

KARIŞIK MODELLİ U-TİPİ MONTAJ HATLARINDA HAT DENGELEME VE MODEL SIRALAMA PROBLEMLERİ İÇİN YENİ BİR SEZGİSEL YAKLAŞIM

Uğur ÖZCAN ve Ahmet PEKER

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, 42075, Konya.

uozcans@selcuk.edu.tr, apeker@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 16.02.2006; Kabul/Accepted: 27.12.2006)

ÖZET

Benzer ürünlerin veya bir ürünün farklı modellerinin aynı üretim hattı boyunca üretilmesine karışık modellenli üretim adı verilmektedir. Müşteri istek ve ihtiyaçlarına zamanında cevap verebilmek amacıyla, tam zamanında üretim sisteminde kullanılan U-tipi montaj hatlarında karışık modellenli üretim gerçekleştirilmektedir. Karışık modellenli U-tipi montaj hattının (KMUM) etkinliği, karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme (KMUM-D) problemine ve karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında model sıralama (KMUM-S) problemine bulunan çözümlere bağlıdır. Bu çalışmada, ihtiyaç duyulacak istasyon sayısını en küçükleme amaçlanarak karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama (KMUM-D/S) problemlerinin eşzamanlı çözümü için tabu araması algoritması tabanlı yeni bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Önerilen sezgisel yaklaşım literatürde yer alan karma tamsayı programlama modeli (KTPM) çözümleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları önerilen sezgisel yaklaşımın etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: U tipi montaj hatları, karışık modellenli üretim, tabu araması algoritması, hat dengeleme, model sıralama.

A NEW HEURISTIC APPROACH FOR LINE BALANCING AND MODEL SEQUENCING PROBLEMS OF MIXED MODEL U SHAPED ASSEMBLY LINES

ABSTRACT

Production of similar products or different models of same product on the same assembly line is called mixed model production. Mixed model production is performed on U shaped assembly lines that utilized in Just in Time production system to meet the customer requirements. Effectiveness of mixed model U shaped assembly lines (MMUL) depends on the solutions to line balancing of mixed model U shaped assembly lines (MMUL-B) problem and model sequencing of mixed model U shaped assembly lines (MMUL-S) problem. In this paper, a new heuristic approach based on tabu search algorithm is proposed for simultaneously solving line balancing and model sequencing of mixed model U shaped assembly lines (MMUL-B/S). The objective of the heuristic approach is to minimize the number of workstations utilized in a mixed model U shaped assembly line. The proposed heuristic approach is compared to mixed integer programming model (MIPM) in the literature. The experimental results demonstrate that the proposed heuristic approach obtains courageous results.

Keywords: U shaped assembly lines, mixed model production, tabu search algorithm, line balancing, model sequencing.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rekabetin en önemli esaslarından biri, ürünleri hızlı bir şekilde üreterek müşterilere en kısa zamanda ulaştırmaktır. Günümüzde tam zamanında üretim felsefesini benimseyen işletmelerin sürekli değişen müşteri istek ve ihtiyaçlarına cevap verebilmek, rekabet ortamında ayakta kalabilmek ve varlıklarını sürdürmek istemeleri sonucunda tek çeşit ürün üretiminin gerçekleştirildiği montaj hatları üzerinde, U-tipi montaj hatlarının getirdiği avantajlar da kullanılarak aynı anda birden fazla ürün üretimine geçilmiştir. Benzer ürünlerin veya aynı ürünün farklı modellerinin üretiminin yapıldığı U-tipi montaj hatları KMUM olarak adlandırılmaktadır. KMUM’da, görevlerin bazı kısıtlar altında istasyonlara atanmasına KMUM-D, üretilecek ürünlerin hangi sıra ile U-tipi montaj hattına gireceğinin belirlenmesine ise KMUM-S adı verilmektedir. KMUM’da bu iki problemin birbirinden bağımsız olarak düşünülmemesi ve birlikte eşzamanlı olarak çözülmesi daha etkin sonuçların elde edilmesini sağlayabilecektir. KMUM-D ve KMUM-S problemlerinin eşzamanlı olarak ele alınması sonucunda ortaya çıkan problem KMUM-D/S problemi olarak adlandırılmaktadır [1]. KMUM-D ve KMUM-S problemleri diğer montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemleri gibi NP-Zor problemler grubundadır ve bu iki problem eşzamanlı çözülmek istenildiğinde problem daha zorlaşmaktadır [2], [3]. KMUM-D/S problemi çözümlerinin etkin metotlar kullanılarak kısa sürede elde edilmesi, U-tipi montaj hattı dengesini ve ürün sırasını sürekli değiştirmek zorunda kalan üreticiler için büyük önem taşımaktadır.

