



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Mümin SÖNMEZ¹, Gürkan ÖZTÜRK²

**ALTERNATİF ROTALI HÜCRE OLUŞTURMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ
İÇİN YENİ BİR MELEZ YAKLAŞIM**

ÖZ

Bu çalışmada alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Rekabetçi Sinir Ağı (RSA) temelinde melez bir yaklaşım önerilmiştir. PSO yöntemindeki parçacıklar, her bir parça için izlenecek rotaları temsil edecek şekilde kodlanmıştır. Parçacıkların sahip olduğu rota seçim bilgileri kullanılarak her parçacığa karşı gelen alternatif rotaların olmadığı bir hücre oluşturma problemi elde edilir. Bu indirgenmiş problem Rekabetçi Sinir Ağı yaklaşımı ile çözülerek karşı gelen gruplandırma etkinliği ilgili parçacığın uyum değeri olacak şekilde atanır. Ayrıca PSO-RSA melez yaklaşımının etkinliğinin gösterilmesi için geliştirilen sadece PSO yaklaşımı ve Tavlama Benzetimi – RSA melez yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. PSO-RSA yaklaşımının performansı, literatürde yer alan test problemleri üzerinden karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hücre Oluşturma Problemi, Parçacık Sürü Eniyileme, Rekabetçi Sinir Ağı

**A NEW HYBRID APPROACH TO SOLVE CELL FORMATION PROBLEM WITH
ALTERNATIVE ROUTINGS**

ABSTRACT

In this study a hybrid approach based on Particle Swarm Optimization (PSO) and Competitive Neural Network (CNN) is proposed to solve cell formation problems with alternative routings. Particles in PSO are decoded as representation of routings which will be followed by each part. By using the route information of the particles a cell formation problem without alternative routings corresponding to each particle is obtained. This reduced problem is solved by a Competitive Neural Network approach and its grouping efficacy result is assigned to particle as a fitness value. Furthermore, in order to demonstrate efficiency of the PSO-CNN hybrid approach, proposed method is compared with purely PSO and Simulated Annealing – CNN hybrid as other two methods developed for solving same problem. Performance of the PSO-CNN approach is shown on the test problems with comparisons.

Keywords: Cell Formation Problem, Particle Swarm Optimization, Competitive Neural Networks

¹ Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Arifiye 54580, Sakarya
E-posta: sonmezmumin@gmail.com

² Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,
İkinci Kampüsü, 26555, Eskişehir, E-posta: gurkan.o@anadolu.edu.tr

1.GİRİŞ

Atölye Tipi Üretim Sisteminde makineler benzer fonksiyonlarına göre bir araya getirildiğinden işlem için gelen parçalar en az bir bölümde işlem görmektedir ve bu nedenle parça taşıma mesafesi fazla olmaktadır. Bunun yanında Akış Tipi Üretim Sisteminde parçalar hat boyunca hareket ettiğinden yerleşim planı esnek olmamakta, bir makinede meydana gelen arıza tüm hattı etkilemektedir.

Bu iki üretim sisteminin dezavantajlarını gidermek için alternatif üretim sistemleri ortaya çıkmıştır. Parça taşıma mesafesi, hazırlık süresi, stok miktarı ve parti büyüklüğünü azaltmayı hedefleyen Grup Teknolojisi (GT), üretim verimliliğini enbüyüklemek için benzer ve tekrarlayan işlem veya görevleri bir araya getirmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır (Heyer and Wemmerlöv, 1984).

GT'deki üretim uygulaması Hücresele Üretim Sistemi (HÜS) olarak adlandırılmaktadır (Selim ve ark., 1998). Hücresele üretim, benzer işlemleri gören parça aileleri için benzer özelliklere sahip makinelerin gruplandığı üretim şeklindedir. Hücresele üretim hazırlık zamanını kısaltır böylece parti büyüklüğü azalır, süreç içi stoklarda azalma ve üretim süresinde de bir azalma sağlanır (Baalkur ve ark., 1987).

Hücresele üretim sisteminin uygulanmasında karşılaşılan enbüyük problem oluşturulacak parça/makine gruplarının belirlenmesidir. Bu problem hücre oluşturma problemi olarak ele alınmaktadır. Parçaların hangi makinelerde işlendiğini gösteren temas matrisi, blok köşegen matris formuna dönüştürülmeye çalışılır (James ve ark., 2007).

Hücre oluşturma problemleri NP-Zor problemler sınıfında yer almaktadır (King, 1982). Literatürde hücresele üretim problemlerinin çözümü için sezgisel yaklaşımlardan matematiksel programlama yaklaşımlarına kadar birçok algoritma geliştirilmiştir (Öztürk ve ark., 2006).

Lee ve ark. (1997), üretim hacmini, alternatif rotaları ve işlem sırasını göz önüne alarak, genetik algoritmalar ile taşıma mesafesini enküçüklemeyi amaçlayan bir model kurmuştur. GT alanında bu kriterleri ele alarak çözüm arayan ilk çalışmadır. Caux ve ark. (2000), alternatif rotaları ve makine kapasitelerinin dikkate alındığı bir çalışma yapmıştır. Hücre oluşturma problemi çözümü için tavlama

benzetimi yöntemi ve alternatif rota seçimi için de dal-sınır yöntemi birleştirilmiştir. Spiliopoulos ve Sofianopoulou (2007), alternatif rotalı hücre oluşturma problemleri için çözüm aramıştır. Önerdikleri yaklaşımda çözüm uzayı sezgisel olarak daraltılmaktadır. Sormaz ve Rajaraman (2008), eş zamanlı alternatif rota seçimi ve hücrelerin oluşturulduğu bir uzay arama algoritması önermiştir. Hücrelerde yer alacak makine sayıları kısıt olarak modele eklenmiştir. Susanto ve ark. (2009), işlem sırasının, talep miktarının ve alternatif rotaların dikkate alarak c-ortalama kümeleme algoritması ile parça ailelerini ve makineleri gruplamıştır. Wu ve ark. (2009), tavlama benzetimi ve genetik algoritma mutasyon operatörünü birlikte kullanarak alternatif rotalı hücre oluşturma problemleri için melez bir yaklaşım önermiştir. Chung ve ark. (2011), alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümü için benzerlik katsayılarını temel alan yasaklı arama yöntemini kullanmıştır. Saraç ve Özçelik (2009) tarafından alternatif rotalı hücre oluşturma probleminin çözümü için yeni bir Genetik Algoritma yaklaşımı önerilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak bu algoritma, gruplama etkinliğini enbüyükleyen hücre sayısını da kendi belirlemektedir. Diaz ve ark. (2001), alternatif rotalı hücre oluşturma problemleri için yaptıkları çalışmada, hücrelere atanacak makine sayısının yanı sıra bazı makinelerin hücrelere birlikte atanması veya atanmaması kısıtlarını da modele dahil edecek şekilde bir Yasaklı Arama yöntemi önermişlerdir.

