

BİR TABU ARAMA UYGULAMASI: ESNEK İMALAT SİSTEMLERİ'NDE PARÇA SEÇİMİ VE TAKIM MAGAZİNİ YERLEŞİMİ

Murat ARIKAN ve Serpil EROL

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi 06570, Ankara,
marikan@gazi.edu.tr, serpiler@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 24.01.2005; Kabul/Accepted: 10.05.2005)

ÖZET

Parça tipi seçimi, Esnek İmalat Sistemleri'nin temel problemlerinden biridir. Problem kombinatoriyal olduğundan geleneksel matematiksel programlama teknikleriyle çözülmesi güçtür. Bu çalışmada, parça tipi seçimi, işlem ve takım atamalarını da dikkate alan karışık tamsayı bir programlama modeli olarak formüle edilmiş ve bir tabu arama algoritmasıyla çözülmüştür. En iyi parametre seti faktöryel deney tasarımı ile belirlenen algoritmanın etkinliği, rassal olarak üretilmiş farklı büyüklükteki problemler üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar matematiksel model çözümleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek imalat sistemleri, parça seçimi, matematiksel programlama, tabu arama.

AN APPLICATION OF TABU SEARCH: PART SELECTION AND TOOL MAGAZINE CONFIGURATION IN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

ABSTRACT

Part selection is one of the major problems of the flexible manufacturing systems. Since the problem is combinatorial, it is hard to solve this type of problems by using conventional mathematical programming techniques. In this study, part selection, operation assignment and tool magazine configuration problems are formulated as a joint mixed integer programming model and solved by a tabu search algorithm. The performance of the algorithm, for which the best parameter set is determined by factorial design analysis, is tested on the random generated problems with different sizes. The results are compared with those of the mathematical model.

Keywords: Flexible manufacturing systems, part selection, mathematical programming, tabu search.

1. GİRİŞ

Esnek İmalat Sistemleri (EİS), düşük hacim/yüksek çeşit üretim alanında karşılaşılan sorunları ortadan kaldırmak üzere tasarlanmışlardır. EİS'lerin temel amacı, kitle üretiminin etkinliği ile atölye tipi üretimin esnekliğini tek bir üretim sisteminde birleştirmektir. Bir EİS, bilgisayar kontrolü altında çalışan bir malzeme taşıma sistemiyle birbirine bağlanmış bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) makinalardan oluşan ve birbirinden farklı parçalar üretebilen bir üretim sistemi olarak tanımlanabilir. Esnek İmalat Sistemleri, değişen pazar şartlarına karşılık vermekte zorlanan geleneksel üretim sistemlerine bir seçenek oluştururlar. Stecke [1], bir EİS'yi ilgilendiren işletim problemlerini planlama,

çizelgeleme ve kontrol olarak sınıflandırmıştır. Bu çalışmada, EİS planlama aşamasının temel problemlerinden biri olan parça tipi seçimi ile ilgilenilmiştir. Parça seçimi, üretilmek üzere bekleyen işler setinden, belli bir performans ölçütünü eniyileyecek ve sistem kısıtlarına aykırı düşmeyecek bir alt setin aynı üretim çevriminde işlenmek üzere seçilmesi olarak tanımlanabilir. Burada, makina yükleme problemini oluşturan işlem ve takım atama kararları da parça seçimi ile birlikte ele alınmıştır. Böylece, ortak kısıtlara sahip iki problemin çözüm setlerinin uyumlu olmaları sağlanır.

Literatürde, parça seçimi probleminin genellikle matematiksel programlama yaklaşımıyla ele alındığı görülmektedir [2-10]. Ancak, problemin kombina-

toryal bir yapıya sahip olması nedeniyle boyut büyüdükçe matematiksel modellerle sonuca ulaşmak zorlaşmaktadır. Bir çok çalışmada problemin Lagrange gevşetme gibi matematiksel programlama tabanlı çözüm teknikleri [4,10] ya da probleme özel sezgiseller [3,5] yardımı ile çözüldüğü gözlenmiştir. Son yıllarda ise kombinatoriyal problemlerin çözümlerinde gösterdikleri başarı ve her tip probleme uygulanabilir olmaları sayesinde büyük ilgi gören tavlama benzetimi [7,11], tabu arama [6,12] ve genetik algoritmalar [9] gibi modern sezgisel tekniklerin, EİS planlama problemlerinde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