Montaj hatları, birbirleriyle ardışık şekilde yerleştirilmiş istasyonlardan oluşan düz montaj hatları ve istasyonların “U” şeklinde yerleştirilerek karşıya geçişli istasyonların oluşturulduğu U tipi montaj hatları olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmaktadır. Düz montaj hatları ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Baybars [12], Ghosh ve Gagnon [13] ve Erel ve Sarin [14]’in çalışmalarında düz montaj hatları ile ilgili ayrıntılı literatür araştırması yer almaktadır. Miltenburg ve Wijngaard [15]’in çalışması U tipi montaj hatları ile ilgili yapılan ilk çalışmadır. Tek modelli üretimin gerçekleştirildiği U tipi montaj hattı dengeleme problemi ile ilgili günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır ([16], [17], [18], [19], [20]).

Literatürde KMUM ile ilgili oldukça az sayıda çalışma yer almaktadır. Sparling ve Miltenburg [4], KMUM-D probleminin çözümü için dört aşamalı bir sezgisel metot sunmuştur. Kim vd. [1], Miltenburg [2] ve Kim vd. [5], KMUM-D/S probleminin çözümü için genetik algoritma tabanlı yaklaşımlar önermişlerdir. Kara [3], KMUM-D probleminin çözümü için geliştirilen ilk optimal yöntem olma özelliği taşıyan bir KTPM sunmuştur. Kara vd. [6], KMUM-D/S

problemi için tavlama benzetimi tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Kara vd. [7], KMUM-D/S probleminin çözümünde birbirleri ile çelişen üç farklı hedefin aynı anda en iyilenmesini amaçlayan çok amaçlı bir sezgisel metot sunmuşlardır.

Bu çalışmada, KMUM-D/S probleminin çözümü için KMUM’da ihtiyaç duyulacak istasyon sayısını en küçükleme amaçlayan ve tabu araması algoritması temeline dayanan yeni bir sezgisel yaklaşım (TS_p) önerilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde KMUM-D, KMUM-S ve KMUM-D/S problemlerinin tanımlanması yer almaktadır. KMUM-D/S problemin çözümü için önerilen TS_p Üçüncü Bölümde sunulmuştur. Dördüncü Bölümde önerilen sezgisel yaklaşım ile bir örnek problem çözümü yapılmıştır. Beşinci Bölümde TS_p ile Kara [3]’nın sunduğu KTPM’ye ilişkin karşılaştırmalı bir analiz yer almaktadır. Altıncı Bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2. KMUM’DA HAT DENGELEME VE MODEL SIRALAMA (LINE BALANCING AND MODEL SEQUENCING OF MMUL)

Montaj hatları, üretimi yapılan iş parçalarının bir istasyondan diğerine hareket etmesiyle meydana gelen sistemlerdir. İş parçası üzerinde yapılması gereken görevlerin istasyonlara ataması yapılarak, istasyonlardaki her bir işçinin iş parçaları üzerinde daima aynı işlemleri yapması sağlanır. Böylece üretim ortamındaki zaman ve iş gücü kaybı ortadan kaldırılmış veya en aza indirilmiş olur. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak istenen bir performans ölçütünü en iyileyecek şekilde görevlerin istasyonlara atanmasına montaj hattı dengeleme adı verilir. Bu performans ölçütleri genellikle istasyon sayısının veya çevrim süresinin en küçüklenmesidir.

KMUM-D problemi; “U” şeklinde yerleştirilmiş montaj hattı üzerindeki istasyonlara, montaj işlemi gerçekleştirilen benzer ürünler veya aynı ürünün farklı modelleri için tamamlanma zamanları farklı olabilen görevlerin bazı kısıtlar altında belirli bir performans ölçütü en iyilenecek şekilde atanması problemidir. Bu çalışma kapsamına giren performans ölçütü, KMUM’da ihtiyaç duyulacak istasyon sayısının en küçüklenmesini sağlamaktadır. KMUM-D problemine ilişkin temel kısıtlar aşağıda verilmiştir:

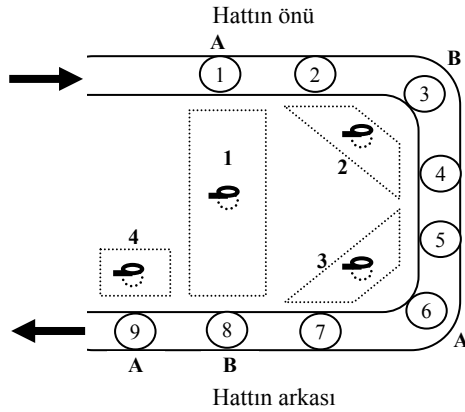
Atama Kısıtı: Her bir görev mutlaka ve sadece bir istasyona atanabilir.

