

Pozitif ve Negatif Bölgeleme Kısıtlı Çift- Taraflı U-tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Yılmaz Delice*¹,

*¹ Kayseri Üniversitesi, Develi Hüseyin Şahin Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü,
KAYSERİ

(Alınış / Received: 09.08.2019, Kabul / Accepted: 30.08.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 02.09.2019)

Anahtar Kelimeler

Çift-taraflı U-tipi Montaj
Hattı Dengeleme,
Pozitif ve Negatif Bölgeleme
Kısıtı,
Parçacık Sürüsü
Optimizasyon Algoritması

Öz: Çift-taraflı bir montaj hattının U şeklinde tasarlanması ile oluşan Çift-taraflı U-tipi montaj hatları her iki montaj hattı yapısının avantajlarını bir araya getirmektedir. Herhangi bir montaj hattında pozitif ve/veya negatif bölgeleme kısıtlarının bulunması o hattı gerçek hayat uygulamalarına daha da yaklaştırıp daha gerçekçi bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla bu çalışmada pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlı Çift-taraflı U-tipi montaj hattı dengeleme problemi (PNBKÇUMHDP) ele alınmış ve bu problemi çözmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen model ve çözüm yaklaşımını daha detaylı açıklayabilmek için örnek bir montaj hattı problemi çözümlenerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Two-sided U-type Assembly Line Balancing Problem with Positive and Negative Zoning Constraints

Keywords

Two-sided U-type Assembly
Line Balancing,
Positive and Negative Zoning
Constraints,
Particle Swarm Optimization
Algorithm

Abstract: The two-sided U-type assembly lines, which are formed by the U-shape of a two-sided assembly line, combine the advantages of both assembly line structures. The presence of positive and / or negative zoning constraints in any assembly line brings that line closer to real-life applications, resulting in a more realistic structure. For this purpose, in this study, the two-sided U-type assembly line balancing problem with positive and negative zoning constraints (TUALBPwPNC) is discussed and a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm based solution approach is developed to solve this problem. In order to explain the proposed model and solution approach in more detail, the results obtained by solving a sample assembly line problem are presented.

1. Giriş

Montaj hatları, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Montaj hatları genellikle pazar talebini karşılamak için yüksek kaliteli ve düşük maliyetli standart homojen ürünler üretmek için tasarlanmıştır. Tipik bir montaj hattı, 'çevrim zamanı' adı verilen sınırlı bir sürede bir operatör tarafından 'görev' adı verilen bir dizi iş elemanının tekrarlı bir biçimde yerine getirildiği birbirine bir taşıma sistemi ile bağlı bir dizi ardışık istasyonu içermektedir [1, 2]. Belirli bir düzende yerleştirilmiş bir dizi istasyona bir dizi görevin belirli temel ve/veya özel kısıtlar altında bir veya daha fazla amacı optimize edecek şekilde atanması problemi, montaj hattı dengeleme (MHD) problemi olarak adlandırılmaktadır. Bu tür sistemlerin yönetiminde ortaya çıkan karar problemleri arasında MHD problemi orta vadeli üretim planlamasında önemli bir yere sahiptir [3]. MHD problemi için bilinen ilk formülasyon Salveson tarafından 1955'te ortaya konmuştur [4,5,6,7].

Tasarım yapısı göz önüne alındığında, montaj hattında üretilen modellerin sayısına göre (tek, çoklu veya karma model), akış tipine göre (U tipi, düz) görev zamanlarının yapısına göre (stokastik, deterministik) ve istasyon yapısına göre (tek-taraflı, çift-taraflı veya çok-insanlı) şeklinde çeşitli sınıflandırmalar yapılabilir [8]. Bu çalışmada, U şeklinde deterministik görev zamanlarının yer aldığı çift-taraflı montaj hattı yapısı kullanılmıştır. Böylece her iki montaj hattının avantajlarının bir araya getirildiği bir yapı ortaya konmaktadır [9, 10, 11].

U-tipi MHD problemini ilk olarak Miltenburg ve Wijngaard [12] sundu ve Urban [13], U-tipi MHD probleminin tam sayılı programlama modelini geliştirdi. U şeklindeki hatlarda hattın giriş ve çıkış istasyonları aynı konumda yer almaktadır. Bu nedenle operatörler U şeklinin ortasına yer alarak görevlerini yürütürler. Bu hatlarda operatörler montaj hattının hem giriş koluna hem de çıkış koluna aynı anda müdahale edebildikleri için 'çapraz istasyon' adı verilen bir istasyon türü ortaya çıkabilmektedir. U-hatları düz montaj hatlarına göre birçok avantaja sahiptir. Gerekli işçi sayısını artırma veya azaltma esnekliği sayesinde talebin dalgalanmalarına karşı korunmak daha kolaydır. Operatörler arasındaki iletişim ve görünürlüğün gelişmiş olması, problem çözme ve değişikliklere uyum sağlama çabalarını desteklemektedir [14].

Geleneksel olarak düz bir montaj hattının sadece bir tarafı kullanılır. Bununla birlikte, birçok endüstride, özellikle otomotiv endüstrisinde, montaj hattının hem sol hem de sağ tarafı eş zamanlı olarak kullanılmaktadır. Bu tür bir üretim hattında, operatör hattın bir tarafında çalışmalıdır, çünkü iş parçası etrafında hareket etmek çok zaman alabilir. Bartholdi [15] ilk olarak 1993 yılında hattın her iki tarafında eş zamanlı olarak çalışan operatörlerin aynı bileşen üzerinde aynı görevleri yerine getirebildikleri çift-taraflı MHD yapısını önermiştir. Çift-taraflı montaj hatlarında birbirine bakan iki karşılıklı istasyon, 'eş istasyon' olarak adlandırılır ve bunlar üretim boyunca birbirine eşlik eder. Çift-taraflı montaj hattında görevlerin bazıları hattın belirli bir tarafında (Sağ tipi görev/ Sol tipi görev) yürütülmesi gerekirken, diğerleri ise hattın herhangi bir tarafında da (H tipi görevler) yürütülebilir.

Literatürde PNBKÇUMHDP konusunda bildiğimiz kadarıyla herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak herhangi bir bölgeleme kısıtı bulunmayan Çift-taraflı U-tipi MHD ile ilgili bazı çalışmalar yer almaktadır. Bunlardan ilki montaj hattının sadece bir tarafının U-şeklinde düzenlenmiş olduğu ve bir çözüm prosedürünün sunulduğu bir MHD modeli Yegül ve diğ. [9] tarafından ortaya konulmuştur. Daha sonra Ağpak ve diğ. [10] ise Çift-taraflı U-tipi MHD problemini çözmek için iki amaçlı bir 0-1 tam sayılı programlama modeli önermiştir. Delice ve diğ. [11], Çift-taraflı U-tipi MHD yapısını detaylı olarak ortaya koyarak bu problemi çözmek için değiştirilmiş bir PSO algoritması geliştirmiştir.