Benzer problemin modern sezgisel tekniklerle çözüldüğü önceki çalışmalarda, Srivastava ve Chen [6,7], parça seçimi probleminin çözümü için tavlama benzetimi ve tabu arama algoritmalarından yararlanmışlardır. Ancak, çalışmalarında bir parçanın tüm işlemlerinin aynı makina üzerinde yapıldığını varsayımlardır. Mukhopadhyay ve diğerleri [11], Sarma ve diğerleri [12], makina yükleme problemi için parça sıralama yaklaşımını kullanmışlar ve sırasıyla tavlama benzetimi ve tabu arama ile çözmüşlerdir. Bu iki çalışmada da takım magazini kapasiteleri dikkate alınmasına rağmen takım atamaları yapılmamaktadır. Kumar ve Shanker [9] ise parça seçimi ve makina yükleme problemini genetik algoritma ile çözmüşlerdir. Çalışmalarında, planlama dönemini sabit uzunlukta kabul etmişler ve her işlemin yapılmasında alternatif takımlar kullanılabildiğini varsayımlardır. Ayrıca, problemin çözümünde işyükü dengeleme amaçları üzerine odaklanmışlardır. Bu çalışmada ise, makina yüklemeye göre önceliğe sahip olan parça seçim problemi ile ilgilenilmektedir. Parçaları oluşturan işlemler dikkate alınmış olup parçaya ait tüm işlemlerin aynı makinada yapılma zorunluluğu yoktur. Ayrıca, makinaların takım magazini yüklerinin belirlenmesi problemin önemli bir parçasıdır. Bununla birlikte, planlama aşamasında istenen sonucun elde edilmesi için parça seçim ve makina yükleme problemlerinin sıralı çözümünü gerektiren değişken planlama periyodu kullanılmıştır. Burada, ele alınan problemin çözümü için kısa dönem hafızalı bir tabu arama algoritması geliştirilmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMI

Burada gözönüne alınan EİS, takım magazinleriyle donatılmış m tane çok amaçlı makina içermektedir. Makinaların sahip oldukları takım magazinlerinin kapasiteleri belirlidir. Sistemde üretilmeyi bekleyen i farklı parça tipi vardır ve her parça bir veya daha fazla işlemden oluşmaktadır. Her işlemin bir kesici uç (takım) kullanılarak gerçekleştirilebildiği ve bir veya daha fazla makinada yapılabildiği varsayılmaktadır. Tüm işlemlerin makina zamanları, işlemler tarafından gerek duyulan takımlar ve takım magazinlerinde kapladıkları yerler bilinmektedir. Problemin amacı,

seçilecek parçalardan sağlanacak faydayı en büyüleyecek şekilde bir sonraki üretim çevriminde üretilecek parçaların belirlenmesidir. Bir sonraki üretim çevriminde işlenecek parçalar bir kere belirlendikten sonra, parçaların hepsi tamamlanıncaya kadar takım magazini yüklerinde bir değişiklik yapılmamaktadır. Sistem hazırlama her üretim çevriminin başlangıcında gerçekleştirilmektedir.

Gösterim

- i : parça tipleri, $i=1,2,\dots,I$
- k : işlemler, $k=1,2,\dots,K$
- t : takım tipleri, $t=1,2,\dots,T$
- m : makinalar, $m=1,2,\dots,M$
- W_i : i parçasının seçilmesinin sağlayacağı fayda
- P_{ikm} : i parçasının k işleminin m makinasındaki zamanı
- T_i : i parçasının toplam işlem zamanı

$$\left(T_i = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M P_{ikm} \cdot V_{ikm} \right)$$
- J_m : m makinasında işlenebilecek işlerin kümesi
- $M(i,k)$: i parçasının k işleminin yapılabileceği makinalar kümesi
- C_m : m makinasının takım magazini kapasitesi
- nb_t : t takımından sistemde mevcut miktar
- S_t : t takımının makina takım magazininde kapladığı yer
- TM_{ikmt} : i parçasının k işlemi m makinasında t takımıyla yapılabiliyorsa 1, aksi halde 0
- V_{ikm} : i parçasının k işlemi m makinasına atanmışsa 1, aksi halde 0
- Y_i : i parçası üretilmek üzere seçilmişse 1, aksi halde 0
- R_{tm} : t takımı m makinasına atanmışsa 1, aksi halde 0
- O_m : m makinasına atanan işyükünün ortalama yükten yukarı sapma miktarı
- U_m : m makinasına atanan işyükünün ortalama yükten aşağı sapma miktarı