Öncelik İlişkileri Kısıtı: Bir görevin bir istasyona atanabilmesi için o görevin bütün öncüllerinin veya bütün ardıllarının daha önce oluşturulan istasyonlara veya üzerinde atama yapılmakta olan istasyona atanmış olması gerekmektedir.

Çevrim Zamanı Kısıtı: Herhangi bir istasyonun (j) herhangi bir çevrimdeki (r) iş yükü (W_{jr}) çevrim zamanını (C) aşamaz.

KMUM-S problemi; KMUM'da üretilen benzer ürünlerin veya aynı ürünün değişik modellerinin hangi model sırası (MS) ile üretilceklerinin belirlenmesi ile ilgilidir. KMUM-S probleminin çözümünde farklı ürünlere ait talep miktarlarının tamamını ifade eden tam parça kümesi (TPK) veya TPK'nın kendi elemanlarının ortak bölenlerinin en büyüğüne bölünmesi ile elde edilen minimum parça kümesi (MPK) kısıtının sağlanması gerekir. Örneğin; A, B ve C gibi üç farklı ürünün üretileceği bir montaj hattında, bu ürünlere ait talepler sırası ile; 10, 20 ve 30 ise, TPK {10,20,30} ve MPK {1,2,3} şeklinde ifade edilir. Bu durumda, model sıra uzunluğu (MSU); MPK'daki elemanların toplamına eşittir. Örnek için MSU değeri; 1+2+3=6 şeklinde hesaplanır.

Şekil 1'de iki farklı modelin AB sırasını izleyerek montaj işlemlerinin gerçekleştirildiği dokuz görevli örnek bir KMUM yer almaktadır. Karşıya geçişli istasyonda (İstasyon 1) herhangi bir çevrimde U-tipi montaj hattının hem önünde hem de arkasında aynı model bulunabileceği gibi farklı modellerde bulunabilir. Klasik istasyonlarda (İstasyon 2, 3 ve 4) ise herhangi bir çevrimde sadece bir çeşit model üretilmektedir. Montaj hattı dengeleme sırasında karşıya geçişli istasyonlarda her çevrimde U-tipi montaj hattının önünde ve arkasında bulunacak model karışımlarını bilmek önemlidir. Çünkü birbirinden farklı model görev süreleri toplamı çevrim zamanını aşamaz. Tablo 1, yukarıda verilen örnek KMUM ve karşıya geçişli istasyonlar için her çevrimde ortaya çıkacak olan model karışımlarını göstermektedir.



Şekil 1. Örnek KMUM (MMUL Example)

Tablo 1. Örnek KMUM model karışımları (Model mixes for the MMUL example)

Çevrim	İstasyon							
	1		2		3		4	
	α_j^r	β_j^r	α_j^r	β_j^r	α_j^r	β_j^r	α_j^r	β_j^r
1	B	A	A	-	-	B	-	B
2	A	B	B	-	-	A	-	A

G görev kümesi ($g = 1, 2, \dots, G$), M model kümesi ($m = 1, 2, \dots, M$) ve $\forall g \in G$ için ve $\forall m \in M$ için, g görevinin m modeli için görev zamanı (t_{gm}) olmak üzere KMUM'da, belirli bir montaj hattı dengesi ve model sırası için r çevriminde j istasyonunda oluşan iş yükü toplamı (W_{jr}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$W_{jr} = \sum_{g \in SF_j} t_{g\alpha_j^r} + \sum_{g \in SB_j} t_{g\beta_j^r} \quad (1)$$

($j = 1, 2, \dots, K$), ($r = 1, 2, \dots, MSU$)

Herhangi bir r çevriminde j istasyonunun iş yükü toplamı, çevrim zamanı (C)'ni aşamaz. Bu durumda, çevrim zamanı kısıtı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$W_{jr} \leq C \quad (2)$$

($j = 1, 2, \dots, K$), ($r = 1, 2, \dots, MSU$)

Burada:

K : KMUM'daki istasyon sayısı,

SF_j : j istasyonunda U-tipi montaj hattının önüne atanan görevler kümesi,

SB_j : j istasyonunda U-tipi montaj hattının arkasına atanan görevler kümesi,

α_j^r : j istasyonunda r çevriminde U-tipi montaj hattının önünde işlem gören model,

β_j^r : j istasyonunda r çevriminde U-tipi montaj hattının arkasında işlem gören model.