Andres ve Lozano (2006) tarafından ilk defa PSO yaklaşımını kullanarak hücreler arası taşıma mesafesini en aza indirmeyi amaçlayan bir çalışma yapılmıştır. Rezazadeh ve ark. (2009), sanal hücre üretim sistemleri için PSO yaklaşımını ve doğrusal programlamayı birlikte kullanmışlardır. Çalışmada işlem adımları, alternatif rotalar, makine kapasiteleri, işçi çalışma kapasiteleri, maksimum hücre büyüklüğü, makine işçi dengesi kısıtları modele dahil edilmiştir. Anvari ve ark. (2010), gruplama etkinliğini enbüyüklemek için yeni bir PSO yaklaşımı önermiştir. Modelde hücrede bulunabilecek maksimum makine sayısı ve maksimum hücre sayısı kısıtları yer almaktadır. Duran ve ark. (2010), hücre oluşturma problemlerinin çözümü için PSO yaklaşımını ve veri madenciliği uygulamalarında kullanılan orantılı benzerlik tekniği ile birlikte ele alan bir yaklaşım önermişlerdir.

Bu çalışmada hücre oluşturma problemi için alternatif rotaların olduğu durum ele alınmaktadır. Problemin bu şekli ile ele alınma nedeni, gerçek hayat problemlerinde parçaların izleyebilecekleri rotaların çoğunlukla birden fazla olmasıdır. Problem çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Rekabetçi Sinir Ağı (RSA) yaklaşımlarını temel alan melez bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde PSO ve RSA iç içe çalışmaktadır. PSO'daki parçacıklar birim hiperküp çözüm uzayında arama yapmakta ve buradaki sürekli değerler kesikli değerlere dönüştürülerek parçaların izleyecekleri rotalar belirlenmektedir. RSA ise, belirlenen rotalara göre indirgenmiş temas matrisini girdi olarak alarak blok köşegen bir matris formuna dönüştürmektedir. Böylece parça ve makinelerin atandığı hücreler belirlenmektedir. Yöntemin amacı blok köşegen matris formunu temel alan gruplama etkinlik değerini enbüyüklemektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde Alternatif rotalı hücre oluşturma problemleri ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir. Önerilen algoritmanın temelini oluşturan Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Rekabetçi sinir ağı ile ilgili açıklamalar üçüncü bölümde yapılmıştır. Dördüncü bölümde geliştirilen algoritma örnek problemler ile birlikte verildikten sonra literatür test problemleri üzerinde gerçekleştirilen hesapsal sonuçlar beşinci bölümde sunulmuştur. Makale yapılan değerlendirmeler ile altıncı bölüm ile sonlandırılmıştır.

2. ALTERNATİF ROTALI HÜCRE OLUŞTURMA PROBLEMİ

Hücre oluşturma sırasında üç genel amaç vardır: parça ailelerinin oluşturulması, makine hücrelerinin oluşturulması ve parça ailelerinin makine hücrelerine atanması.

Bazı üretim sistemlerinde, üretim planı oluştururken karşılaştırılabilir farklı planlar mevcut olabilir. Alternatif rotaların olması durumunda farklı üretim planlarının içinden seçim mümkün olabilir. Alternatif rotalı üretimde, parçaların izlediği rotalardan biri seçilmektedir. Bu planların seçilme nedenlerinden biri de benzer fonksiyonlara sahip işlem merkezleri kurmaktır. Bir parçanın birden fazla tezgahta işlenebilmesi durumunda, parça işlem merkezleri dışında kalmayacak şekilde herhangi bir alternatif yolu izleyebilir (Nagi ve ark., 1990). Alternatif rotaların olması, 0-1'lerden oluşan temas matrisinin daha iyi bir şekilde blok köşegen forma getirilmesini sağlamaktadır (Adil ve ark., 1996).

Bir parçanın alternatif rotalara sahip olması için ya bir makineden birden fazla olması (kopya makine) ya da parçanın farklı makinelerde işlenerek üretilebilir olması gerekir (Saraç ve Özçelik, 2009).

Alternatif rotaların bulunmadığı altı parça ve altı makine için oluşturulan temas matrisi Şekil 1'de gösterilmektedir. Örneğin 5. parça sadece bir rota izleyebilmekte, bu durumda 2, 3, 5 numaralı makinelerde işlem görmektedir. Alternatif rotaların bulunmadığı durumda hücreler oluşturulduğunda birinci hücrede 1, 3, 5 makineleri yer almakta, diğer hücrede ise 2, 4, 6 makineleri yer almaktadır. Oluşturulan hücrelerin dışında kalan istisnai eleman sayısı üç iken, hücre içi boşluk sayısı da birdir.

Parçalar	Makineler					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	
2		1		1	1	1
3		1		1		1
4	1		1		1	
5		1	1		1	
6		1		1		1

Parçalar	Makineler					
	1	3	5	2	4	6
1	1	1	1	1		
4	1	1	1			
5		1	1	1		
2				1	1	1
3				1	1	1
6				1	1	1

Şekil 2. Alternatif rotaların olduğu durumdaki matriste blok köşegenleşme

Şekil 3'de ikinci makineden iki kopya olduğu varsayılmıştır. Bu durumda hücre dışında kalan iki makinesi her iki hücrede de yer alabilecektir. Kopya makine olması durumunda oluşturulan hücrelerde iki boşluk yer alırken, hücre dışı istisnai eleman sayısının da bire düştüğü görülmektedir.

Parçalar	Makineler						
	1	3	5	2.1	2.2	4	6
1	1	1	1	1			
4	1	1	1				
5		1	1	1			
2				1		1	1
3						1	1
6						1	1

Şekil 3. Kopya makinelerin olması durumdaki matriste blok köşegenleşme

Literatürde hücre oluşturma problemlerinin değerlendirilmesine ilişkin farklı ölçüm teknikleri ileri sürülmüştür. Blok köşegen matris oluşturulduğunda, her bir blok hücreleri göstermektedir. Bu grupların dışında kalan 1'ler istisnai elemanlar olurken içeride kalan 0'larda boşlukları göstermektedir.

Hücre oluşturma problemlerinin çözümünü değerlendiren performans ölçüleri, genellikle bahsedilen bu boş ve istisnai elemanları kullanmaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan iki ölçüm tekniği vardır: *Gruplama Verimliliği* (Chandrasekharan ve Rajagopalan, 1986), *Gruplama Etkinliği* (Kumar ve Chandrasekharan, 1990). Gruplama Verimliliği temas matrisi büyük olan problemlerde iyi ve kötü yapıyı başarılı şekilde ayırt edemediği için (Kumar ve Chandrasekharan, 1990), bu çalışmada performans ölçütü olarak Gruplama Etkinliği kullanılmıştır.

Gruplama Etkinliği: Kumar ve Chandrasekharan (Kumar ve Chandrasekharan, 1990), blok dışındaki harici elemanlara ve blok içindeki boşluklara eşit ağırlıklar atayan Gruplama Etkinliğini önermiştir. Hücre dışında yer alan harici elemanların az olması hücreler arası taşıma mesafesini azaltırken, hücre içindeki boşlukların az olması da makine kullanım oranının artmasına neden olmaktadır. Gruplama Etkinliği Γ ile tanımlanır ve Denklem 1 ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\Gamma = \frac{n_1 - n_1^d}{n_1 + n_0^l} \quad (1)$$

Köşegen bloklarda yer alan 1'lerin toplam sayısının ($n_1 - n_1^d$), temas matrisinde yer alan 1 (n_1) ve köşegen blokta yer alan boşlukların (n_0^l) toplamına oranı Gruplama Etkinliğini verir.

3. RSA ve PSO

Bu bölümde, önerilen melez algoritmanın yapısını oluşturan Rekabetçi Sinir Ağı ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yaklaşımları ile ilgili bilgi verilmekte ve kesikli problemlerin çözümü için PSO yönteminde kullanılacak yeni bir yaklaşım açıklanmaktadır.