Formülasyon

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I W_i Y_i \quad (1)$$

$$\sum_{(i,k) \in J_m} P_{ikm} \cdot V_{ikm} + U_m - O_m = \sum_{i=1}^I T_i \cdot Y_i / M \quad \forall m \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M(i,k)} V_{ikm} = Y_i \quad \forall i, \forall k \quad (3)$$

$$V_{ikm} \leq \sum_{t=1}^T TM_{ikmt} \cdot R_{tm} \quad \forall i, \forall k, \forall m \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T S_t \cdot R_{tm} \leq C_m \quad \forall m \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M R_{tm} \leq nb_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$V_{ikm} \in (0,1) \quad \forall i, \forall k, \forall m \quad (7)$$

$$Y_i \in (0,1) \quad \forall i \quad (8)$$

$$R_{tm} \in (0,1) \quad \forall t, \forall m \quad (9)$$

$$U_m, O_m \geq 0 \quad \forall m \quad (10)$$

Amaç fonksiyonu (1) ile sistemde üretilmesinden maksimum faydanın sağlanacağı parça seti belirlenir. Kısıt (2), işyükü dengesini tanımlamaktadır. Kısıt (3), i parçası işlenmek üzere seçilmişse, i parçasına ait her işlemin bir makinaya atanmasını sağlar. Kısıt (4), i parçasının k işlemi m makinasına atanmışsa gerektirdiği takımın da m makinasına atanmasını sağlar. Kısıt (5), m makinasına atanan takımların kapladığı toplam yerin o makinanın takım magazini kapasitesini geçmemesini sağlar. Kısıt (6), t takımından tüm makinalara atanan toplam miktarın, o takımın sistemdeki mevcut sayısından az olmasını sağlar. (7)-(10) no'lu kısıtlar sıfır veya pozitif olma şartlarını ve değişken tiplerini tanımlamaktadırlar.

Yukarıda verilen model, sahip olduğu kısıtlardan da anlaşılabilir gibi karışık tamsayı doğrusal bir programlama modelidir. Karışık tamsayı programların hesaplama karmaşıklıkları, orta büyüklükteki bir problem için bile çözüm zamanını oldukça arttırmaktadır. Ele alınan problem kısa dönemli planlanlama problemleri arasındadır, sıklıkla (vardiya, gün vb. aralıklarla) çözülmesi gerektiğinden en kısa zamanda çözüme ulaşması istenir. Bu nedenle problem, modern sezgisel teknikler arasında yer alan ve kombinatoryal yapıdaki problemler için kısa sürelerde en iyiye yakın sonuçlar verdiği bilinen Tabu Arama (TA) ile çözülmüştür.

3. TABU ARAMA

Tabu Arama (TA), Glover [13,14] tarafından kombinatoryal problemlerin çözümü için önerilmiş yüksek seviyeli bir sezgisel programlama tekniğidir. Teknik hakkında detaylı bilgiye Glover ve Laguna'dan [15] ulaşılabilir. Tabu Arama'yı kombinatoryal bir probleme uygulamak için bir takım kararların alınması gereklidir. Bu kararlar ve bu çalışmada ele alınan problem için nasıl alındıkları aşağıda anlatılmıştır [16].

Çözüm uzayı ve başlangıç çözümü: Parça seçimi problemi için en kritik karar hangi takımların hangi makinalara atanacağını belirlemesidir. Parçaya ait bir işlemin yapılabilmesi için ilgili takımın, işlemin yapılabildiği makinalardan birine atanmış olması gerekir. Parça ise ancak ve ancak, sahip olduğu işlemlerin her birinin atandığı bir makina mevcutsa seçilebilir. Bu durumda makinalara atanan takımlar, seçilecek parça sayısını doğrudan etkiler. Bu sebeple problemin çözümü, t takımının m makinasına atanıp atanmadığını gösteren R_{tm} değişkenlerinin oluşturduğu bir vektörle ifade edilmiştir. Algoritmanın başlangıç çözümü biri rassal, diğeri sezgisel olmak üzere 2 farklı şekilde elde edilmiştir. Kullanılan sezgisel algoritmanın adımları Şekil 1'de verilmiştir.

Adım 1: Her makinada her bir takım tipiyle yapılabilen işlemlerin sayısını belirle ve bunları büyükten küçüğe doğru sırala.