KMUM-D/S probleminin, KMUM-D ve KMUM-S problemlerinin eşzamanlı ele alınması ile ortaya çıkması nedeniyle, KMUM-S probleminin çözümünde dikkate alınacak performans ölçütünün KMUM-D/S problemine yönelik olması gerekmektedir. Yani; elde edilecek montaj hattı dengesi ve model sırası, KMUM'da ihtiyaç duyulacak istasyon sayısını en küçükleyecek şekilde olmalıdır.

3. KMUM-D/S PROBLEMİ İÇİN TABU ARAMASI YAKLAŞIMI (TABU SEARCH APPROACH TO MMUL-B/S PROBLEM)

Tabu kelimesi, Tonga adasındaki Aborjinler tarafından kutsanmış sayılan ve dokunulması yasak olan nesnelere ifade etmek için kullanılan bir kelimedir. Toplumsal açıdan ise, "koruyucu yasaklar" olarak açıklanabilir. Tabu araması algoritmasının tabuları, tercih edilebilecek alternatif çözümler var olduğu zaman bu alternatif çözümler oluşmadan önce elde edilen sonuçların reddedilmeleridir [8]. Tabu araması algoritması, kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin çözümünde yerel optimum noktadan kaçınmak için kullanılan bir meta sezgisel metottur. İlk olarak 1986 yılında Fred Glover tarafından yeni bir çözüm yaklaşımı olarak ortaya atılmıştır. Tabu araması algoritması kullanılarak bir çok kombinatoriyel optimizasyon problemi için etkin sonuçlar elde edilmiştir [9].

Tabu araması algoritması iterasyona dayanan bir teknik olup; X problem çözümleri uzayında, bir s çözümünden, s 'in $N(s)$ komşuluğu olan başka bir s' çözümüne belirli bir hareket ile geçerek arama yapmaktadır. Elde edilen yeni s' çözümünden tekrar s çözümüne dönmeyi engellemek için yani yerel optimum noktasından kaçınmak için kısa ve uzun süreli hafıza yapısı ile bazı zeki uygulamaları kullanmaktadır. Bu hafıza yapılarına tabu listesi adı verilir. Böylece belirli bir amaç kriteri, $f(s)$, çerçevesinde çözüm kalitesi artmakta ve etkin sonuçlar elde edilebilmektedir [9]. Bazı durumlarda yapılan bir hareket ile elde edilen sonuç, o ana kadar elde edilen en iyi sonuç ise, hareket tabu listesinde olsa bile kabul edilir, buna aspirasyon kriteri adı verilir. Bir minimizasyon problemi için tabu araması algoritması en basit haliyle aşağıdaki gibidir [9];

X çözüm uzayından bir s başlangıç çözümü oluştur

$$s^{en\ iyi} = s$$

$$t = 0$$

Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar aşağıdaki prosedürü tekrarla

$$t = t + 1$$

s 'in bütün $N(s, t)$ komşuluklarından $V^{en\ iyi}$ çözüm uzayını oluştur

$V^{en\ iyi}$ 'deki en iyi s' çözümünü seç

$$s = s'$$

eğer $f(s') < f(s^{en\ iyi})$ ise $s^{en\ iyi} = s'$

Bu çalışmada, KMUM-D/S problemi için önerilen TS_p ile ilgili aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Aynı U-tipi montaj hattı üzerinde benzer üretim karakteristiklerini gösteren, aynı ürünün farklı modelleri veya farklı ürünler üretilmektedir.
- Modellerin üretim miktarları MPK ile ifade edilmektedir.
- Her bir model için öncelik ilişkileri bilinmektedir. Hesaplamalarda Macaskill [10]'in önerdiği birleştirilmiş öncelik diyagramı kullanılmıştır.
- Görev tamamlanma zamanları deterministik ve iş merkezlerine atamalardan bağımsızdır.
- Farklı modellerin ortak görevleri olabilir. Bir görevin tamamlanma zamanı, modelden modele farklılık gösterebilir.
- İşçilerin yürüme zamanları ihmal edilmiştir.
- Paralel istasyonlara ve ara stoklara izin verilmemiştir.