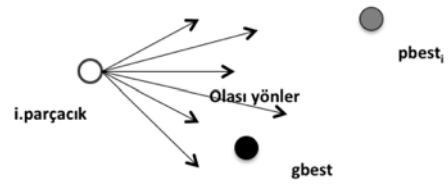
3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Sosyal bilgi paylaşımını temel alan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemi ilk kez Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından sürekli doğrusal olmayan fonksiyonların çözümü için önerilmiştir.

Fonksiyondaki değişken sayısı, n olarak gösterilirse her parçacık n boyutlu uzayda (R^n) arama yapmaktadır. Yani parçacık n adet bileşene sahip olmaktadır. x_{in}^k , i . parçacığın n . bileşeninin k . tekrarda aldığı değeri gösteren ifadedir. Her parçacığın k . tekrara kadar elde ettiği en iyi uygunluk değerine karşılık gelen

bileşen değerleri $pbest_i$ 'de tutulmaktadır. Aynı şekilde k . tekrara kadar tüm parçacıklar içinde elde edilen en iyi uygunluk değerine karşılık gelen bileşen değerleri de $gbest$ 'de tutulur.

$pbest$ ve $gbest$ parçacıklarının koordinatları $pbest_i = [p_{i1} p_{i2} \dots p_{in}]$ ve $gbest = [g_1 g_2 \dots g_n]$ ile gösterilmektedir. PSO ile i . parçacığın $pbest_i$ ve $gbest$ değerlerine doğru nasıl hareket ettiği Şekil 4'te gösterilmektedir. Parçacığın yön güncellemesi Denklem 2'de verilirken, parçacıkların bir sonraki tekrarda alacağı değerler Denklem 3'deki gibi hesaplanır (Kennedy ve Eberhart, 1995).



Şekil 4 PSO ile parçacığın $pbest_i$ ve $gbest$ 'e doğru hareketi

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c_1 \cdot rnd_1 \cdot (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \cdot rnd_2 \cdot (gbest^k - x_i^k) \quad v_i^k \in R \quad (2)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad x_i^k \in R \quad (3)$$

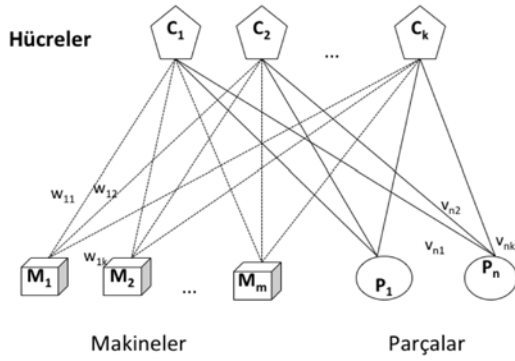
Algoritma başlangıcında *tekrar sayısı* ve *parçacık sayısı* parametrelerinin yanında, " c_1 " ve " c_2 " parametrelerinin de belirlenmesi gerekir. Genelde $0 < c_1 < 2$ ve $0 < c_2 < 2$ olmak üzere farklı değerler alabilir, c_1 kavramsal katsayı olarak tanımlanır ve parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi aday çözüme götüren adım büyüklüğünü ifade eder, c_2 ise sosyal katsayı olarak tanımlanır ve bütünsel aday çözüme götüren adım büyüklüğünü ifade eder. Arama uzayı belirli bir $[-x_{max}, x_{max}]$ aralığında kalabilmesi için yönü ifade eden değerlerinde $[-v_{max}, v_{max}]$ aralığında sabitlenmesi gerekmektedir. Eşitlikteki rnd_1 ve rnd_2 ise 0-1 aralığında düzgün dağılımdan üretilen rassal değerlerdir (Blondin, 2009).

3.2. Rekabetçi Sinir Ağı

Alternatif rotaların olmadığı hücre oluşturma problemini çözmek için bir RSA yaklaşımı Öztürk ve Öztürk (2005) tarafından önerilmiştir. Aynı anda makine gruplarının parça ailelerine ve parça ailelerinin makine gruplarına atanmasını sağlayan bu yaklaşım, literatür problemlerine uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Öztürk ve ark., 2006).

Rekabetçi sinir ağının yapısı 3 farklı bileşenden oluşur. İlk iki bileşen, girdi desenini oluşturan parça ve makineleri üçüncü bileşen ise çıktı desenini oluşturan hücreleri temsil eder. Girdi ve çıktı nöronları arasındaki bağlantılar w_{ij} ve v_{pj} ağırlıkları ile gösterilir. Ağırlık indisleri $i=1, \dots, m$; $p=1, \dots, n$ ve $j=1, \dots, k$ şeklindedir ve sırasıyla makine, parça ve hücreleri temsil ederler. RSA'nın ağ yapısı Şekil 5'de gösterilmiştir.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak RSA, parça ve makineleri eş zamanlı olarak hücrelerde gruplayabilmektedir.



Şekil 5. Rekabetçi sinir ağının yapısı

RSA algoritmasında *öğrenme oranı* ve *tekrar sayısı* parametreleri başlangıçta verilir. Nöronlar arası ağırlıklar ise başta rassal olarak oluşturulur. Temas matrisinde yer alan her parça ve makinenin ağ yapısı içinde kendine özgü bir deseni vardır. Her parçaya ve makineye karşı gelen bir girdi deseni bulunmaktadır. Dolayısıyla bir temas matrisi üzerinden, uzunluğu $m+n$ olan $m+n$ tane ayrı girdi deseni tanımlanabilmektedir. Algoritma genel olarak iç ve dış olmak üzere iki döngüden oluşur. Dış döngü her tekrarda, $m+n$ elemanlı rassal bir π dizilimi (permütasyonu) üretirken, iç döngü de her seferinde farklı desenler oluşturmak için bu dizilimi kullanır. Bu oluşturma işlemi $\pi[q]$ ile uyumlu olarak yapılır. Dış döngüde gerçekleştirilen ardıştırma sayısı tekrar sayısına ulaştığında algoritma sonlanır. RSA algoritması ile ilgili detaylara Öztürk ve Öztürk (2005) ve Öztürk ve ark. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan erişilebilir.

3.3. Kesikli Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi için Yeni bir Yaklaşım

İlk versiyonu sürekli değişkenlerin çözümü için geliştirilen PSO, Kennedy ve Eberhart (1997) tarafından yapılan çalışmada ikili kesikli değişkenler için kullanılabileceği gösterilmiş ve kesikli değer alan bazı problemlere uygulanmıştır. Yöntemde hız vektörü bileşenleri olan v_{in} 'ler [0-1] aralığında kalmakta ve sigmoid fonksiyon yardımıyla yapılan karşılaştırma sonucunda x_{in} 'ler 0 veya 1 değerini almaktadır.

Çalışma kapsamında önerilen yaklaşımda x_{in} değerlerinin [0-1] aralığında kalması sağlanarak, bu bileşenlere karşılık gelen değerler kesikli hale dönüştürülür. Böylelikle parçacıkların n boyutlu birim hiperküp içinde kalarak arama yapması sağlanır. Her parçacığın v_{in} değerleri Denklem 3'e göre güncellendikten sonra birim vektöre dönüştürülür. Daha sonra hız bileşenleri olarak birim v_{in} 'ler kullanılır.