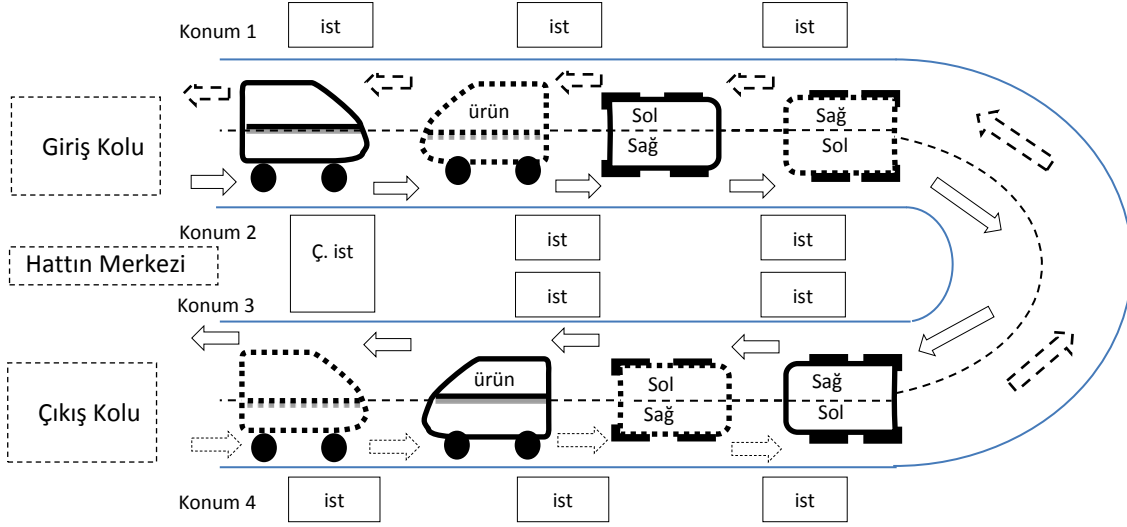
Bu çalışma ile otobüs ve kamyon gibi büyük hacimli ürünlerin üretimini daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilecek ve çözüm getirebilecek bir MHD yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Çünkü büyük hacimli ürünlerin üretimi için daha uygun olan Çift-taraflı montaj hattı yapısının U şeklinde tasarlanması önerilen montaj hattı yapısının U-tipi montaj hatlarının sahip olduğu avantajlara da sahip olmasını sağlamaktadır. Böylece daha kısa, yeniden dengeleme esnekliği yüksek, iletişim ve görünürlüğü daha güçlü, daha düşük malzeme & maliyet gerektiren ve işçi hareketlerinin daha az olduğu bir montaj hattı yapısı ortaya konmuştur. Ayrıca önerilen montaj hattı yapısında pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarının bulunması gerçek hayata daha uygun bir yapı ortaya koymaktadır. Pozitif bölgeleme kısıtı, aynı istasyonda yürütülmesi gereken görevleri ifade ederken negatif bölgeleme kısıtı ise aynı istasyonda bulunmaması gereken görevleri ifade etmektedir. Pozitif bölgeleme kısıtı, genellikle görevlerin üretiminde benzer kaynakların kullanılması ya da benzer teknolojik şartlar bulunması nedeniyle oluşmaktadır. Benzer şekilde negatif bölgeleme kısıtı ise teknolojik ya da güvenlik nedeniyle bazı görevlerin aynı istasyonda yürütülememesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. İşte bu kısıtların modelimize dahil edilmesi, gerçek hayat şartlarını daha iyi temsil eden bir MHD modeli ortaya koymamızı sağlamaktadır.

Pozitif ve Negatif Bölgeleme Kısıtlı Çift-taraflı U-tipi MDH yapısı

Çalışma kapsamında ele alınan PNBKÇUMHDP ile gerçek hayatta var olan üretim sistemlerinin daha doğru modellenmesi amaçlanmaktadır. Çünkü hem önerilen montaj hattı yapısının sahip olduğu avantajlar hem de pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarının varlığı önerilen modeli daha gerçekçi bir hale getirmektedir. Ancak bir çift-taraflı montaj hattının U şeklinde yerleştirilmesi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Sahip olduğu kombinatoriyal (combinatorial) doğa gereği NP-Zor sınıfta olan MHD problemleri problem boyutunun artması nedeniyle kesin çözüm yöntemleri ile çözülmesi imkansız problemler haline gelmektedir [16]. Düz bir montaj hattı bile böyleyken hem iki farklı montaj hattının birleştirilmesi hem de bölgeleme kısıtları önerilen problemi çok daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle önerilen problem için güçlü bir meta-sezgisel çözüm yöntemi olan PSO algoritması kullanılmıştır.

Önerilen PNBKÇUMHDP çözülürken iki farklı çözüm alternatifi söz konusudur. Bu alternatifler üretilecek ürünün U şeklindeki montaj hattının hangi ucundan girdiğine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 1'de de görüldüğü üzere U şeklindeki montaj hattının üstteki kolu giriş kolu alttaki kolu ise çıkış kolu olarak adlandırılmaktadır [17]. Ürünün girdiği kola bağlı olarak belirli görevler montaj hattının ortasındaki işçiler tarafından yürütülebilir diğerleri ise dıştaki işçiler tarafından yürütülebilir olmaktadır. Bu da görevlerin farklı özelliklerde olması nedeniyle farklı çözüm alternatiflerinin ortaya çıkabilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle her iki durum için de söz konusu olan tüm olası çözümler elde edilerek en iyi alternatif ortaya konmaktadır. Ürünün montaj hattına

giriş ve çıkış kolundan girişi durumunda oluşacak her iki alternatif durum Şekil 1’de detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca Çift-taraflı montaj hatlarında görevlerin bazılarının sadece sol ya da sağ tarafta yürütülebilir (sol/sağ tür görev) iken bazılarının herhangi bir tarafta yürütülebilir (H tür görev) olması da birbirinden farklı alternatif durumların oluşmasını etkileyen unsurlardandır.