TS_p 'in adımları aşağıdaki gibidir;

Adım 1. Parametreleri gir; TLD (montaj hattı dengeleme için tabu listesi boyutu), TLS (model sıralama için tabu listesi boyutu) ve T (iterasyon sayısı).

Adım 2. Başlangıç çözümünü oluştur. S_0 (başlangıç model sırası), D_0 (başlangıç montaj hattı dengesi), $f(0)$ (başlangıç çözümün maliyeti) hesapla.

Adım 3. S_c (mevcut model sırası) = S_0 ; S_b (en iyi model sırası) = S_0 ; D_c (mevcut montaj hattı dengesi) = D_0 ; D_b (en iyi montaj hattı dengesi) = D_0 ; $f(b)$ (en iyi çözüm maliyeti) = $f(0)$; $t = 1$.

Adım 4. $f(c)$ (mevcut çözümün maliyeti) = B , B : büyük bir sayı; p u.d. (0,1); $p < P$ (montaj hattı dengeleme olasılığı) ise **Adım 5'**e (montaj hattı dengeleme için) git değilse **Adım 16'**ya (model sıralama için) git.

Montaj hattı dengeleme:

Adım 5. D_c 'nin bütün $N(D_c)$ komşulukları için $DAHL$ (montaj hattı dengeleme için aday hareket listesi) oluştur.

Adım 6. D_c 'nin bir $N(D_c)$ komşuluğu olan D_n 'i bir dh (aday hareket) ile oluştur ve $f(n)$ maliyetini hesapla, dh hareketini $DAHL$ 'den çıkar ($DAHL = DAHL - \{dh\}$).

Adım 7. $f(c) > f(n)$ (komşuluk çözümün maliyeti) ise **Adım 8'**e değilse, **Adım 11'**e git.

Adım 8. dh hareketi tabu listesinde ($dh \in TLD$) ise **Adım 9'a**, değilse **Adım 10'a** git.

Adım 9. Aspirasyon kriteri sağlanıyor ise **Adım 10'a**, değilse **Adım 11'e** git.

Adım 10. $D_c = D_n$; $f(c) = f(n)$.

Adım 11. $DAHL$ 'deki hareketlerin tamamı yapılmış ise **Adım 12'**ye git, değilse **Adım 6'**ya git.

Adım 12. $f(b) > f(c)$ ise **Adım 13'e** git, değilse **Adım 14'e** git.

Adım 13. $D_b = D_c$; $f(b) = f(c)$.

Adım 14. $t = T$ ise **Adım 27'**ye git, değilse **Adım 15'e** git.

Adım 15. TLD güncelle, $t = t + 1$, **Adım 4'e** git.

Model sıralama:

Adım 16. S_c 'nin bütün $N(S_c)$ komşulukları için AHL (model sıralama için aday hareket listesi) oluştur.

Adım 17. S_c 'nin bir $N(S_c)$ komşuluğu olan S_n 'i bir h (aday hareket) ile oluştur ve $f(n)$ maliyetini hesapla, h hareketini AHL 'den çıkar ($AHL = AHL - \{h\}$).

Adım 18. $f(c) > f(n)$ (komşuluk çözümün maliyeti) ise **Adım 19'a** değilse, **Adım 22'**ye git.

Adım 19. h hareketi tabu listesinde ($h \in TLS$) ise **Adım 20'**ye, değilse **Adım 21'e** git.

Adım 20. Aspirasyon kriteri sağlanıyor ise *Adım 21*'e, değilse *Adım 22*'ye git.

Adım 21. $S_c = S_n; f(c) = f(n)$.

Adım 22. *AHL*'deki hareketlerin tamamı yapılmış ise *Adım 23*'e git, değilse *Adım 17*'ya git.

Adım 23. $f(b) > f(c)$ ise *Adım 24*'e git, değilse *Adım 25*'e git.

Adım 24. $S_b = S_c; f(b) = f(c)$.

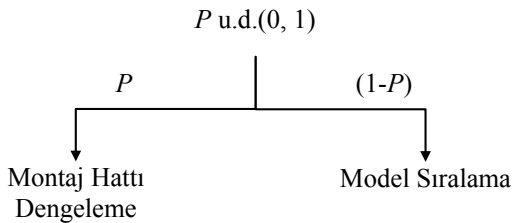
Adım 25. $t = T$ ise *Adım 27*'ye git, değilse *Adım 26*'ya git.

Adım 26. *TLS* güncelle, $t = t + 1$, *Adım 4*'e git.

Adım 27. Dur.

