0	0	5
6	0	0	3	6	0	-	2	0
7	0	4	0	2	0	2	-	2
8	0	2	3	0	5	0	2	-

Ek 2. Her bir ağırlık kombinasyonu için bulunan yerleşim planları (Obtained layouts for each weight combinations)

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı
0.0	0.0	0.0	1.0	52.00	6 4 5 1 3 7 8 2
0.0	0.0	0.1	0.9	78.13	3 8 5 1 6 4 7 2
		0.2	0.8	101.26	
		0.3	0.7	121.42	
		0.4	0.6	141.56	
		0.5	0.5	161.70	
0.0	0.0	0.6	0.4	181.84	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.7	0.3	201.98	
		0.8	0.2	222.12	
		0.9	0.1	242.26	
		1.0	0.0	262.40	
0.0	0.1	0.0	0.9	69.20	6 4 5 1 3 7 8 2
		0.1	0.8	94.03	
		0.2	0.7	115.38	
		0.3	0.6	135.52	
		0.4	0.5	155.66	
0.0	0.1	0.5	0.4	175.80	3 8 5 1 6 4 7 2
		0.6	0.3	195.94	
		0.7	0.2	216.08	
		0.8	0.1	236.22	
		0.9	0.0	256.36	
0.0	0.2	0.0	0.8	86.40	6 4 5 1 3 7 8 2
		0.1	0.7	109.34	
		0.2	0.6	129.48	
		0.3	0.5	149.62	
		0.4	0.4	169.76	
0.0	0.2	0.5	0.3	189.90	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.6	0.2	210.04	
		0.7	0.1	230.18	
		0.8	0.0	250.32	
0.0	0.3	0.0	0.7	102.70	3 8 5 1 6 4 7 2
		0.1	0.6	123.44	
		0.2	0.5	143.58	
		0.3	0.4	163.72	
0.0	0.3	0.4	0.3	183.86	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.5	0.2	204.00	
		0.6	0.1	224.14	
		0.7	0.0	244.28	
0.0	0.4	0.0	0.6	116.60	6 7 5 8 4 2 1 3
		0.1	0.5	137.54	
		0.2	0.4	157.68	
		0.3	0.3	177.82	
0.0	0.4	0.4	0.2	197.96	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.5	0.1	218.10	
		0.6	0.0	238.24	
0.0	0.5	0.0	0.5	129.50	6 7 5 8 4 2 1 3

Ek 2. Devamı (Continued)

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı
0.0	0.5	0.1	0.4	151.64	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.2	0.3	171.78	
		0.3	0.2	191.92	
		0.4	0.1	212.06	
		0.5	0.0	232.20	
0.0	0.6	0.0	0.4	140.00	8 5 1 3 6 7 2 4
		0.1	0.3	164.42	
0.0	0.6	0.2	0.2	185.52	7 5 6 8 2 1 4 3
0.0	0.6	0.3	0.1	206.02	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.4	0.0	226.16	
0.0	0.7	0.0	0.3	149.50	8 5 1 3 6 7 2 4
		0.1	0.2	173.92	
0.0	0.7	0.2	0.1	197.82	7 5 6 8 2 1 4 3
		0.3	0.0	218.68	
0.0	0.8	0.0	0.2	159.00	8 5 1 3 6 7 2 4
		0.1	0.1	183.42	
		0.2	0.0	207.84	
	0.9	0.0	0.1	168.50	
		0.1	0.0	192.92	
1.0	0.0	0.0	178.00		
0.1	0.0	0.0	0.9	69.00	3 8 5 1 6 4 7 2
		0.1	0.8	92.13	
0.1	0.0	0.2	0.7	113.08	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.3	0.6	133.22	
		0.4	0.5	153.36	
		0.5	0.4	173.50	
		0.6	0.3	193.64	
		0.7	0.2	213.78	
		0.8	0.1	233.92	
		0.9	0.0	254.06	
		0.1	0.1	0.0	
0.1	0.1	0.1	0.7	107.04	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.2	0.6	127.18	
		0.3	0.5	147.32	
		0.4	0.4	167.46	
		0.5	0.3	187.60	
		0.6	0.2	207.74	
		0.7	0.1	227.88	
		0.8	0.0	248.02	
0.1	0.2	0.0	0.7	100.80	3 8 5 1 6 4 7 2
0.1	0.2	0.1	0.6	121.14	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.2	0.5	141.28	
		0.3	0.4	161.42	
		0.4	0.3	181.56	
		0.5	0.2	201.70	
		0.6	0.1	221.84	
		0.7	0.0	241.98	