PSO'nun temel mantığı, arama uzayını her parçacığın o ana kadar kendi en iyi koordinatlarına ve tüm parçacıklar içinden en iyi koordinatlara bağlı olarak taramasıdır. Bu mantığa bağlı kalınarak geliştirilen yaklaşımda, birim hiperküp içinde bulunan parçacığın x_{in} değerleri, hız bileşeni olan v_{in} değerlerine bağlı olarak hangi yönde hareket edecekleri belirlenmektedir. Eğer v_{in} değeri negatif ise x_{in} "0" yönünde hareket ederken, pozitif olması durumunda "1" yönünde hareket etmektedir. Böylelikle parçacığın birim hiperküpün hangi sınırına doğru yönleneceği belirlenebilir.

Parçacıkların her zaman birim hiperküp içinde kalmasını sağlamak için hız vektörleri birim vektöre dönüştürülür. Parçacıkların yön bileşenlerinin işaretlerine göre hareket yönünün belirlenmesinin ardından, x_{in} değerleri ile belirlenen "0" ya da "1" değeri arasındaki mutlak fark bulunur, böylelikle parçacığın sınır değerlere olan uzaklığı bulunmuş olur.

Her parçacığın tüm x_{in} değerleri ile sınır değerleri olan 0 ya da 1 arasındaki uzaklıklar birim v_{in} değerine bölünerek o doğrultuda parçacığın birim v_{in} 'nin kaç katı mesafe gideceği belirlenir. Sınırlardan dışarı çıkmamak için her parçacığın v_{in} değerlerine bağlı kalarak belirlenen bu katlardan en küçüğü rassal bir sayı ile çarpılır ve mevcut x_{in} değerlerine eklenir. Böylelikle yeni x_{in} değerleri elde edilir ve arama uzayında komşu çözümlere geçiş sağlanmış olur. Kesikli değerlere geçiş x_{in} değerlerine karşı gelen

aralıklara göre gerçekleştirilir. Örneğin parçacığın ilgili bileşeni [1,2] aralığında tam sayı değer alıyorsa x_{in} değişkeninin [0,0.5] aralığındaki değerleri için "1", [0.5, 1.0] aralığındaki değerleri için "2" kesikli değeri elde edilir. v_{in} değerlerinin güncellenmesi PSO yönteminde açıklanan şekilde yapılmaktadır.

Açıklayıcı Örnek: Örnekte kesikli PSO için önerilen yaklaşımda parçacıkların [0-1] arama uzayında nasıl hareket ettikleri gösterilmektedir. Tablo 1’de parçacıkların başlangıç X_i değerleri [0,1] aralığında, V_i değerleri [-1,1] aralığında rassal olarak oluşturulmuştur.

Tablo 1. Parçacıkların başlangıç konum ve hız değerleri

Parçacık No	x_{i1}	x_{i2}	v_{i1}^{k+1}	v_{i2}^{k+1}	Hız vektörü uzunluğu
P1	.14	.64	.47	.43	.64
P2	.48	.74	.73	-.24	.77
P3	.26	.65	-.18	.38	.42
P4	.76	.48	.10	.48	.49
P5	.38	.40	-.47	-.24	.53

Her parçacığın hız vektörünün uzunluğu bulunduktan sonra Tablo 2’deki gibi birim vektöre dönüştürülür.

Tablo 1’de iki bileşeni (x_{i1} ve x_{i2}) verilen parçacıkların, yönleri V vektörü ile belirlenmektedir. Her parçacık, karşı gelen yön vektörü doğrultusunda hareket eder. İlgili parçacığın koordinatları ile ilerleyecekleri yön arasındaki mutlak fark (sınıra uzaklık) bulunarak birim hız vektörünün o yönde kaç kat gidebileceği hesaplanır (Tablo 3). Parçacığın yeni konumu; birim hız vektörünün, hesaplanan kat değerlerinin en küçüğü ve bir rassal sayının çarpımı ile elde edilen vektörün mevcut konum vektörüne eklenmesi ile bulunur.

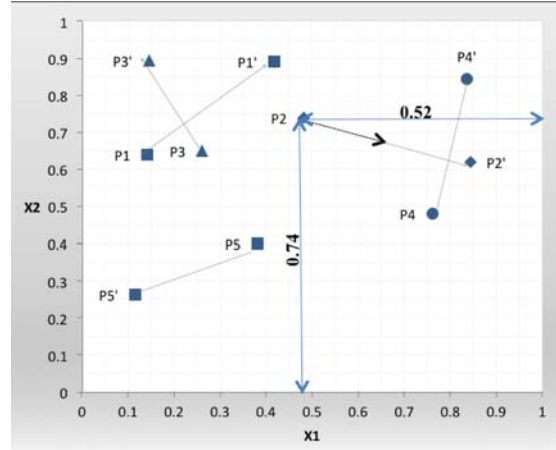
Tablo 2. Parçacık birim hız vektörleri

Parçacık No	x_{i1}	x_{i2}	Birim	
			v_{i1}^{k+1}	v_{i2}^{k+1}
P1	.14	.64	.74	.68
P2	.48	.74	.95	-.31
P3	.26	.65	-.43	.90
P4	.76	.48	.20	.98
P5	.38	.40	-.89	-.45

Örneğin P2 parçacığının yeni konumu hesaplanırken, rassal sayı değeri 0.7 kabul edildiğinde, en küçük kat değeri 0.55, (enk {2.37, 0.55}) ve birim hız vektörü (.95, -.31) olduğunda yeni konum Denklem 4 ile gösterildiği gibi hesaplanır. Tüm parçacıklar için elde edilen değerler tablo 3’te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 0.84 \\ 0.62 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.48 \\ 0.74 \end{bmatrix} + (0.7)(0.55) \begin{bmatrix} 0.95 \\ -0.31 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sürekli değerlerden kesikli değerlere geçişte yine P2 parçacığının [1-5] aralığında tam sayı değer aldığı varsayalım, yeni P2 parçacığının birinci bileşen değeri 0.84’dür, bu değer 0.8-1.0 aralığında yer aldığından karşılık gelen kesikli değer "5" olmaktadır.



Şekil 6. Parçacıkların eski ve yeni koordinatları

Parçacıkların eski konumları ile Tablo 3’teki şekli ile hesaplanan yeni konumları (P1’, P2’, P3’, P4’ ve P5’) Şekil 6’da gösterilmiştir.