Başlangıç çözümü: Başlangıç çözümü, geliştirilen bir sezgisel metot ile veya rasgele olarak belirlenebilir. Bu çalışmada başlangıç montaj hattı dengesi çözümü için Özcan [11]'in sunduğu sezgisel metot kullanılmıştır. Başlangıç montaj hattı dengesi çözümü için kullanılan sezgisel metot, iki aşamadan oluşan bir yapıya sahiptir. İlk aşamada sadece öncelik ilişkileri kısıtı dikkate alınarak belirli bir öncelik kuralına göre görev atama sırası elde edilmektedir, ikinci aşamada ise çevrim zamanı kısıtı ve atama kısıtı altında elde edilen görev atama sırası kullanılarak bir başlangıç montaj hattı dengesi çözümü oluşturulmaktadır. En düşük ağırlıklı ortalama işlem zamanına sahip görevin en önce atanması öncelik kuralı kullanılmaktadır. Başlangıç model sırası MPK kısıtı sağlanacak şekilde rasgele oluşturulabilir veya belirli bir model sırası kullanılabilir. Başlangıç çözümü akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

Komşuluk geliştirme: KMUM-D/S için Kara vd. [6] ve [7]'nin sundukları komşuluk geliştirme metodu uyarlanmıştır. P olasılık ile oluşturulacak yeni montaj hattı dengesi için model sırası sabit iken, $(1-P)$ olasılık ile oluşturulacak yeni model sırasında algoritmanın özel yapısından dolayı montaj hattı dengesi de değişmektedir. Şekil 3 komşuluk geliştirme yapısını göstermektedir.



Şekil 3. Komşuluk geliştirme (Neighbourhood generation)

Şekil 3'de verilen komşuluk geliştirme metodu, KMUM'da eşzamanlı olarak montaj hattı dengeleme ve model sıralama problemleri için çözüm imkanı sağlamaktadır. Permutasyon problemlerinde komşuluk birçok yoldan oluşturulabilir. En fazla kullanılan ve bu çalışmada da kullanılan komşuluk oluşturma yöntemleri şöyledir;

- Araya ekleme: Bir s çözümünde j . pozisyondaki elemanın i . pozisyondaki elemanın önüne eklenmesi ile s' çözümünün elde edilmesidir.

$$s = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

$$s' = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_j, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_n) \quad i \neq j$$

- Yer değiştirme: Bir s çözümünde j . pozisyondaki elemanın i . pozisyondaki eleman ile yer değiştirmesi sonucunda s' çözümünün elde edilmesidir.

$$s = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

$$s' = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad i \neq j$$

Komşuluk yapısı: Bir sonraki adıma gelmeden önce seçilen bir hareketin komşuluğunun hangi çözüm uzayını kapsayacağını belirlemektedir.

- Tam komşuluk: Bütün olası hareketleri kapsamaktadır. Bir hareket seçilmeden önce oldukça uzun bir hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Örneğin yer değiştirme yöntemi ile dört boyutlu bir permutasyonun tam komşuluk metoduna göre elde edilen çözümleri şöyledir;