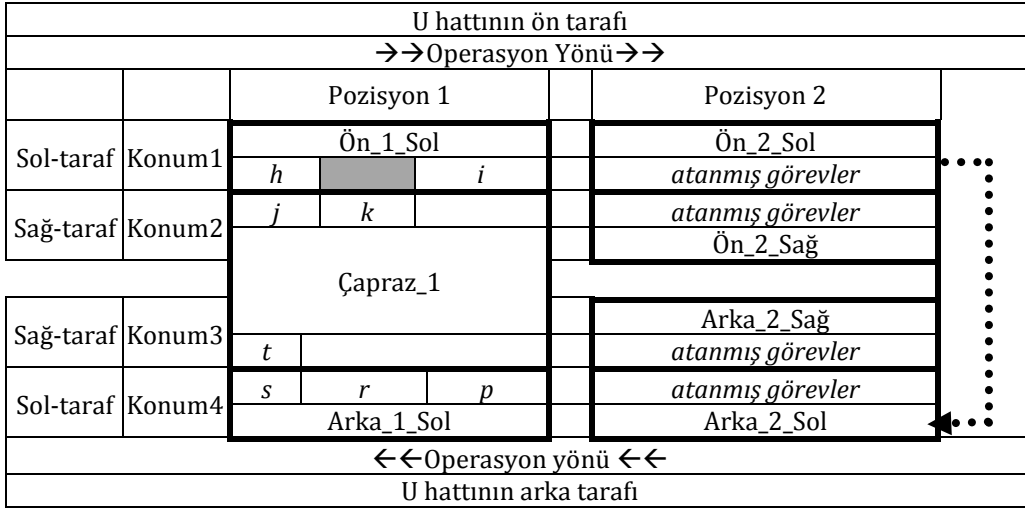


Şekil 7 PNBKÇUMHDP yapısı için 2 farklı alternatif durum [17]

Önerilen bu yeni montaj hattı yapısında her bir montaj işlemi, U şeklinde yerleşmiş dört farklı konumdaki istasyonlarda gerçekleştirilmektedir [11]. Tüm öncülleri tamamlanmış olan görevler giriş kolundaki istasyonlarda (konum 1 ve 2) yürütülmek için seçilirken tüm ardıkları tamamlanmış olan görevler ise çıkış kolundaki istasyonlarda (konum 3 ve 4) yürütülmek için seçilir. Her iki merkezi konumdan da (konum 2 ve 3) bazı görevler aynı işçi tarafından birbirine bakan iki istasyonda (çapraz/geçişli istasyon) yürütülebilir. Şekil1’de de görüldüğü üzere hattın giriş kolunda ve çıkış kolunda yer alan bazı görevler aynı işçi tarafından yapıldığı için konum 2 ve 3’te yer alan iki istasyon birleşerek bir çapraz istasyon (Ç. ist) oluşmuştur. Çapraz istasyonlarda da 1 adet işçi bulunmaktadır ve çevrim zamanı diğer istasyonlar ile aynıdır. U tipi hatlarda, çapraz istasyonlardan dolayı düz hatta kıyasla eşit veya daha az sayıda istasyon oluşmaktadır. Bu durum U-tipi montaj hatlarında ardıkları tamamlanmış görevlerin de hattın baş tarafına atanabilmesi nedeniyle çözüm uzayının genişlemesi ile mümkün olmaktadır. Görevlerin sahip olduğu yön değerlerine (Sol tip, Sağ tip ve H tip), görevlerin öncelik durumlarına ve görevlerin istasyonlara atanma sırasına bağlı olarak, merkezi konumlarda (konum 2 ve 3) 1 adet geçişli istasyon, iki ayrı bağımsız istasyon veya boş istasyon(lar) oluşabilmektedir. Ayrıca, ürünün montaj hattına girdiği kollarına bağlı olarak ürünün sağ veya sol tarafındaki görevler merkezi konumlarda yürütülebilmektedir. Bu durum da daha fazla çözüm olasılığının var olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, ürünün her iki girişten de girdiği alternatif de dikkate alınarak olası tüm çözümler elde etmektedir.

Bu yeni montaj hattı yapısını daha detaylı açıklayabilmek için şekil 2’de yer alan bilgiler verilmiştir [17]. Ortaya konulan montaj hattının operasyon yönü, hattın ön ve arka tarafı bilgisi, pozisyon ve konum bilgileri ile istasyon isimleri ayrıntılı bir biçimde gösterilmiştir. Ayrıca görevlerin herhangi bir istasyondaki öncelik ilişkisine bağlı olarak yerleşimi ve çapraz istasyon yapısı da Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’de, görev numaraları dikdörtgenlerin içerisinde yer alırken (örn: h, i, j, k) gri boyalı dikdörtgen ise o istasyonun boşta kalma süresini göstermektedir. Ön_1_Sol isimli istasyonda yer alan h ve i görevleri arasında bekleme olmasının sebebi k görevinin i görevinin öncülü olması ve k tamamlanmadan i görevinin yürütülememesidir. Burada görevlerin başlangıç zamanları belirlenirken ‘sıraya bağlı tamamlanma zamanı’ kavramı dikkate alınmaktadır. Ayrıca hattın ön tarafındaki j, k görevleri ile hattın arka tarafındaki t görevi aynı işçi tarafından yürütülmektedir. Bu nedenle burada bir çapraz istasyon oluşmuştur.

Şekil 2’deki ürün montaj hattının ön tarafından sisteme giriş yapmıştır. Ayrıca istasyona atanmak için görevler seçilirken pozitif ve negatif bölge kısıtlarına da dikkat edilmektedir. Bir arada olması gereken görevlerin farklı istasyonlara atanması ve bir arada olmaması gereken görevlerin aynı istasyona atanması engellenmektedir. Böylece daha zor ve bir o kadar da gerçekçi bir yaklaşım ortaya konulmuştur.



Şekil 2 PNBKÇUMHDP yapısına ait detaylı görünüm [17]

Bu çalışmada ele alınan PNBKÇUMHDP aşağıdaki varsayımları içermektedir:

- İşçiler, U hattının her iki tarafında da eş zamanlı olarak görev yaparlar.
- Bazı görevlerin hattın bir tarafında yapılması gerekebilir (sol ve sağ tür görev), diğerleri ise hattın her iki tarafında da gerçekleştirilebilir (H tür görev).
- Görev zamanları deterministiktir ve atandığı istasyondan bağımsızdır.
- İşçilerin yürüme süreleri dikkate alınmaz.
- Paralel görevlere ve paralel istasyonlara izin verilmez.
- Yarı mamul stokuna izin verilmez.
- Bitişik iş istasyonları arasındaki malzeme hareket süresi önemsizdir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada önerilen PNBKÇUMHDP için PSO temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. PSO kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin çözümler veren bir meta-sezgisel yaklaşımdır. Kesin çözüm yöntemlerinin bu tür problemlere makul sürelerde cevap verememesi meta-sezgisel çözüm yöntemlerini kullanılabilir hale getirmektedir. Çünkü meta-sezgisel algoritmalar zor problemler için makul sürelerde belirli bir oran dahilinde kabul edilebilir alternatif çözümleri sunmaktadır. Böylece hızlı bir şekilde elde edilen bu alternatif çözümlerden en iyi olan seçilerek uygulamaya konmaktadır.