Adım 2: Her bir makina için, sıranın en başındaki takımından başlayarak takım atamalarını yap. Eğer sıradaki takım daha önce başka bir makinaya atandıysa, atamayı yapmadan bir sonraki takıma geç. Bu işlemi makinanın takım magazininde yer kalmayınca kadar tekrarla.

Adım 3: İşlenecek parçalara ait işlemlerin sırayla makinalara atamasını yap. Eğer bir parçaya ait işlemlerden biri herhangi bir makinaya atanmamışsa, parçanın o ana kadar makinalara atanmış işlemlerini makinalardan sil ve parçayı seçilmemiş parçalar listesine al. Eldeki tüm parçalar bitinceye kadar bu adımı tekrar et.

Adım 4: DUR

Şekil 1. Sezgisel başlangıç çözümü algoritması

Komşu arama mekanizması: Mevcut çözümden (χ) komşu bir çözüme (χ') geçmek için ekleme/çıkarma hareket mekanizması kullanılmıştır. Komşu arama sırasında sadece uygun çözümler incelenmektedir. Hareket mekanizması şu şekilde açıklanabilir: Rassal olarak seçilen bir R_{tm} değişkeninin değeri 0'sa 1 yapılır. Ancak 1'se 0 yapıldıktan sonra çözüme eklenebilecek başka bir değişken aranır. Bunun için de yine rassal olarak değeri 0 olan bir değişken belirlenir ve 1 değeri verildikten sonra çözümün uygunluğu kontrol edilir. Çözüm uygunsa değerlendirmeye alınır, değilse eklenen değişken tekrar 0 yapılarak çözümün önceki hali değerlendirilir. *Amaç değerinin hesaplanması:* Problemin amaç fonksiyonu, eşitlik (1)'de tanımlandığı gibi, seçilen parçaların ağırlıklı toplamıdır. Ancak, yalnız başına, hangi takımın hangi makinaya atandığını belirten bir çözümün tanımlanması amaç fonksiyonunun değeri hakkında bir ipucu vermez. Bu nedenle, her iterasyonda, yani mevcut çözüm her güncellendiğinde çalıştırılmak üzere bir altprogram tasarlanmıştır. Bu altprogram, bir taraftan makinalara işlem atamalarını yaparak mevcut çözümün amaç fonksiyonunu hesaplarken, diğer taraftan mevcut çözümden hareketle ulaşılabilir komşu çözümlerin amaç değerlerinin hesaplanmasında kullanılacak bir takım bilgileri toplar. Bu bilgiler komşu arama sırasında kullanılarak aday çözümün amaç fonksiyonu bulunur. *Yeniliğe dayalı hafıza ve tabu listeleri:* Yapılan bir hareketin tabu olarak tanımlanması ve yapılacak bir hareketin tabu olup olmadığının kontrolü için iki ayrı tabu listesi kullanılmıştır. Ekleme ve çıkarma hareketleri için tutulan bu listeler $(t) \times (m)$ boyutlu matrisler ile gösterilmektedir. Bu matrislerde, ilgili değişkenin ekleme/çıkarma hareketleri için tabu durumu başlangıç iterasyonları tutulur. Ayrıca, bir hareketin kaç iterasyon boyunca tabu kalacağını belirlemek için iki ayrı (ekleme ve çıkarma olmak üzere) tabu liste uzunluğu tanımlanmıştır.

Aday liste stratejisi: Ele alınan problem için, komşu bir çözümün amaç değeri doğrudan bilinmemektedir. Ayrıca, mevcut çözümün tüm komşularının değerlendirilmesi de çözüm zamanını oldukça arttırmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada aday çözümlerin rassal olarak belirlenmesi tercih edilmiştir. *Tabu yıkma ölçütü:* Bu çalışmada, tabu yıkma ölçütlerinden amaca göre tabu yıkma kullanılmıştır. Bu ölçüte göre tabu olan bir hareket, mevcut iterasyona kadar bulunmuş en iyi çözümden daha iyi bir çözümün elde edilmesini sağlıyorsa, tabu olmasına rağmen gerçekleştirilmektedir.

Durdurma koşulu: Algoritma, mevcut en iyi çözümde önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısı boyunca bir iyileşme sağlanamadığı takdirde durdurulmaktadır.