Tablo 3. Yeni X_i değerlerine geçiş

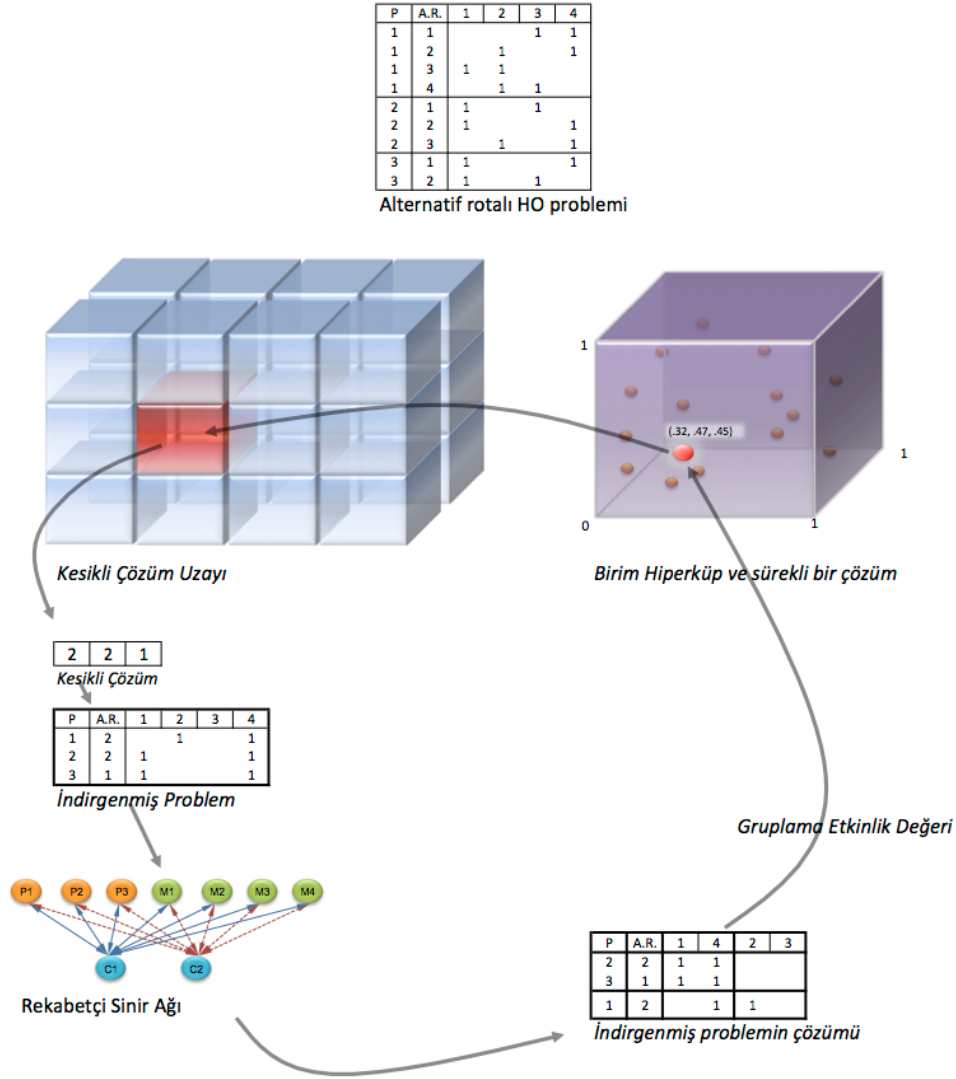
Parçacık No	Yöne göre sınırlar		Sınır uzaklık		uzaklık/ birim V		En küçük kat	Eklenecek hız değerleri		Yeni X değerleri	
	v_{i1}^{k+1}	v_{i2}^{k+1}	x_{i1}^{k+1}	x_{i2}^{k+1}	v_{i1}^{k+1}	v_{i2}^{k+1}		x_{i1}^{k+1}	x_{i2}^{k+1}		
P1	1	1	.86	.36	1.17	.53	.53	.28	.25	.42	.89
P2	1	0	.52	.74	.55	2.37	.55	.36	-.12	.84	.62
P3	0	1	.26	.35	.61	.39	.39	-.12	.25	.14	.90
P4	1	1	.24	.52	1.18	.53	.53	.08	.36	.84	.84
P5	0	0	.38	.40	.43	.88	.43	-.27	-.14	.11	.26

4. MELEZ YAKLAŞIM

RSA, daha önce alternatif rotaların olmadığı hücre oluşturma problemlerinin çözümünde kullanılmış ve çok kısa sürelerde oldukça iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Öztürk ve ark., 2006). Bu çalışmada, alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümü için PSO ve RSA'larının birlikte kullanıldığı melez bir yaklaşım önerilmiştir.

Öncelikle problemde alternatif rotası olan parçalar belirlenmektedir. Böylece parçacıklar belirlenen alternatif rotalı parça sayısı kadar bileşene sahip olmaktadır. Parçacığın her bileşen değeri hangi parçanın hangi alternatif rotayı seçtiğini gösterir. Bu bileşen değerlerine göre her parçacık, bileşenlerinde yer alan alternatif rotalara göre indirgenmiş temas matrisini temsil etmektedir. Yaklaşımda PSO alternatif rotaların seçimini yaparken RSA ise rotalara göre belirlenen temas matrisindeki parça ve makineleri gruplayarak hücreleri oluşturmaktadır.

Önerilen melez algoritmada iki döngü vardır: dış döngüde yer alan PSO algoritması, alternatif rotaları seçer ve indirgenmiş matrisi RSA'na gönderir, iç döngüde yer alan RSA ise blok diyagonal matris formunu oluşturarak hücreleri belirler. Çözüm sonucu oluşturulan bu hücelere göre hesaplanan gruplama etkinlik değerleri, uygunluk değeri olarak parçacıklara atanır. Parçacıklara ait hız vektörünün güncellenmesi için gerekli olan $pbest_i$ ve $gbest$ değerleri, parçacıkların her tekrarda elde ettiği uygunluk değerleri göz önüne alınarak belirlenmektedir. Önerilen melez yaklaşımın algoritması Şekil 7'deki gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 7. PSO-RSA yaklaşımı

PSO algoritmasında başlangıç durumunun oluşturulması için *parçacık sayısı*, c_1 , c_2 ve *tekrar sayısı* başlangıç parametreleri olarak belirlenir. PSO algoritmasına ait parçacık konumları (X) ve hızlar (V) rassal olarak oluşturulur. Bir parçacıkta bulunan eleman sayısı temas matrisindeki alternatif rotası olan parça sayısı kadardır. Her eleman için $[0-1]$ aralığında bir değer bulunmaktadır ve kesikli çözümde bu değer $[1, \text{parçanın alternatif rota sayısı}]$ aralığında rassal bir değere dönüştürülür. Parçacıkların hız vektörlerinin her bir elemanı için $[-1,1]$ aralığında rassal değerler üretilir, daha sonra hız vektörü birim vektöre dönüştürülerek kullanılır.

Örnek olarak Kusiak (1987) tarafından Şekil 8'de verilen problem dikkate alınmıştır. Bu temas matrisi beş parça ve dört makineden oluşmaktadır. İlk parça üç diğerleri ise ikişer alternatif rotaya sahiptir. Her parçanın alternatif rotası olduğu için her parçacığın bileşen sayısı beş olmaktadır. Parçacığın her elemanı hangi parçanın hangi alternatif rotasının seçildiğini göstermektedir. Bu yüzden parçacık sayısı kadar indirgenmiş parça-makine matrisi elde edilir ve bu matrislerin her biri rekabetçi sinir ağına gönderilir.

RSA için *tekrar sayısı* ve *öğrenme oranı* parametreleri başlangıçta belirlenmektedir. Her indirgenmiş temas matrisi için hücre oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra, oluşan blok diyagonal matrise göre hesaplanan gruplama etkinlik değeri RSA'ya gelen parçacığın uygunluk değeri olarak atanır. PSO'nun ilk tekrarında her parçacığın konumu $pbest_i$ 'de, etkinlik değeri de $fpbest_i$ 'de tutulur. Bununla birlikte en iyi etkinlik değerine sahip parçacığın konumu $gbest$ 'de tutulurken, en iyi değer de $fgbest$ 'de tutulmaktadır.