$$s = (a, b, c, d)$$

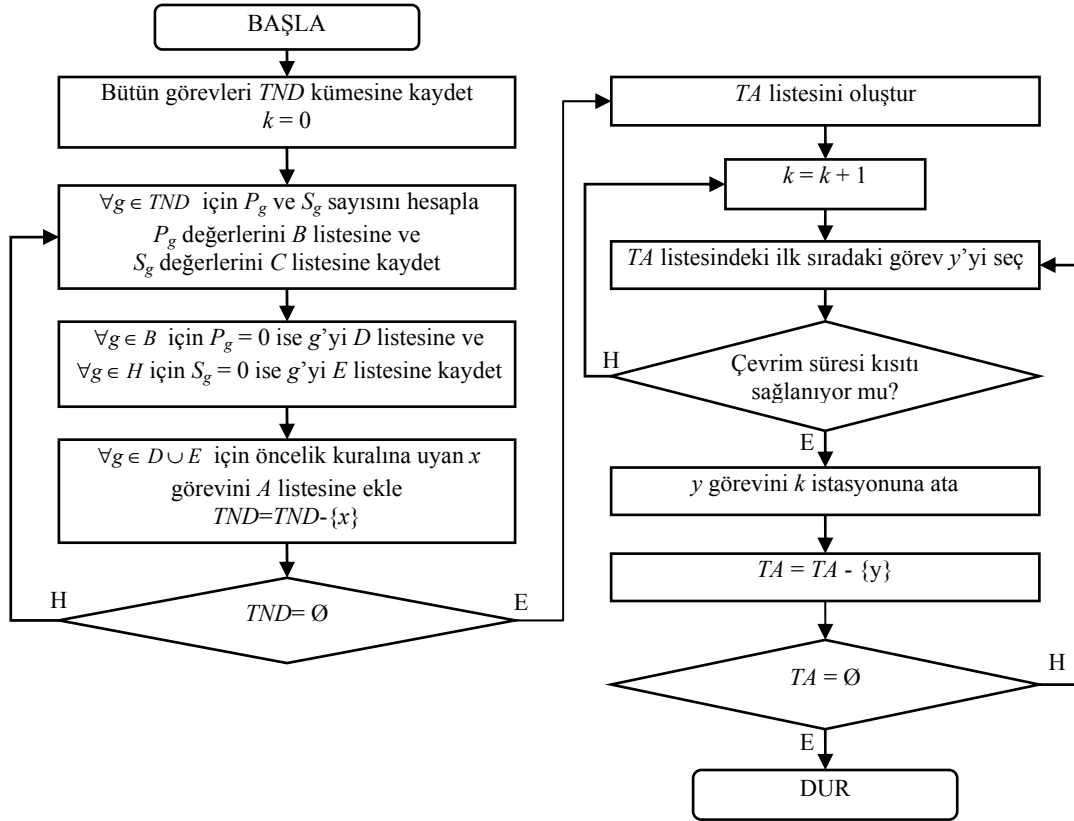
$$s'_1 = (b, a, c, d); s'_2 = (c, b, a, d); s'_3 = (d, b, c, a);$$

$$s'_4 = (a, c, b, d); s'_5 = (a, d, c, b); s'_6 = (a, b, d, c)$$

Tabu listesi: Komşuluklar arasından en iyi sonucu veren hareketin hafızaya alınarak tekrar o çözüme geri dönülmesini engellemek, başka bir ifade ile yerel optimum noktasından kaçınmak amacıyla kullanılır. Bir hareket tabu listesine girdikten sonra belirli bir süre bu hareket yapılamaz ve listeye eklenen her yeni hareket olduğunda ilk giren ilk çıkar kuralına göre tabu listesindeki son eleman çıkarılarak yerine yenisi eklenir. Bu çalışmada montaj hattı dengeleme ve model sıralama için farklı tabu listeleri kullanılmıştır.

Durdurma kriteri: Çözüm süresini ve çözüm kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısına ulaşılması kullanılmıştır.

TS_P 'nin çözüm kalitesi üzerinde tabu araması algoritması parametreleri ve faktörleri etkili olabilmektedir. Çözüm kalitesini etkileyen tabu araması algoritması parametreleri ve faktörlerini belirlemek amacıyla farklı problem faktörleri kullanılarak test deneyleri yapılmıştır. Yapılan test deneyleri sonucunda TS_P 'in çözüm kalitesi üzerinde



P_g : g . görevin hemen öncülleri kümesi
 S_g : g . görevin hemen ardılları kümesi
 TND : atanmamış görevler kümesi
 A : belirlenen öncelik kuralı ile elde edilen atama sırası
 TA : belirlenen öncelik kuralı ile elde edilen atama sırasının tersten sırası
 B : her bir görevin öncül sayısı listesi

H : her bir görevin ardıl sayısı listesi
 D : öncülü olmayan görevlerin listesi
 E : ardılı olmayan görevlerin listesi
 k : istasyon sayısı sayacı
 $t_g = \left(\sum_{m=1}^M t_{gm} \right) / M$: g . görevin ağırlıklı ortalama işlem zamanı

Şekil 2. Başlangıç çözümü akış şeması (Flow chart of initial solution)

etkili olan tabu araması algoritması parametre ve faktör değerleri Tablo 2'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. TS_P 'ın çözüm kalitesi üzerinde etkili parametre ve faktörler (Effective parameters and factors for TS_P solution quality)

Parametreler ve Faktörler	Parametre ve Faktör Değerleri	
	Montaj Hattı Dengeleme	Model Sıralama
Komşuluk Geliştirme Yöntemi	Yer değiştirme	Araya ekleme
Komşuluk Yapısı	Tam komşuluk oluşturma	
Tabu Listesi Boyutu	3	2
Durdurma Kriteri	60	

Tablo 2'de verilen tabu araması algoritması parametre ve faktör değerleri kullanılarak P (montaj hattı

dengeleme) olasılığı dokuz seviye (0,1; 0,2; ...; 0,9) alınarak farklı problem faktörleri ile test edilmiştir. İstasyon sayısı açısından P olasılığı için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre P olasılığı için belirlenen dokuz seviye arasında %5 anlam düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Bu nedenle bu seviyeler arasından herhangi birisi seçilebilir. Bu çalışmada P olasılığı 0,5 olarak kabul edilmiştir.