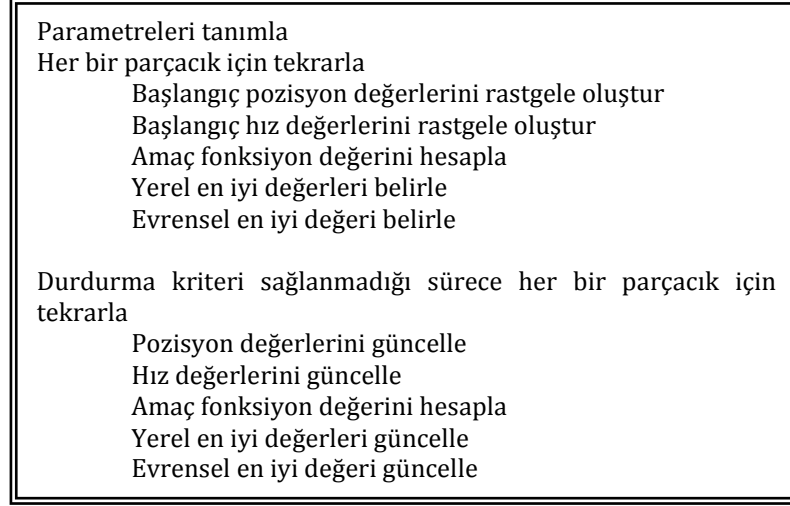
2.1. Önerilen PSO Algoritması

PSO, sürekli optimizasyon problemleri için 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen popülasyon temelli bir stokastik optimizasyon tekniğidir [18]. PSO'nun gelişimi, yiyecek bulmak için kuşların birlikte uçuşması ve balıkların birlikte yiyecek araması gibi sosyal etkileşim ve iletişime dayanmaktadır. PSO'nun ana fikri, sürüyü oluşturan bireyler arasındaki sosyal bilgi paylaşımını sağlamak ve bu bilgiyi sürekli iyileştirmektir.

PSO algoritmasında her bir aday çözüme parçacık denir ve her bir parçacık kendi deneyimleri ve komşu parçacıkların deneyimleriyle sürekli güncellenen bir hız değerini kullanarak çok boyutlu arama alanında hareket etmektedir. Parçacıkların tümü, optimize edilecek amaç fonksiyonu tarafından değerlendirilen bir uygunluk değerine sahiptir. Her tekrarda, her bir parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi çözüm ve bu çözümün amaç fonksiyon değeri hafızada tutulur. Bu değer "Pbest" olarak adlandırılır. Ayrıca, sürü içindeki herhangi bir parçacık tarafından elde edilmiş en iyi çözümü ile bu çözümün amaç fonksiyon değeri de, küresel en iyi "Gbest" olarak bellekte tutulur.

Kennedy ve Eberhart [19] ayrık parçacık sürüsü optimizasyonu (DPSO) olarak bilinen ayrık optimizasyon problemleri için alternatif bir PSO sürümünü de sunmuştur. Daha sonra Shi ve Eberhart [20], Kennedy ve ark. [21] ve Liao ve diğ. [22] PSO ile ilgili detaylı çalışmalar yapmışlardır.

Genel PSO algoritmasının pseudo kodu Şekil 3'te verilmiştir. İlk olarak, kullanılacak parametreler ve sürü parametreleri tanımlanmaktadır. Pozisyon ve hız değerleri rastgele değerlerle oluşturulur. Pozisyon değerleri, *CLO* ve *CLA* olarak adlandırılan aday görev listelerinden görevlerin seçilmesi aşamasında kullanılmaktadır. Bu nedenle pozisyon değerlerinin doğru tespiti algoritma başarısında çok önemli bir süreç konumundadır.



Şekil 3. PSO Algoritması Adımları

D-boyutlu arama (çözüm) alanında PSO'nun parametreleri şu şekilde tanımlanır:

- Pozisyon: D-boyutlu arama uzayında *i*. parçacığın sahip olduğu pozisyon değeri $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD}]$ şeklindedir. Parçacıkta yer alan her bir eleman ilgili görevin sahip olduğu atanma istekliliğini göstermektedir. Bu değer 0 ile 1 arasında rastgele değer ile başlatılmaktadır.
- Hız: D-boyutlu arama uzayında *i*. parçacığın sahip olduğu hız değeri $V_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD}]$ şeklindedir. Hız değerleri $[V_{min}, V_{max}]$ aralığında tutulur.
- Yerel En İyi (P_{best}): P_{best} her bir parçacık tarafından elde edilmiş en iyi çözümü ifade eder ve $P_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD}]$ şeklinde ifade edilir.
- Evrensel En İyi (G_{best}): G_{best} her tüm parçacıklar tarafından elde edilmiş en iyi çözümü ifade eder ve $G = [G_1, G_2, \dots, G_D]$ şeklinde ifade edilir.

Hız vektörünün başlangıç değerleri, $[V_{min}, V_{max}]$ aralığında rastgele değerler ile oluşturulur. Pozisyon vektörü değerleri tanımlandıktan sonra, bu pozisyon değerleri ile görevlerin istasyonlara atanması ile ilgili amaç fonksiyon değerleri hesaplanır. Daha sonra, yerel ve evrensel en iyi çözümler bu amaç fonksiyon değerlerine göre belirlenir. Sonraki adımda, Denklem 1 kullanarak hız vektörü güncellenir [21].