Ek 2. Devamı (Continued)

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı	
0.1	0.3	0.0	0.6	115.10	3 8 5 1 4 6 7 2	
		0.1	0.5	135.24		
		0.2	0.4	155.38		
		0.3	0.3	175.52		
		0.4	0.2	195.66		
		0.5	0.1	215.80		
	0.6	0.0	235.94			
	0.4	0.4	0.0	0.5		129.20
			0.1	0.4		149.34
			0.2	0.3		169.48
			0.3	0.2		189.62
			0.4	0.1		209.76
	0.5	0.5	0.0	0.0		229.90
			0.0	0.4		143.30
			0.1	0.3		163.44
0.2			0.2	183.58		
0.3	0.1	0.3	0.1	203.72		
		0.4	0.0	223.86		
0.1	0.6	0.0	0.3	153.40	8 5 1 3 6 7 2 4	
0.1	0.6	0.1	0.2	177.54	3 8 5 1 4 6 7 2	
		0.2	0.1	197.68		
0.1	0.7	0.3	0.0	217.82		
		0.0	0.2	162.90	8 5 1 3 6 7 2 4	
0.1	0.7	0.1	0.1	187.32		
		0.2	0.0	210.72	7 5 6 8 2 1 4 3	
0.1	0.8	0.0	0.1	172.40	8 5 1 3 6 7 2 4	
		0.1	0.0	196.82		
0.2	0.9	0.0	0.0	181.90		
		0.0	0.8	83.00	3 8 5 1 6 4 7 2	
0.2	0.0	0.1	0.7	104.74	3 8 5 1 4 6 7 2	
		0.2	0.6	124.88		
		0.3	0.5	145.02		
		0.4	0.4	165.16		
		0.5	0.3	185.30		
		0.6	0.2	205.44		
		0.7	0.1	225.58		
		0.8	0.0	245.72		
	0.1	0.1	0.0	0.7		98.70
			0.1	0.6		118.84
			0.2	0.5		138.98
			0.3	0.4		159.12
			0.4	0.3		179.26
			0.5	0.2		199.40
0.6	0.1	0.6	0.1	219.54		
		0.7	0.0	239.68		

Ek 2. Devamı (Continued)

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı
0.2	0.2	0.0	0.6	112.80	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.5	132.94	
		0.2	0.4	153.08	
		0.3	0.3	173.22	
		0.4	0.2	193.36	
		0.5	0.1	213.50	
	0.6	0.0	233.64		
	0.3	0.0	0.5	126.90	
		0.1	0.4	147.04	
		0.2	0.3	167.18	
		0.3	0.2	187.32	
		0.4	0.1	207.46	
	0.5	0.0	227.60		
	0.4	0.0	0.4	141.00	
		0.1	0.3	161.14	
		0.2	0.2	181.28	
		0.3	0.1	201.42	
	0.4	0.0	221.56		
0.5	0.0	0.3	155.10		
	0.1	0.2	175.24		
	0.2	0.1	195.38		
0.3	0.0	215.52			
0.2	0.6	0.0	0.2	166.80	8 5 1 3 6 7 2 4
0.2	0.6	0.1	0.1	189.34	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.2	0.0	209.48	
0.2	0.7	0.0	0.1	176.30	8 5 1 3 6 7 2 4
		0.1	0.0	200.72	
	0.8	0.0	0.0	185.80	
0.3	0.0	0.0	0.7	96.40	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.6	116.54	
		0.2	0.5	136.68	
		0.3	0.4	156.82	
		0.4	0.3	176.96	
		0.5	0.2	197.10	
		0.6	0.1	217.24	
	0.7	0.0	237.38		
	0.1	0.0	0.6	110.50	
		0.1	0.5	130.64	
		0.2	0.4	150.78	
		0.3	0.3	170.92	
		0.4	0.2	191.06	
		0.5	0.1	211.20	
	0.6	0.0	231.34		
	0.2	0.0	0.5	124.60	
		0.1	0.4	144.74	
		0.2	0.3	164.88	
0.3		0.2	185.02		
0.4		0.1	205.16		
0.5	0.0	225.30			