Parça No	Alt. Rota	Makineler			
		1	2	3	4
1	1			1	1
	2		1		1
	3	1	1		
2	1		1	1	
	2	1		1	
3	1	1			1
	2		1		1
4	1	1			1
	2	1		1	
5	1			1	1
	2	1			

Şekil 8. Alternatif rotalara sahip bir parça-makine (temas) matrisi

Parçacıklara ait hız vektörleri, V_i 'ler, Denklem 2 kullanılarak güncellenir. Daha sonra hız vektörleri birim vektöre dönüştürülür, Alt bölüm 3.3'te açıklanan işlemlere göre parçacıkların $[0,1]$ aralığında yeni konumları, X_i 'ler, belirlenmiş olur. Sürekli parçacık değerleri, kesikli değerlere dönüştürülerek, parça için seçilen alternatif rotalar belirlenir. Böylece RSA'a tekrar gönderilecek indirgenmiş temas matrisleri belirlenmiş olur. Algoritma PSO için geçerli tekrar sayısı kadar ardıştırmadan sonra sonlandırılır. Alternatif rotaları seçen dış döngü yeterli sayıya ulaştığında eldeki en iyi $fgbest$ değerine sahip blok diyagonal matris, gruplama etkinliği en iyi olan hücre oluşumunu ifade eder.

Alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar veren PSO – RSA melez yönteminin yanında, sadece PSO ve Tavlama Benzetimi – RSA melez yönteminin kullanıldığı iki algoritma daha tasarlanmıştır.

Problemin çözümü için tasarlanan PSO yaklaşımında yer alan parçacıklar, seçilen alternatif rotalarla birlikte hücrelere atanan makine ve parçaları temsil etmektedir. Şekil 8'de yer alan problem dikkate alındığında, çözümü ifade eden bir parçacık yapısı Şekil 9'daki gibi olur.

Verilen parçacığın birinci bölümünde seçilen alternatif rotalar, ikinci bölümde parçalar ve üçüncü bölümde ise makineler yer almaktadır. Bu örnek gösterime göre, üçüncü parçacık için ikinci alternatif rota seçilirken, dördüncü parça ikinci hücreye, ikinci makine birinci hücreye atanmıştır.

Seçilen alternatif rotalar					Parçalar					Makineler			
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1

Şekil 9. PSO-RSA yaklaşımı

Sofianopoulou (1999) tarafından verilen P20 problemi için PSO - RSA melez yaklaşım algoritması 100 parçacık ve 200 tekrar için çalıştırıldığında, en iyi gruplama etkinlik değeri olan 0.4931 değerine 1405 saniye sonra ulaşmaktadır; aynı problem için sadece PSO algoritmasına dayanan yaklaşım algoritması 100 parçacık ve 500 tekrar için çalıştırıldığında etkinlik değeri 0.3526 bulunmuştur. Yaklaşım farklı problemler üzerinde de denenmiştir, küçük boyutlu problemlerde literatürdeki en iyi sonuçlara ulaşabilen sadece PSO yaklaşımı, büyük boyutlu problemlerde elde edilen en iyi sonuçların %20 -%30 gerisinde kalmıştır.

Alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümü için önerilen diğer bir yöntem Tavlama Benzetimi – RSA melez yaklaşımıdır. Tavlama benzetimi başlangıç parametrelerinden olan, *başlangıç sıcaklığı*, *sıcaklık azaltma periyodu*, *sıcaklık azaltma oranı* ve *tekrar sayısı* belirlendikten sonra rassal bir çözüm üretilmektedir. Üretilen bu çözüm PSO – RSA melez yaklaşımındaki parçacık yapısı gibidir. Tavlama benzetimi alternatif rotaları seçer, böylece alternatif rotalardan arındırılmış temas matrisi RSA'ya gönderilerek hücreler oluşturulur. Algoritma adımları rassal bir başlangıç çözümü ile başlar, sonra komşu çözüme geçiş sağlanır, komşu çözümün gruplama etkinlik değeri önceki çözüm değerinden daha iyi olması durumunda doğrudan güncellenirken daha kötü olması durumunda Tavlama Benzetimine göre

$$P = e^{-\left(\frac{\Delta}{T}\right)}, \Delta = \frac{f(S_n) - f(s)}{f(S_n)} * 100$$

olasılığı ile kabul edilir. Algoritma adımlarında komşu çözümlere geçildikçe eldeki eniyi değer ile karşılaştırma yapılır. P20 problemi için Tavlama Benzetimi – RSA melez algoritması 4000 tekrar için çalıştırıldığında 642. saniyede 0.4452 gruplama etkinlik değerine ulaşılmıştır. Bu sonuç ulaşılan en iyi değer olan 0.4931’in yaklaşık %10 altında kalmaktadır, büyük boyutlu problemler için de elde edilen çözümlerin yaklaşık %10 oranında en iyi değerlerin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

5. HESAPSAL SONUÇLAR

Geliştirilen melez yaklaşım, literatürde bulunan alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerine uygulanmıştır. Uygulama sırasında, enbüyük hücre büyüklüğü, üretim hacmi, farklı maliyetler gibi kısıtlar göz önünde bulundurulmamış, sadece alternatif rotalar dikkate alınmıştır.

Yaklaşımın amacı hücreler arası taşımayı enküçükmektir, bunun için de temel alınan değerlendirme kriteri gruplama etkinliği olmuştur. Gruplama etkinliği “1” değerine ne kadar yaklaşırsa hücre bağımsızlıkları o kadar fazla olmaktadır. Hücre dışı istisnai elemanlar hücreleri birbirine bağımlı hale getirirken, hücre içinde boş elemanlarda makine kullanım oranını düşürmektedir.

Parçaların farklı makinelerde işlenmesi veya aynı makineden (kopya) birden fazla olması durumunda alternatif rotaların varlığından bahsedilmektedir. Tablo 4’te çözüm aranan test problemlerinin listesi verilmiştir. P1-P16 numaralı problemlerdeki alternatif rotalar, parçaların farklı makinelerde işlem görmesini ele alırken, P17-P21 problemleri kopya makine olması durumunda oluşan alternatif rotaları ele almaktadır.

Tablo 4. Test Problemleri

Problem No	Kaynak	MÇ	MS	PS	RS
P1	Kusiak (1987)	4	4	5	11
P2	Adil ve ark. (1996)	4	4	5	12
P3	Won ve Kim (1997)	4	4	4	8
P4	Gupta, (Yin ve ark., 2002)	5	5	7	11
P5	Gupta, (Yin ve ark., 2002)	6	6	8	15
P6	Moon ve Chi (2010)	6	6	6	13
P7	Sankaran ve Kasinlingam (Vin, 2010)	6	6	10	20
P8	Won ve Kim (1997)	7	7	10	23
P9	Logendran (Vin, 2010)	17	7	14	32
P10	Kazerooni (Lee ve ark., 1997)	8	8	13	26
P11	Adil ve ark. (1996)	10	10	10	24
P12	Won ve Kim (1997)	11	11	10	22
P13	Sofianopoulou (1999)	12	12	20	26
P14	Nagi (1990)	15	15	15	27
P15	Won ve Kim (1997)	26	26	28	71
P16	Kazerooni (Lee ve ark., 1997)	30	30	40	88
P17	Kasilingam and Lashkari (1991)	10	13	15	55
P18	Harhalakis (Vin, 2010)	5	7	6	16
P19	Sofianopoulou (1999)	12	14	20	45
P20	Sofianopoulou (1999)	16	18	30	59
P21	Nagi (1990)	17	20	20	51