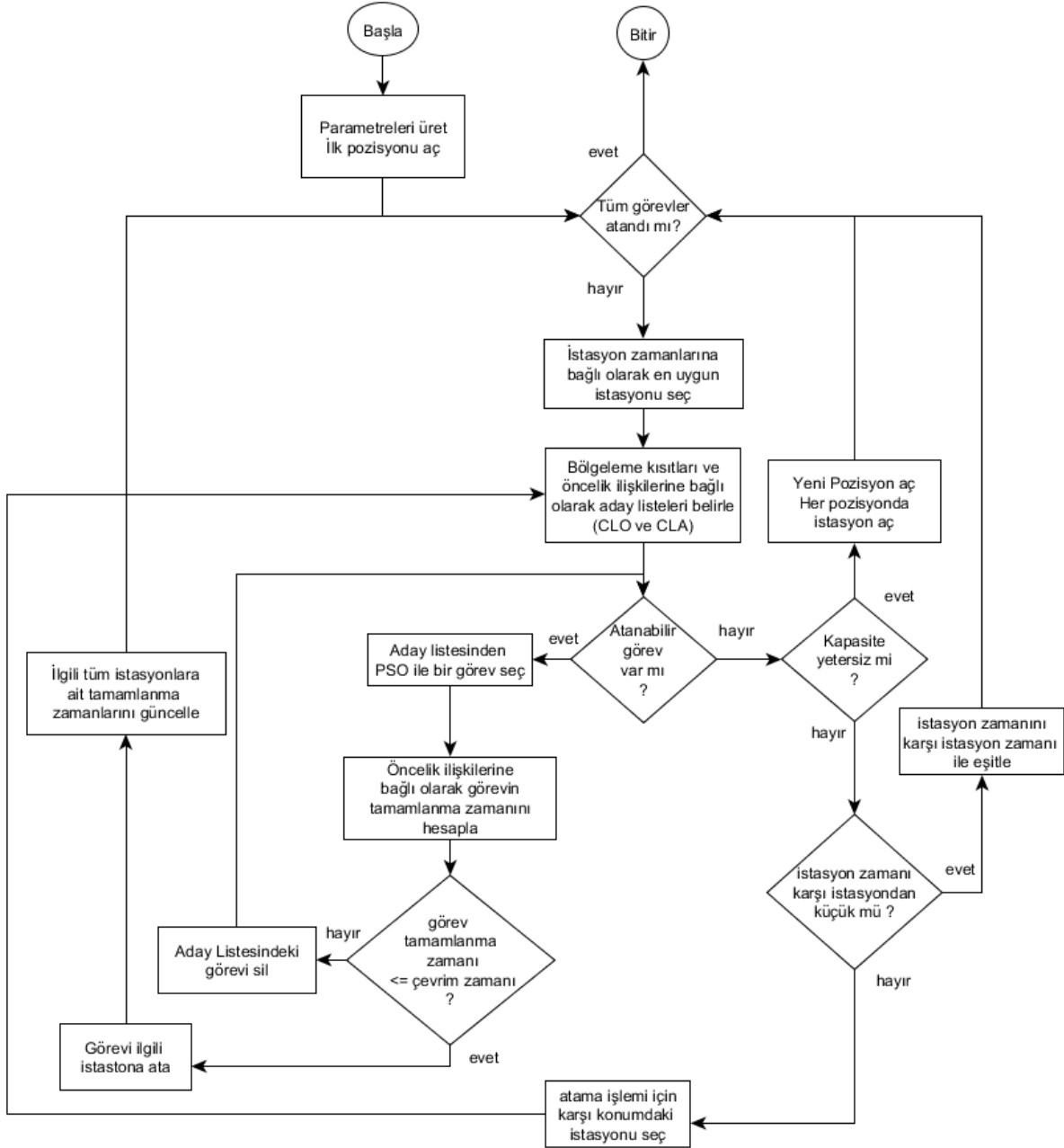
$$V_{id} = (w * V_{id}) + c_1 * r_1 * (P_{id} - X_{id}) + c_2 * r_2 * (G_d - X_{id}) \quad (1)$$

Denklemden yer alan r_1 ve r_2 değerleri 0 ile 1 arasında rastgele değer alan değişkenlerdir. Sırasıyla c_1 bilişsel, c_2 ise sosyal parametre olarak adlandırılır. "atalet ağırlığı" adı verilen w ise sabit bir faktördür ve parçacık hızlarının önceki değerlerinin mevcut değerine olan etkisini belirlemektedir.

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (2)$$

Pozisyon vektörü, Denklem 2' deki gibi mevcut pozisyon değerlerine hız vektör değerlerinin eklenmesiyle güncellenmektedir. Bu yeni pozisyon vektörünü kullanarak elde edilen yeni montaj dengeleri değerlendirilir ve yerel en iyi ve global en iyi çözümleri her adımda güncellenir. Bu işleme sonlandırma koşuluna ulaşılan kadar devam edilir.

Önerilen algoritmanın PSO parametreleri ve değişkenleri (yineleme sayısı, parçacık sayısı, atalet ağırlığı, c_1 , c_2 , V_{min} , V_{max}) ilk adımda tanımlanmaktadır. Önerilen PSO algoritması, rastgele bir sürü çözümü ile başlatılmaktadır. Her bir parçacığa ait amaç fonksiyon değerini yani çözüm kalitesini belirlemek için aşağıdaki akış şemasında gösterilen görev atama şeması adımları uygulanmaktadır:



Şekil.4. Önerilen Algoritmaya Ait Görev Atama Şeması

Önerilen algoritmanın doğru bir şekilde çalışması, görevlere ait temel bilgilerin, öncelik ilişkilerinin ve bölgeleme kısıtlarının doğru bir biçimde yönetilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle tüm bunların geliştirilen algoritmaya daha kolay bir biçimde dahil edilebilmesi için matris yapısından yararlanılmıştır. Bu değerler önceden bilinen sabit bilgiler olduğu için matris yardımıyla programa yüklenmektedir. Görevlere ait görev zamanları, öncelik ilişkileri ve bölgeleme kısıtları önerilen algoritma tarafından kullanılarak alternatifler arasından en uygun montaj hattı yerleşimi çıktı olarak bize sunulmaktadır. Algoritma tarafından kullanılan bu matrisler şu şekildedir:

Görev matrisi ($G_{i,j}$ $i = 1,2,\dots,n$ $j = 1,2,3$) : Problem verisi ile ilgili tüm değerler bu matriste tutulur. Bunlar görev numarası, görev yönü ve görev zamanlarıdır.

Öncelik matrisi ($O_{i,j} \quad i,j = 1,2,\dots,n$): Probleme ait tüm görevler arasındaki öncelik ilişkileri bu matriste tutulmaktadır.

Pozitif bölgeleme matrisi ($P_{i,j} \quad i,j = 1,2,\dots,n$): Probleme ait tüm görevler arasındaki pozitif bölgeleme ilişkileri bu matriste tutulmaktadır. Aynı istasyonda bir arada olması gereken görevler arasındaki değerler 1 diğerleri 0 değerini almaktadır.