Ek 2. Devamı (Continued)

W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı
0.3	0.3	0.0	0.4	138.70	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.3	158.84	
		0.2	0.2	178.98	
		0.3	0.1	199.12	
		0.4	0.0	219.26	
	0.4	0.0	0.3	152.80	
		0.1	0.2	172.94	
		0.2	0.1	193.08	
	0.3	0.0	213.22		
	0.5	0.0	0.2	166.90	
		0.1	0.1	187.04	
	0.2	0.0	207.18		
0.3	0.6	0.0	0.1	180.20	8 5 1 3 6 7 2 4
0.3	0.6	0.1	0.0	201.14	3 8 5 1 4 6 7 2
0.3	0.7	0.0	0.0	189.70	8 5 1 3 6 7 2 4
0.4	0.0	0.0	0.6	108.20	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.5	128.34	
		0.2	0.4	148.48	
		0.3	0.3	168.62	
		0.4	0.2	188.76	
		0.5	0.1	208.90	
	0.6	0.0	229.04		
	0.1	0.0	0.5	122.30	
		0.1	0.4	142.44	
		0.2	0.3	162.58	
		0.3	0.2	182.72	
		0.4	0.1	202.86	
0.5	0.0	223.00			
0.2	0.0	0.4	136.40		
	0.1	0.3	156.54		
	0.2	0.2	176.68		
	0.3	0.1	196.82		
0.4	0.0	216.96			
0.3	0.0	0.3	150.50		
	0.1	0.2	170.64		
	0.2	0.1	190.78		
0.3	0.0	210.92			
0.4	0.0	0.2	164.60		
	0.1	0.1	184.74		
0.2	0.0	204.88			
0.5	0.0	0.1	178.70		
	0.1	0.0	198.84		
0.6	0.0	0.0	192.80		
0.5	0.0	0.0	0.5	120.00	
		0.1	0.4	140.14	
		0.2	0.3	160.28	
		0.3	0.2	180.42	
		0.4	0.1	200.56	
0.5	0.0	220.70			

Ek 2. Devamı (Continued)

W_1	W_2	W_3	W_4	Ağırlıklı Toplam Maliyet	Yerleşim Planı
0.5	0.1	0.0	0.4	134.10	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.3	154.24	
		0.2	0.2	174.38	
		0.3	0.1	194.52	
		0.4	0.0	214.66	
	0.2	0.0	0.3	148.20	
		0.1	0.2	168.34	
		0.2	0.1	188.48	
		0.3	0.0	208.62	
	0.3	0.0	0.2	162.30	
		0.1	0.1	182.44	
		0.2	0.0	202.58	
	0.4	0.0	0.1	176.40	
		0.1	0.0	196.54	
	0.5	0.0	0.0	190.50	
0.6	0.0	0.0	0.4	131.80	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.3	151.94	
		0.2	0.2	172.08	
		0.3	0.1	192.22	
		0.4	0.0	212.36	
	0.1	0.0	0.3	145.90	
		0.1	0.2	166.04	
		0.2	0.1	186.18	
		0.3	0.0	206.32	
	0.2	0.0	0.2	160.00	
		0.1	0.1	180.14	
		0.2	0.0	200.28	
	0.3	0.0	0.1	174.10	
		0.1	0.0	194.24	
	0.4	0.0	0.0	188.20	
0.7	0.0	0.0	0.3	143.60	3 8 5 1 4 6 7 2
		0.1	0.2	163.74	
		0.2	0.1	183.88	
		0.3	0.0	204.02	
		0.0	0.2	157.70	
	0.1	0.1	0.1	177.84	
		0.2	0.0	197.98	
		0.0	0.1	171.80	
	0.2	0.1	0.0	191.94	
		0.3	0.0	185.90	
0.8	0.0	0.0	0.2	155.40	
		0.1	0.1	175.54	
		0.2	0.0	195.68	
	0.1	0.0	0.1	169.50	
		0.1	0.0	189.64	
0.2	0.0	0.0	183.60		
0.9	0.0	0.0	0.1	167.20	
		0.1	0.0	187.34	
	0.1	0.0	0.0	181.30	
1.0	0.0	0.0	0.0	179.00	