Geliştirilen tabu arama algoritması Şekil 2'dedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Algoritmanın göstereceği performans, algoritma parametrelerine verilecek değerlerle yakından ilgilidir. Bu nedenle, algoritmanın en iyi sonuç verdiği parametre setinin belirlenmesi için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Literatürde, tanımlanan probleme ilişkin bir veri seti bulunamadığından, algoritmanın performansını ölçmek üzere farklı büyüklüklerde test problemleri rassal olarak üretilmiştir. Problem büyüklükleri, makina, parça, işlem ve takım sayılarıyla tanımlanmıştır. Makina sayıları 5-8, parça sayıları 20-40, işlem sayıları 3-5, takım sayıları da 20-50 arasında olmak üzere 8 farklı problem büyüklüğü belirlenmiş ve problemlere ait parametreler, takımların uyumlu olduğu makinalar, işlemlerin gerektirdikleri takımlar tekdüze rassal dağılıma uygun olarak üretilmiştir.

Daha sonra, test problemlerinin karışık tamsayılı programlama modelleri kurulmuş ve GAMS (General Algebraic Modelling System) programının OSL çözücüsü ile çözülmüştür. GAMS koşulları için, problemlerin makul bir zaman diliminde en iyi çözüme ulaşamama durumuna karşı, 86400 saniyelik (24 saat) bir süre limiti verilmiştir. Bu süre sınırı içinde test problemlerinin 5'inde (problem no. 1, 2, 3, 5, 7) en iyi değere ulaşılırken, kalan problemlerde (problem no. 4, 6, 8) en iyi çözüm bulunamamıştır. Tablo 1'de GAMS çözümlerinden elde edilen

Kısa dönem hafızalı Tabu Arama Algoritması

```
(*X0, başlangıç çözümü*)
(*Xbest, en iyi çözüm*)
(*Xneigh, komşuluktaki en iyi çözüm*)
(*cls, aday liste uzunluğu*)
(*iterbest, en iyi çözümün bulunduğu iterasyon sayısı*)
Begin
Algoritma parametrelerine başlangıç değerlerini ver;
Bir başlangıç çözümü bul (X0);
Xbest=X0; fbest=f(X0); X=X0;
While iteration-iterbest<iterfark do
  Begin
  fneigh_best=0;
  Repeat
  Mevcut çözümün uygun bir komşusunu (X') üret;
  l=l+1;
  if (güncel hareket tabu değil) or (f(X')>fbest) then
  begin
  if f(X')> fneigh_best then begin
  komşuluktaki en iyi çözümü güncelle;
  (Xneigh=X'; fneigh_best=f(X'))
  end;
  end;
  Until l=cls;
  if fneigh_best>fbest then en iyi çözümü güncelle
  (Xbest=Xneigh);
  mevcut çözümü güncelle (X=Xneigh);
  tabu listelerini güncelle;
  iteration=iteration+1;
  end;
Yazdır (fbest, Xbest)
End.
```

Şekil 2. Tabu Arama algoritması

sonuçlar verilmektedir.

Test problemleri GAMS ile çözüldükten sonra, algoritmanın en iyi parametre setinin belirlenmesinde faktöryel tasarımdan yararlanılmıştır. Tabu arama algoritması TurboPascal programlama diliyle kodlanmış ve tüm bilgisayar koşulları Pentium IV 2.6 Ghz işlemcili bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Etkinlik ölçütü olarak test problemlerinin karışık tamsayılı programlama modeliyle çözümlerinden elde edilen amaç değerlerinin, Tabu Arama algoritmasıyla bulunan ortalama amaç değerinden oransal farkı kullanılmıştır. Faktöryel tasarıma dahil edilen algoritma parametreleri aşağıdadır, parametrelerin

Tablo 1. Test problemlerinin GAMS ile çözümlerinden elde edilen sonuçlar

Pr. No.	m	i	k	t	GAMS çözüm değeri	GAMS tamsayı üst sınır	Çözüm zamanı (CPU sn)
1	5	20	3	20	513	513	101,99
2	5	20	5	30	390	390	10029,12
3	5	30	3	30	765	765	19341,35
4	5	30	5	40	660	669	86401,26
5	8	30	3	30	471	471	86400,72
6	8	30	5	40	579	605	86401,37
7	8	40	3	40	946	946	5246,10
8	8	40	5	50	520	531	86401,81

gözönüne alınan düzeyleri de Tablo 2'de verilmiştir.

1. *Başlangıç çözümü (bç)*: Başlangıç çözüm kalitesinin algoritma performansını etkileyebileceği düşünülmektedir.