Negatif bölgeleme matrisi ($N_{i,j} \quad i,j = 1,2,\dots,n$): Probleme ait tüm görevler arasındaki negatif bölgeleme ilişkileri bu matriste tutulmaktadır. Aynı istasyonda bir arada olmaması gereken görevler arasındaki değerler 1 diğerleri 0 değerini almaktadır.

2.2. Çözüm Süreci

Önerilen algoritmadaki çözüm süreci yeni bir pozisyonun açılmasıyla başlar ($NP = 1$). 1 nolu pozisyonun açılmasıyla bu pozisyonda bulunan ve şekil 2'de de görülebilen dört konumda yer alan istasyonlar da açılmış olur. Bu aşamada tüm istasyonların istasyon zamanları sıfırdır. İstasyon zamanları görevlerin istasyonlara atanmasıyla sürekli olarak güncellenir. Ayrıca istasyon zamanı kavramı görevlerin istasyonlara atanması sürecinde de önemli rol oynamaktadır. Herhangi bir atama yapılmayan istasyonlar boş olarak kalabilmektedir.

Çözüm sürecindeki en önemli faktörlerden birisi de ürünün U şeklindeki montaj hattına hangi koldan giriş yapacağı meselesidir. Bu durum hm (hattın merkezi) değişkeni ile kontrol edilmektedir. Eğer ürün şekil 1'de de görülebileceği gibi U şeklindeki hattın giriş kolundan montaj hattına girdiyse ve ürünün sağ tarafındaki görevler montaj hattının merkezindeki istasyonlara denk geliyorsa hm değişkeninin değeri 1, diğer durumda 0 değerini almaktadır. Bu değişkenin değeri algoritmanın farklı alternatif çözümler elde etmesine neden olacağı için algoritmanın her iki alternatifi de göz önünde bulundurması sağlanmaktadır.

Montaj hattının ilk pozisyonu ve o pozisyondaki istasyonlar açıldıktan sonra öncelik matrisine bağlı olarak tüm uygun, atanabilir görevler belirlenmektedir. Öncelik matrisine göre tüm öncülleri atanmış olan görevler belirlenerek CLO listesinde saklanır. U-tipi montaj hattının bir özelliği olarak öncelik matrisine göre bütün ardıları atanmış olan görevler de montaj hattının arka tarafına (çıkış koluna) atanabilmek için CLA listesinde tutulmaktadır. PSO algoritmasının pozisyon vektörü, her bir görevin sahip olduğu atanma isteklilik değerini saklamaktadır. Tüm aday görevler bu atanma isteklilik değerlerine göre rulet tekerleği yaklaşımına göre değerlendirilir ve herhangi birisi atanmak için seçilir. Böylece hem hızlı bir şekilde iyi değerlere doğru ilerleme sağlanırken hem de yerel minimum noktalara takılmanın da önüne geçilmiş olmaktadır.

2.3. Kullanılan Amaç Fonksiyonu

Önerilen algoritmada birincil amaç belirli bir çevrim süresi (C) içinde toplam pozisyon sayısını (TPS) en aza indirmektir. Algoritmadaki ikincil amaç ise toplam istasyon sayısını ($TİS$) en aza indirmektir. Böylece mümkün olduğunca daha kısa ve daha az sayıda istasyon elde edilebilecektir.

3. Uygulama ve Bulgular

Önerilen model için geliştirilmiş olan PSO temelli algoritmasının etkinliğini değerlendirmek için literatürde yer alan Kim ve diğ. [23] tarafından üretilen ve 12 ile 24 görevden oluşan iki adet test problemi ile Lee ve diğ. [24] tarafından üretilen ve 65 görevden oluşan bir test problemi kullanılmıştır. Problem ile ilgili öncelik ilişkisi, görev zamanları ve görev yönleri gibi temel bilgiler olduğu gibi kullanılmıştır. Probleme ait görevler arasındaki pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları ise çalışma kapsamında oluşturulmuştur.

Önerilen algoritma, Borland Delphi 7 programlama dilinde programlanmıştır ve tüm test problemleri Intel i7-3630QM, 2.4 GHz işlemci ve 16 GB RAM bulunan kişisel bir bilgisayarda test edilmiştir. Test problemi, bölgeleme kısıtlı ve bölgeleme kısıtsız olacak şekilde her bir çevrim süresi için beş kez çözülmüş ve toplam pozisyon sayısı ve toplam istasyon sayısı ile en iyi çözümün CPU zamanı karşılaştırma tablolarında sunulmuştur. PSO için literatürde yaygın olarak kullanılan ve Tablo 1'de verilen parametre değerleri kullanılmış özel bir parametre optimizasyonu yapılmamıştır.

Tablo 1. Parametre listesi.

| Parametre Adı | Parametre Değeri |
|-----------------|------------------|
| Parçacık Sayısı | 100 |
| Adım Sayısı | 100 |
| C_1, C_2 | 0,7 |
| w | 0,8 |

Önerilen algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi için P12 problemine ait görev numarası, görev süresi, görev yönü bilgileri ile öncelik ilişkileri, pozitif bölgeleme kısıtları ile negatif bölgeleme kısıtları sırasıyla aşağıdaki Tablo 2-5’de verilmiştir:

Tablo 2. P12 Problemine ait temel değerler

| Görev No | Görev Yönü | Görev Zamanı |
|----------|------------|--------------|
| 1 | Sol | 2 |
| 2 | Sağ | 3 |
| 3 | H | 2 |
| 4 | Sol | 3 |
| 5 | H | 1 |
| 6 | Sol | 1 |
| 7 | H | 3 |
| 8 | Sağ | 3 |
| 9 | H | 2 |
| 10 | H | 2 |
| 11 | H | 2 |
| 12 | Sağ | 1 |

Tablo 3. P12 problemine ait öncelik ilişkileri matrisi

| Görev No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

Tablo 4. P12 problemine ait pozitif bölgeleme matrisi

| Görev No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

Tablo 5. P12 problemine ait negatif bölgeleme matrisi

| Görev No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

P12 problemi çevrim zamanı=5 olacak şekilde, yukarıdaki Tablo 2-5’te verilen değerler doğrultusunda ve $hm=1$ olacak şekilde (ürün giriş kolundan girmiştir) çalıştırıldığında Şekil 5’teki yerleşim elde edilmiştir (TPS = 2, TİS = 6). Yerleşim incelendiğinde hem öncelik kısıtlarının hem de pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarının sağlandığı görülmektedir. Ancak bu sonucun bölgeleme kısıtları olmadan elde edilmiş olan en iyi çözümden daha kötü olduğu Tablo 6’da verilen değerlerden anlaşılmaktadır. Bölgeleme kısıtları problemi daha zor hale getirmekte ve çözüm uzayını daraltarak alternatif çözüm sayısını azaltmaktadır. Ancak bu tarz kısıtların eklenmesi gerçek hayata daha uygun modeller elde etmenin yollarındandır.