MÇ : Makine çeşidi
MS : Makine sayısı
PS : Parça sayısı
RS : Rota sayısı

Tabloda problemlere ilişkin *kaynak, makine çeşidi, makine sayısı, parça sayısı, rota sayısı* bilgilerine yer verilmiştir. Rota sayısı arttıkça problemlerin zorluğu da kaçınılmaz olarak artmaktadır. Makine çeşidi ve makine sayısı arasındaki fark kopya makinelerin sayısını verir. Saraç ve Özçelik (2009), Wu ve ark. (2009) ve Vin’in (2010) tarafından yapılan çalışmalarda alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinin çözümleri araştırılmaktadır. Her bir çalışmanın ortak noktası, gruplama etkinliğini enbüyüklemeyi amaçlamasıdır. Bu çalışmaların karşılaştırmaya alınma sebebi, elde ettikleri etkinlik değerlerinin yüksek olması ve literatürdeki test problemlerin çoğunu kapsamasıdır.

Tablo 5'in önerilen yaklaşıma ile ilgili sütunlarında *hücre sayısı* ve *gruplama etkinliği* değerlerinin yanı sıra PSO ve RSA ile ilgili parametreler ile saniye cinsinden çözüm süreleri verilmektedir. PSO-RSA algoritması, 6 GB RAM ve 6 çekirdekli 2.93Ghz iki işlemciye sahip, Windows 7 işletim sistemli bir iş istasyonunda çalıştırılmıştır.

Parçaların farklı makinelerde işlenebilmesi durumunda, önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yer alan 16 test problemi (P1- P16) çözdürülmüştür. Tablo 5'de Altrot_GA, Melez Tavlama Benzetimi ve Simogga yöntemleri önerilen yöntem ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşım ile çoğu problem için literatür değerlerine erişilmiş, bazıları için daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Tablodaki gruplama etkinliği sütununda yer alan değerlerin üst indisleri, diğer yöntemlere göre elde edilen daha iyi sonuçları işaret etmektedir.

Aynı makineden birden fazla olması durumu ile ilgili literatürde yer alan problemler (P17-P21) için temas matrisi tekrar düzenlenmiş ve çözdürülmüştür. Kopya makinelerde işlem gören her parça için alternatif rota oluşturulmuştur. Bir parçanın 1, 3, 4, 5 numaralı makinelerde işlem gördüğünü ve 5. Makineden 2 tane olduğunu varsayalım. Parçanın birinci alternatif rotası 1, 3, 4, 5(1) olurken, ikinci alternatif rotası da 1, 3, 4, 5(2) olmaktadır. Kopya makine sayısının fazla sayıda olması, parçaların izleyecekleri alternatif rotaların sayılarını hızla arttırmaktadır. PSO-RSA yaklaşımı ile iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen, parçacık boyutunun büyüdüğü durumlarda algoritmanın en iyi çözüme ulaşması için uzun süre çalışması gerektiği gözlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlara göre önerilen melez yaklaşım, PSO-RSA, ele alınan 21 problemde 6 (5, 10, 13, 14, 16 ve 20) tanesinin raporlanan en iyi çözümlerini iyileştirmiş; 13 problemde ise (1-4, 6-9, 11, 12, 15, 18 ve 21) raporlanan en iyi çözüm değerlerine ulaşmıştır. Bu 13 problem içinden 6 ve 21 numaralı problemlerde Simogga yönteminden, 9 ve 11 numaralı problemlerde Melez Tavlama Benzetimi yönteminden ve 15 numaralı problemde hem Altrot_GA hem de Simogga yöntemlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Sadece 17 ve 19 numaralı problemlerde raporlanan en iyi çözüm değerlerine erişilememiştir. Problem 17 için Altrot_GA yaklaşımının elde ettiği sonuca ulaşamamış ancak Melez Tavlama Benzetiminden daha iyi olan Simogga yöntemi ile aynı çözüm elde edilmiştir. Problem 19 için ise Simogga yöntemi ile elde edilen çözümden daha iyi olan Altrot_GA ile aynı çözüm elde edilmiş, ancak Melez Tavlama Benzetimi yöntemine göre daha düşük bir gruplama etkinlik değeri bulunmuştur

Tablo 5. Alternatif rotalı hücre oluşturma problemleri için çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması

Problem No	Altrot_GA (Saraç ve Özçelik, 2009)		Melez Tavlama Benzetimi (Wu ve ark., 2009)		Simogga (Vin, 2010)		Önerilen Yaklaşım					
	Hücre Sayısı	Gruplama Etkinliği	Hücre Sayısı	Gruplama Etkinliği	Hücre Sayısı	Gruplama Etkinliği	Hücre Sayısı	Gruplama Etkinliği	Parçacık Sayısı - PSO	Tekrar Sayısı - PSO	Tekrar Sayısı - RSA	Süre (sn)
P1		.9000	2	.9000	2	.9000	2	.9000	5	10	7	1
P2		.9091					2	.9091	10	20	7	1
P3			2	1.000	2	1.000	2	1.000	5	20	7	1
P4					3	.9333	3	.9333	5	20	7	1
P5					2	.6667	2	.8462 ^S	5	20	7	1
P6		.8333	2	.8333	3	.8000	2	.8333 ^S	5	20	7	1
P7		.7222	2	.7222	4	.7222	2	.7222	5	20	7	1
P8		.8148	3	.8148	3	.8148	3	.8148	20	20	7	2
P9			3	.6944	3	.7027	3	.7027 ^T	20	30	10	4
P10					4	.7381	3	.8378 ^S	20	20	10	2
P11			3	.8286	5	.8333	3	.8333 ^T	20	30	7	1
P12		.8065	4	.8065	3	.8065	4	.8065	20	30	7	4
P13			4	.4947	4	.4912	4	.5000 ^{T, S}	20	200	10	111
P14					4	.4915	2	.5274 ^S	20	20	7	2
P15	7	.7203	6	.7248	7	.5412	6	.7248 ^{G, S}	100	200	7	335
P16					7	.5511	7	.7021 ^S	100	200	10	1415
P17	5	.6667	3	.619	5	.6452	3	.6429 ^T	100	200	10	35
P18					3	.7273	3	.7273	10	20	7	1
P19	4	.5300	4	.5429	3	.5085	4	.5300 ^S	100	200	10	194
P20	5	.4626	6	.4745	7	.4300	6	.4931 ^{G, T, S}	100	200	20	1405
P21		.7952	5	.7952	5	.6040	5	.7952 ^S	100	200	10	163

G - Altrot_GA karşılaştırma yöntemine göre daha iyi sonuç elde edilmiştir

T - Melez Tavlama Benzetimi karşılaştırma yöntemine göre daha iyi sonuç elde edilmiştir

S - Simogga karşılaştırma yöntemine göre daha iyi sonuç elde edilmiştir

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışmada Grup Teknolojileri, Hücresel Üretim ve Hücre oluşturma problemleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde bir çok çalışmada alternatif rotaların ele alınmadığı gözlenmiştir. Alternatif rotaların probleme dahil edilmesi ile daha gerçekçi çözümlerin elde edilmesi sağlamakta ancak çözüm daha zor hale gelmektedir.