2. *Tabu süreleri (ts)*: Ekleme ve çıkarma hareketleri için tabu süreleri eşit kabul edildiğinden tek bir faktör olarak alınmışlardır.

3. *Aday liste uzunluğu çarpanı (aluç)*: Bu faktör, her iterasyonda incelenecek aday çözümlerin sayısının problem büyüklüğüne bağlı olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır. Aday liste uzunluğu, ilgili problem çözümündeki değişken sayısının *aluç* faktörü ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır.

4. *İterasyon sayısı (iterfark)*: Bu faktör durdurma koşulunu, yani en iyi çözüm değişmeden geçecek iterasyon sayısını göstermektedir.

Tablo 2'den anlaşılacağı gibi, başlangıç çözümü 2, diğer faktörler 3 düzeye sahiptir. Tabu süresi faktörü, ekleme ve çıkarma hareketleri için eşit alınmıştır. Tam faktöryel analiz için $2 \times 3^3 = 54$ farklı parametre kombinasyonu mevcuttur. Her kombinasyon 3 farklı probleme (Problem No. 1, 5, 8) uygulanmıştır ve her kombinasyon için farklı başlangıç rassal sayılarıyla 5'er koşum olmak üzere toplam $54 \times 3 \times 5 = 810$ deneme

yapılmıştır. Gözönüne alınan faktörlerin performans ölçütü üzerindeki etkisini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) kullanılmış ve faktörlerin seçilen düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığının anlaşılması için Duncan çoklu aralık testi yapılmıştır. ANOVA sonuçları Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo incelendiğinde, $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde, dikkate alınan tüm faktörlerin algoritma performansı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. İkili ortak etkilerden ise sadece başlangıç çözümü (bç) ve iterasyon sayısı (iterfark) ikili ortak etkisi anlamlı bulunmuştur. Üçlü ve dörtlü ortak etkilerden hiçbiri algoritmanın performansı üzerinde etkili değildir. Varyans analizi sonucunda, ana etkide anlamlı çıkan faktörlerin düzeyleri arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığının belirlenmesi amacıyla yapılan Duncan çoklu aralık testinin sonuçları da tablo 4'te görülmektedir. Duncan çoklu aralık testinin sonuçları incelendiğinde, iki düzeye sahip başlangıç çözümü faktörünün sezgisel düzeyinin rassal düzeye göre daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağladığı görülmüştür. Tabu süresi faktörünün ise orta ve yüksek düzeyleri arasında algoritma performansının farksız olduğu, buna karşın tabu süresinin düşük düzeyinde algoritmanın daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, aday liste uzunluğu ve iterasyon sayısı ile ilgili faktörlerin tüm düzeyleri

Tablo 2. Algoritma parametreleri ve faktöryel tasarımda göz önüne alınan düzeyleri

Faktör ismi	Düşük Düzey (-1)	Orta Düzey (0)	Yüksek Düzey (+1)
Başlangıç çözümü (bç)	rassal	-	sezgisel
Tabu süreleri (ts)	5	7	10
Aday liste uzun. çarpanı (aluç)	0,05	0,10	0,15
İterasyon sayısı (iterfark)	500	1000	1500

Tablo 3. Tabu Arama algoritması için ANOVA sonuçları

Değişim Kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama kare	F değeri	P-değeri
bç	8,242E-03	1	8,242E-03	20,055	<u>,000</u>
ts	1,009E-02	2	5,043E-03	12,270	<u>,000</u>
aluç	,100	2	5,008E-02	121,856	<u>,000</u>
iterfark	3,519E-02	2	1,759E-02	42,810	<u>,000</u>
2 ortak					
bç * ts	1,181E-04	2	5,904E-05	,144	,866
bç * aluç	9,248E-06	2	4,624E-06	,011	,989
bç * iterfark	3,827E-03	2	1,913E-03	4,656	<u>,010</u>
ts * aluç	9,565E-04	4	2,391E-04	,582	,676
ts * iterfark	1,458E-03	4	3,645E-04	,887	,473
aluç * iterfark	8,552E-04	4	2,138E-04	,520	,721
3 ortak					
bç * ts * aluç	2,285E-03	4	5,712E-04	1,390	,239
bç * ts * iterfark	8,160E-04	4	2,040E-04	,496	,738
bç * aluç * iterfark	9,259E-04	4	2,315E-04	,563	,690
ts * aluç * iterfark	3,452E-03	8	4,315E-04	1,050	,400
4 ortak					
bç*ts*aluç*iterfark	2,446E-03	8	3,058E-04	,744	,653
Hata	8,878E-02	216	4,110E-04		
Toplam	1,131	270			