| | | U hattının ön tarafı | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------------------------|------------|-------|---|--------------|-------|----|--|--|--|
| | | 0 | P1 | | 5 | P2 | | 10 | | | |
| Giriş kolu | sol | Görev-Yön | 6-sol | 1-sol | | 5-H | 4-sol | | | | |
| | | <i>başlangıç zamanı</i> | 2 | 3 | | 5 | 6 | | | | |
| | | <i>bitiş zamanı</i> | 3 | 5 | | 6 | 9 | | | | |
| | | İstasyon No | Ön_1_Sol | | | Ön_2_Sol | | | | | |
| | sağ | Görev-Yön | 3-H | 2-sağ | | Boş istasyon | | | | | |
| | | <i>başlangıç zamanı</i> | 0 | 2 | | | | | | | |
| | | <i>bitiş zamanı</i> | 2 | 5 | | | | | | | |
| İstasyon No | | Ön_1_Sağ | | | | | | | | | |
| Çıkış kolu | sağ | Görev-Yön | 12-sağ | 11-H | | 9-H | 8-sağ | | | | |
| | | <i>başlangıç zamanı</i> | 17 | 15 | | 13 | 10 | | | | |
| | | <i>bitiş zamanı</i> | 18 | 17 | | 15 | 13 | | | | |
| | | İstasyon No | Arka_1_Sağ | | | Arka_2_Sağ | | | | | |
| | sol | Görev-Yön | 10-H | 7-H | | Boş istasyon | | | | | |
| | | <i>başlangıç zamanı</i> | 18 | 15 | | | | | | | |
| | | <i>bitiş zamanı</i> | 20 | 18 | | | | | | | |
| | | İstasyon No | Arka_1_Sol | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | 20 | | 15 | | | 10 | | | | |
| | | U hattının arka tarafı | | | | | | | | | |

Şekil 5. P12 problemine ait çözüm

Ek. A' da yer alan bölgeleme kısıtları kullanılarak P12, P24 ve P65 test problemleri önerilen PSO temelli algoritma ile çalıştırılmış ve elde edilen çift-taraflı montaj hattı dengeleme sonuçları Tablo 6'da listelenmiştir. Ayrıca aynı problemler için Delice ve diğ. tarafından Çift-taraflı U-tipi MHD problemleri için önerilen değiştirilmiş-PSO algoritması sonuçları da Tablo 6'da verilmiştir [11]. Böylece önerilen algoritma ile pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları altında elde edilen sonuçların yorumlaması daha doğru bir şekilde yapılabilmektedir.

Elde edilen sonuçlar bölgeleme kısıtlarının çözüm uzayını ciddi şekilde daralttığını bu nedenle bölgeleme kısıtlarının olmadığı durumdaki en iyi çözüm alternatiflerinin çoğunlukla yakalanamadığını göstermiştir. Çözüm alternatifinin daha az olduğu küçük boyutlu problemlerde bile en küçük amaç fonksiyonu değerleri elde edilememiştir. Bu çalışmadaki amaç, pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları altında en düşük pozisyon sayısını ve toplam istasyon sayısını elde ederken aynı zamanda pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarının etkilerini de detaylı bir şekilde ortaya koyabilmektir.

Sonuçlar incelendiğinde P12 probleminde çevrim_zamanı=4 için uygun çözüm elde edilemediği görülmektedir. Bunun nedeni bu çevrim zamanı için pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarını birlikte sağlayan bir çözüm bulunmamasıdır. Küçük boyutlu problemlerde bölgeleme kısıtları altında en iyi çözümün elde edildiği durumlar da görülmektedir. Ancak problem boyutu büyüdükçe bölgeleme kısıtlarının olumsuz etkisinin daha fazla olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır. Ayrıca çevrim zamanının küçülmesi bölgeleme kısıtlarını daha zorlayıcı kısıtlar haline getirmektedir.

Ürünün montaj hattına giriş kolundan ya da çıkış kolundan girmesi durumu da birbirinden farklı çözümler oluşmasına neden olmaktadır. Giriş yönünün farklılaşması sonucunda problemde farklılıklar oluşmakta, bazısında sağ, diğerlerinde ise sol için elde edilen sonuçlar daha iyi olabilmektedir.

Tablo 6. Test Problemlerine ait Sonuçlar

| Problem | Çevrim Zamanı | Alt Limit | Çift-tarafli U-tipi MHD | | | | | | | | | | | |
|---------|---------------|-----------|-------------------------|----|-----|------|----|-----|--------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
| | | | Değiştirilmiş PSO [11] | | | | | | Önerilen Bölgeleme Kısıtlı PSO | | | | | |
| | | | Right | | | Left | | | Right | | | Left | | |
| | | | NP | NS | NP | NP | NS | CPU | TPS | TİS | CPU | TPS | TİS | CPU |
| P12 | 4 | 7 | 2 | 7 | <1 | 3 | 7 | <1 | * | * | | * | * | |
| | 5 | 5 | 2 | 5 | <1 | 3 | 5 | <1 | 3 | 6 | 2 | 2 | 6 | <1 |
| | 6 | 5 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | <1 |
| | 7 | 4 | 1 | 4 | <1 | 2 | 4 | <1 | 2 | 4 | <1 | 2 | 4 | <1 |
| | 8 | 4 | 1 | 4 | <1 | 1 | 4 | <1 | 1 | 4 | <1 | 1 | 4 | <1 |
| P24 | 18 | 8 | 2 | 8 | <1 | 3 | 8 | <1 | 3 | 9 | 5 | 3 | 9 | 1 |
| | 20 | 7 | 2 | 7 | 55 | 4 | 7 | 40 | 3 | 8 | <1 | 3 | 8 | 3 |
| | 24 | 6 | 2 | 6 | <1 | 2 | 6 | 3 | 2 | 6 | 3 | 3 | 7 | <1 |
| | 25 | 6 | 2 | 6 | <1 | 2 | 6 | <1 | 2 | 6 | <1 | 3 | 6 | 3 |
| | 30 | 5 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | <1 |
| | 35 | 4 | 1 | 4 | 5 | 2 | 4 | <1 | 2 | 5 | <1 | 2 | 5 | <1 |
| | 40 | 4 | 1 | 4 | <1 | 1 | 4 | <1 | 1 | 4 | <1 | 2 | 4 | <1 |
| P65 | 326 | 16 | 5 | 17 | 35 | 6 | 17 | 25 | 6 | 19 | 15 | 8 | 19 | 6 |
| | 381 | 14 | 5 | 14 | 15 | 6 | 14 | 24 | 5 | 15 | 23 | 7 | 17 | 3 |
| | 435 | 12 | 6 | 12 | 127 | 6 | 12 | 300 | 5 | 14 | 8 | 5 | 15 | 1 |
| | 490 | 11 | 4 | 11 | 2 | 4 | 11 | 15 | 5 | 13 | 9 | 5 | 14 | 18 |
| | 544 | 10 | 4 | 10 | 1 | 4 | 10 | 3 | 4 | 11 | 17 | 4 | 12 | 4 |