Alternatif rotaların olmadığı problemlerin çözümü için başarılı sonuçlar veren RSA yaklaşımı, PSO ile birleştirilerek alternatif rotalar için çözüm arayan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Literatürde PSO yöntemi hücre oluşturma problemlerinin çözümünde kullanılmış olmasına rağmen PSO ve alternatif rotalar bu çalışmada ele alınmıştır. Bununla birlikte arama uzayı birim hiperküp düzeyinde tasarlanarak, kesikli değerlere geçiş sağlayan yeni bir yapı önerilmiştir.

Literatürde yer alan problemler çözdürülerek karşılaştırma yapılmıştır. Geliştirilen yöntem sayesinde çoğu problemde en iyi değerlere ulaşılmış ya da karşılaştırma yapılan çalışmaların en az birinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda üretim hacmi, kapasite, talep kısıtı, işlem sıralama bilgisi gibi unsurları da dikkate alacak şekilde melez algoritmanın hücre oluşturma problemlerinin çözümü için geliştirilmesi düşünülebilir. Birim hiperküp düşüncesi ile alternatif rotalı hücre oluşturma problemlerinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşımın diğer kombinatorik eniyileme problemlerinde kullanılabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- A. Baalkur and J. H Steudel, "A Within-Cell Utilization Based Heuristic for Designing Cellular Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, vol. 25(5), 639-665, 1987.
- A. Kusiak, "The Generalized Group Technology Concept", *International Journal of Production Research*, vol. 25(4), 561-569, 1987.
- B. Adenso-Díaz, S. Lozano, J. Racerob and F Guerrerob, "Machine cell formation in generalized group technology", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, 227-240, 2001.
- C. Andres and S. Lozano, "A Particle Swarm Optimization Algorithm for Part-machine Grouping", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, 468-474, 2006.
- C. Caux, R. Bruniaux and H. Pierreval, "Cell Formation with Alternative Process Plans and Machine Capacity Constraints: A New Combined Approach" *International Journal of Production Economics*, vol. 64, 279-284, 2000.
- C.S. Kumar and M.P. Chandrasekharan, "Grouping Efficacy: A Quantitive Criterion for Goodness of Block Diagonal forms of Binary Matrices in Group Technology, *International Journal of Production Research*, vol. 28, 233-243, 1990.
- D. N. Sormaz, and S. N. Rajaraman, "Problem Space Search Algorithm for Manufacturing Cell Formation with Alternative Process Plans", *International Journal of Production Research*, vol. 46(2), 345-369, 2008.
- E. Vin, Genetic Algorithm Applied to Generalized Cell Formation Problems, Doktora Tezi, Brüksel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Brüksel, 2010.
- G. K. Adil, D. Rajamani and D. Strong, "Cell Formation Considering Alternate Routeings," *International Journal of Production Research*, vol. 34, 1361-1380, 1996.
- G. Öztürk and Z. K. Öztürk, "A Competitive Neural Network Approach to Manufacturing cell. Formation", *35th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Istanbul, 1549-1554, 2005.
- G. Öztürk, Z. K. Öztürk and A. A. İşlier, "A Comparision of Competitive Neural Network with Other AI Techniques in Manufacturing Cell Formation," *Advances in Natural Computation*, 4221, 575-583, 2006.
- H. M. Selim, R. G. Askin and A. J. Vakharia, "Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for Future Research," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 34(1), 3-20, 1998.
- H. Rezazadeh, M. Ghazanfari, S. J. Sadjadi, M. B. Aryanezhad and A. Makui, "Linear Programming Embedded Particle Swarm Optimization for Solving an Extended Model of Dynamic Virtual Cellular Manufacturing Systems", *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 7, 83-108, 2009.
- J. Blondin, Particle swarm optimization: A Tutorial, 2009.
- J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A Discrete Binary Version of The Particle Swarm Algorithm", *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 4104-4108, 1997.
- J. Kennedy and R. Eberhart, "Partice Swarm Optimization, *IEEE Int'l. Conf. on Neural Networks*, 4, Perth, Australia, 1942-1948, 1995.
- J. R. King and V. Nakornchai "Machine Component Group Formation in Group Technology review and extension", *International Journal Of Pruduction Research*, vol. 20, 117-133, 1982
- K. Spiliopoulos and S. Sofianopoulou, "Manufacturing Cell Design with Alternative Routings in Generalized Group", *International Journal of Production Research*, vol. 45(6), 1355-1367, 2007.

- M. K. Lee, H. S. Luong and K. Abhary, "A Genetic Algorithm Based Cell Design Considering Alternative Routing", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 10(2), 93-107, 1997.
- M.,Anvari, M. S. Mehrabad and F. Barzinpour, "Machine-part Cell Formation Using A Hybrid Particle Swarm Optimization", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, 745-754, 2010.
- M.P. Chandrasekharan and R. Rajagopalan, "An Ideal Seed Non-hierarchical Clustering Algorithm For Cellular Manufacturing", *International Journal of Production Research*, vol. 24, 451-464, 1986.
- N. L. Heyer and U. Wemmerlöv, "Group Technology and Productivity", *Harvard Business Review*, 141-149, 1984.
- O. Duran, N. Rodriguez and L. A. Consalter, "Collaborative Particle Swarm Optimization with A Data Mining Technique for Manufacturing Cell Design", *Expert Systems with Applications*, vol. 37, 1563-1567, 2010.
- R. G. Kasilingam and R. S. Lashkari, "Cell Formation in The Presence of alternate process plans in flexible manufacturing systems", *Production Planning and Control*, vol. 2, 135-141, 1991.
- R. Nagi, G. Harhalakis and J. M. Proth, "Multiple routings and capacity considerations in group technology applications", *International Journal Of Production Research*, vol. 28(12), 2243-2257, 1990.
- S. Chung, T. Wu, and C. Chang, "An efficient tabu search algorithm to the cell formation problem with alternative routings and machine reliability considerations", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 60, 7-15, 2011.
- S. Sofianopoulou, "Manufacturing cells design with alternative process plans and/or replicate machines", *International Journal of Production Research*, vol. 37(3), 707-720, 1999.
- S. Susanto, D. Al-Dabass and A. Bhattacharya, "Optimised Cell Formation Algorithm Considering Sequence of Operations, Alternative Routing and Part-Volume", *Third Asia International Conference on Modelling & Simulation*, 2009.
- T. James, E.C. Browna and J.B. Keeling, "A Hybrid Grouping Genetic Algorithm for The Cell Formation Problem", *Computers & Operations Research*, vol. 34, 2059-2079, 2007.
- T. Saraç and F. Özçelik, "Alternatif Rotaların Varlığında Üretim Hücrelerinin Genetik Algoritma Kullanılarak Oluşturulması," *MMO Endüstri Mühendisliği Dergisi*, Cilt. 17, 22-36, 2009.
- T. Wu, S. Chung and C. Chang, "Hybrid Simulated Annealing Algorithm with Mutation Operator to The Cell Formation Problem with Alternative Process Routings", *Expert Systems with Applications*, vol. 36, 3652-3661, 2009.
- Y. Yin and K. Yasuda, "Manufacturing Cells' Design in Consideration of Various Production Factors", *International Journal of Production Research*, vol. 40(4), 885-905, 2002.
- Y.K. Won and S.H. Kim, "Multiple Criteria Clustering Algorithm for Solving The Group Technology Problem with Multiple Process Routings", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 32, 207-220, 1997.