algoritmanın farklı performans göstermesine yol açmaktadır ve bu faktörlerin yüksek düzeylerinde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. TA algoritması için yapılan varyans analizi ve Duncan çoklu aralık testine göre başlangıç çözümü sezgisel olarak belirlendiğinde, ekleme ve çıkarma tabu süreleri 5, aday liste uzunluğu çarpanı 0.15 ve en iyi çözüm değişmeden geçecek iterasyon sayısı 1500 olarak alındığında algoritmanın en iyi sonucu verdiği Tablo 4'ten görülmektedir.

Tablo 5'te, test problemlerinin GAMS paket programı ve TA algoritmasıyla çözüm sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak verilmiştir. Geliştirilen kısa dönem hafızalı TA algoritması, en iyi parametre seti ile farklı başlangıç rassal sayılarıyla her problem için 5'er kez oluşturulmuş ve elde edilen maksimum, ortalama ve minimum çözüm değerleri tabloda gösterilmiştir. Algoritma ile en iyi çözümü bilinen problemlerde (Pr. No. 1, 2, 3, 5, 7) en iyi değerden % 0,17 ile % 2,10 arasında bir ortalama sapma elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, problem 5 hariç, tüm bilinen en iyiye sahip problemlerde, 5 koşumun en az 2'sinde en iyiye ulaşılmıştır. En iyi değer bilinmediği problemlerde ise (Pr. No. 4, 6, 8), GAMS çözümlerinden % 0,48 ile % 2,57, üstsınırdan ise % 1,82 ile % 5,61 arasında daha kötü sonuçlara ulaşıldığı gözlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, parça seçim problemi kısa dönemli planlama problemleri arasındadır ve çok sık aralıklarla çözümüne ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle,

algoritma için kritik performans ölçütlerinden biri de koşum zamanıdır. Algoritmanın ortalama koşum zamanlarının çok kısa olduğu tablodan görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Esnek İmalat Sistemleri, yoğunlaşan uluslararası rekabet ve sürekli değişen pazar şartları karşısında üreticilerin ayakta kalmalarını kolaylaştıran yüksek teknolojiye dayalı modern üretim sistemlerinden biridir. Ancak, sistemden beklenen yararların alınabilmesi ve yatırılan sermayenin kısa sürede geri dönüşünün sağlanabilmesi için EİS'lerin etkin bir şekilde planlanmaları ve işletilmeleri gerektiği açıktır.

Bu çalışmada, EİS planlama problemleri arasında yer alan parça seçim, işlem atama ve takım magazini yerleşimi problemleri için kısa dönem hafızalı bir tabu arama algoritması geliştirilmiş ve algoritmanın en iyi parametre setinin belirlenmesinde varyans analizinden yararlanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, başlangıç çözümü sezgisel olarak belirlendiğinde, ekleme ve çıkarma tabu süreleri 5, aday liste uzunluğu çarpanı 0.15 ve en iyi çözüm değişmeden geçecek iterasyon sayısı 1500 olarak alındığında, algoritmanın iyi sonuçlara oldukça kısa sürelerde ulaştığı görülmüştür.

Burada problem, parça seçim amacı altında çözülmüştür. Çalışmanın devamında problemin, tüm

Tablo 4. Duncan çoklu aralık testi sonuçları

Faktörler	Düzeyleyler	Grup Ortalaması	Test Sonuçları	
			Kombinasyonlar	Anamlı Farklılık
1. bç	Rassal Sezgisel	6,2E-02 5,1E-02	rassal-sezgisel	var
2. ts	(5, 5)	4,9E-02	(5, 5)-(7, 7)	var
	(7, 7)	5,8E-02	(5, 5)-(10,10)	var
	(10, 10)	6,4E-02	(7, 7)-(10, 10)	yok
3. aluç	0,05	8,3E-02	0,05-0,10	var
	0,10	4,9E-02	0,05-0,15	var
	0,15	3,8E-02	0,10-0,15	var
4. iterfark	500	7,2E-02	500-1000	var
	1000	5,5E-02	500-1500	var
	1500	4,4E-02	1000-1500	var