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlı Çift-tarafli U-tipi montaj hattı dengeleme problemi ele alınmış ve bu problemi çözmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile ilgili detaylı açıklama yapılmış ve kritik yönleri ön plana çıkarılmıştır.

Pozitif bölgeleme kısıtları aynı teknolojik gereklilikler nedeniyle aynı istasyonda yürütülmesi gereken görevleri ifade eder. Negatif bölgeleme kısıtları ise güvenlik veya teknolojik imkansızlıklar nedeniyle bir arada yürütülmemesi gereken görevleri ifade etmektedir. Montaj hatlarında görevlerin istasyonlara atanması sırasında görevler arasındaki öncelik ilişkilerine dikkat edilir. Yani herhangi bir görev kendi öncülleri tamamlanmadan yürütülmeye başlanamaz. Bu durum istasyonlardaki görevler arasında boş zamanların oluşmasına neden olmaktadır. Pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları ise normal şartlarda uygun olan bir montaj hattı yerleşiminin uygun olmayan çözüm haline getirmektedir.

Literatürdeki test problemleri ile yapılan çalışma, bu kısıtların birçok iyi çözümü uygun olmayan çözüm haline getirdiğini ve çevrim zamanlarının çoğunda en iyi çözümlere ulaşamadığını göstermiştir. Bu durum P12 problemi ile yapılan görselleştirilmiş örnek üzerinde açıklanmıştır.

Sonuç olarak pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları kullanılarak daha gerçekçi, gerçek hayat uygulamalarına daha yakın bir montaj hattı yapısı elde edilmiştir. Önerilen bu MHD yapısının farklı meta-sezgisel algoritmalarla çalıştırılması geleceğe yönelik iyi bir uygulama olacaktır.

Kaynakça

- [1] Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. 2007. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*. 183, 674–693.
- [2] Li, M., Tang, Q., Zheng, Q., Xia, X., Floudas, C. A. 2017. Rules-based heuristic approach for the U-shaped assembly line balancing problem, *Applied Mathematical Modelling*, 48, 423-439.
- [3] Becker, C., Scholl, A. 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*. 168, 694–715.
- [4] Salveson, M. E. 1955. The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*. 6(6), 18-25.
- [5] Urban, T. L., Chiang, W. C. 2006. An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research*. 168(3), 771-782.
- [6] Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. 2008. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*. 111, 509–528.
- [7] Battaia, O., Dolgui, A. 2013. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*. 142,259–277.
- [8] Sivasankaran, P., Shahabudeen, P. 2014. Literature review of assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (9-12), 1665-1694.
- [9] Yegül, M. F., Ağpak, K., and Yavuz, M. 2010. A new algorithm for U-shaped two-sided assembly line balancing. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 34 (2), 225–241.
- [10] Ağpak, K., Yegül, M.F., Gökçen, H. 2012. Two-sided U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*. 50(18), 5035-5047.
- [11] Delice, Y., Aydoğan, E. K., Özcan, U., İlkay, M. S. 2017. Balancing two-sided U-type assembly lines using modified particle swarm optimization algorithm. *4OR*. 15, 37-66.
- [12] Miltenburg, J., Wijngaard, J. 1994. The U-line balancing problem. *Management Science*. 40(10), 1378–1388.
- [13] Urban, T. L. 1998. Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science*. 44(5), 738–741.
- [14] Miltenburg, J. 1998. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*. 109, 1-23.
- [15] Bartholdi, J.J. 1993. Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research*. 31, 2447–2461.
- [16] Ajenblit D.A., Wainwright R.L. 1998. Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceeding*. Anchorage, Alaska, 96-101.
- [17] Delice, Y., Aydoğan, E. K., Özcan, U. 2016. Stochastic two-sided U-type assembly line balancing: a genetic algorithm approach, *International Journal of Production Research*, 54:11, 3429-3451.

- [18] Kennedy J, Eberhart R. C. 1995. Particle swarm optimization. In IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1942–1948.
- [19] Kennedy, J. and Eberhart, R. C. 1997. A discrete binary version of the particle swarm algorithm, 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation, Orlando, FL, USA, pp. 4104-4108 vol.5. doi: 10.1109/ICSMC.1997.637339.
- [20] Shi Y, Eberhart RC. 1998. A modified particle swarm optimizer. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation USA, 69–73.
- [21] Kennedy, J, Eberhart, R. C., Shi, Y. 2001. Swarm intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufman.
- [22] Liao CJ, Tseng CT, Luarn P. 2007. A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. Computers and Operations Research, 34; 3099–3111.
- [23] Kim YK, Kim Y, Kim Y.J. 2000. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. Production Planning and Control, 11; 44-53.
- [24] Lee TO, Kim Y, Kim YK. 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. Computers and Industrial Engineering, 40; 273-292.

Ekler**Ek A. Problemlere Ait Görevler Arasındaki Bölgeleme Kısıtları**

| P12 | | P24 | | P65 | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Pozitif Bölgeleme kısıtları | Negatif Bölgeleme kısıtları | Pozitif Bölgeleme kısıtları | Negatif Bölgeleme kısıtları | Pozitif Bölgeleme kısıtları | Negatif Bölgeleme kısıtları |
| 2-3 | 1-3 | 5-6 | 1-5 | 1-2 | 7-8 |
| 4-5 | 6-7 | 9-13 | 3-6 | 9-12 | 22-24 |
| 8-9 | 10-12 | 15-20 | 8-18 | 32-33 | 33-34 |
| | | 17-21 | 19-24 | 40-54 | 37-39 |
| | | | | 52-53 | 63-64 |