Tablo 5. TA algoritmasının test problemleri üzerindeki performansı

Pr No	TA Algoritması (TA)			GAMS çözüm değerleri (2)	GAMS tamsayı üst sınır (3)	(2)-(1) arasındaki % fark	(3)-(1) arasındaki % fark	Ort. TA koşum zamanı (CPU saniye)
	min	ort (1)	max					
1	477	502,2	513	513	513	2,10	2,10	2,11
2	378	387,4	390	390	390	0,66	0,66	2,89
3	755	759,2	765	765	765	0,76	0,76	2,43
4	652	656,8	660	660	669	0,48	1,82	3,24
5	465	466,8	468	471	471	0,89	0,89	4,99
6	571	571	571	579	605	1,38	5,61	5,49
7	942	944,4	946	946	946	0,17	0,17	9,60
8	498	506,6	517	520	531	2,57	4,59	10,60

planlama aşamasını kapsayacak şekilde, farklı amaç fonksiyonlarının sıralı ya da eşzamanlı göz önüne alınmasıyla genişletilmesi düşünülmektedir. Ayrıca, üretim oranı belirleme, kaynak tahsisi (palet ve sabitleyicilerin atanması) gibi diğer planlama problemleriyle ilgili kısıtların da matematiksel modele eklenmesiyle, algoritma yeniden düzenlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Stecke, K. E., "Design, Planning, Scheduling and Control Problems of Flexible Manufacturing Systems", **Annals of Operation Research**, Cilt 3, 3-12, 1985.
2. Hwang, S., "A Constraint-directed Method to Solve the Part Type Selection Problem in Flexible Manufacturing Systems Planning Stage", **Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems: Operation Research Models and Applications**, edited by K.E. Stecke and R. Suri, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 297-309, 1986.
3. Rajagopalan, S., "Formulation and Heuristic Solutions for Parts Grouping and Tool Loading in Flexible Manufacturing Systems", **Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems: Operation Research Models and Applications**, edited by K.E. Stecke and R. Suri, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 311-320, 1986.
4. Hwan S.S. ve Shogan A.W., "Modelling and solving an FMS part selection problem", **International Journal of Production Research**, Cilt 27, 1349-1366, 1989.
5. Moreno, A.A. ve Ding, F.Y., "Heuristics for the FMS loading and part type selection problems", **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, Cilt 5, 287-300, 1993.
6. Srivastava, B. ve Chen, W.H., "Part type selection problem in flexible manufacturing systems: tabu search algorithms", **Annals of Operations Research**, Cilt 41, 279-297, 1993.
7. Srivastava, B. ve Chen, W.H., "Batching in production planning for flexible manufacturing systems", **International Journal of Production Economics**, Cilt 43, 127-137, 1996.
8. Lee, D.H. ve Kim, Y.D., "A multi-period order selection problem in flexible manufacturing systems", **Journal of the Operational Research Society**, cilt 49, 278-286, 1998.
9. Kumar, N. ve Shanker, K., "A genetic algorithm for FMS part type selection and machine loading", **International Journal of Production Research**, Cilt 38, No 16, 3861-3887, 2000.
10. Liang, M. ve Dutta, S. P., "An integrated approach to the part selection and machine loading problem in a class of flexible manufacturing systems", **European Journal of Operation Research**, Cilt 67, 387-404, 1993.
11. Mukhopadhyay, S.K., Singh, M.K. ve Srivastava, R., "FMS machine loading: a simulated annealing approach", **International Journal of Production Research**, Cilt 36, No 6, 1529-1547, 1998.
12. Sarma, U.M.B., Kant, S., Rai, R. ve Tiwari, M.K., "Modelling the machine loading problem of FMSs and its solution using a tabu-search-based heuristic", **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Cilt 15, No 4, 285-295, 2002.
13. Glover, F., "Tabu Search-Part I", **ORSA Journal on Computing**, Cilt 1, No 3, 190-206, 1989.
14. Glover, F., "Tabu Search-Part II", **ORSA Journal on Computing**, Cilt 2, No 1, 4-32 1990.
15. Glover, F. ve Laguna, M., "Tabu Search", **Kluwer Academic Publishers**, USA, Boston, 1997.
16. Arıkan, M., **Esnek İmalat Sistemleri'nde Parça Seçimi, Operasyon Atama ve Alet Deposu Yerleşimi İçin Sezgisel Algoritmalar**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.