TS_P 'ın etkinliğini test etmek amacıyla, Kara [3]'nın sunduğu KTPM sonuçları ile yapılan karşılaştırma deneylerinde Tablo 2'de verilen parametre ve faktör değerleri kullanılmıştır.

4. AÇIKLAYICI BİR ÖRNEK (AN ILLUSTRATIVE EXAMPLE)

Bu bölümde, yedi görevli örnek KMUM-D/S problemi TS_P kullanılarak çözülmüştür. KMUM'da

A, B ve C gibi üç farklı model $\{1,1,1\}$ MPK ile üretilmektedir. Çevrim zamanı (C) beş birim zaman, P olasılığı 0,5 ve Tablo 2’de verilen tabu araması algoritması parametre ve faktör değerleri kullanılmıştır. Örneğe ilişkin veriler aşağıda Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Örnek Problem Verileri (Data of the illustrative example)

Görev	Hemen Ardılı	t_{gm}			t_g
		A	B	C	
1	2 ve 3	2	3	0	1,67
2	4	2	2	3	2,33
3	5	3	4	0	2,33
4	6	0	3	2	1,67
5	6	2	2	3	2,33
6	7	1	2	1	1,33
7	---	2	2	2	2

İki farklı başlangıç çözümü bulunmaktadır. Bunlar: Başlangıç montaj hattı dengesi ve başlangıç model sırasıdır. Başlangıç montaj hattı dengesi, Özcan [11] tarafından önerilen sezgisel metot kullanılarak elde edilmiştir. Başlangıç model sırası ise problemin MPK kısıtı sağlanacak şekilde rastsal olarak elde edilmiştir. Tablo 4’de elde edilen atama sırası verilmiştir. ‘-’g ile ifade edilen görevler U-tipi montaj hattının arkasına atanan görevleri belirtmektedir.

Tablo 4. Başlangıç Montaj Hattı Dengesi İçin Görev Atama Sırası (Task assignment sequencing for initial line balancing)

A Listesi	1	-7	-6	-4	3	-5	2
TA Listesi	2	-5	3	-4	-6	-7	1

Örnek problemin çözümü aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılmaktadır.

$t=0$, Başlangıç U-tipi montaj hattı dengesi ve model sırası;

İstasyon (j)	1	2	3	4	5
Görev	{1}; {3}; {2}; {Ø}; {Ø};	{3}; {Ø}; {Ø}; {5}	{Ø}; {5}	{Ø}; {4 ve 6}	{Ø}; {4 ve 6}
$\{SF_j\}; \{SB_j\}$	{7}	{Ø}	{Ø}	{Ø}	{Ø}
MS : ABC; TLD = [{Ø}, {Ø}, {Ø}];					
TLS = [{Ø}, {Ø}] ; f(b) = 5					

$t = 1, p = \text{u.d.} (0,1) \rightarrow p = 0,67$

$p \geq 0,5 \rightarrow$ U-tipi montaj hattı dengelemesi için TA listesi kullanılarak yer değiştirme hareketi ile öncelik ilişkileri kısıtını sağlayan yeni bir komşuluk çözüm oluşturulur. 2. görev ile 6. görev seçilen görevlerdir.

TA Listesi	2	5	3	4	6	7	1
Yeni TA Listesi	6	5	3	4	2	-7	1

İstasyon (j)	1	2	3	4
Görev	{1}; {2 ve 4}; {3}; {5 ve 6};	{3}; {Ø}	{Ø}; {Ø}	{Ø}; {Ø}
$\{SF_j\}; \{SB_j\}$	{7}	{Ø}	{Ø}	{Ø}
MS : ABC; TLD = [{2;6}, {Ø}, {Ø}];				
TLS = [{Ø}, {Ø}] ; f(b) = 4				

$t = 2, p = \text{u.d.} (0,1) \rightarrow p = 0,34$

$p < 0,5 \rightarrow$ model sıralaması için MS kullanılarak araya ekleme hareketi ile MPK kısıtını sağlayan yeni bir komşuluk çözüm oluşturulur. C modeli 1. sıraya getirilmiştir.

MS	A	B	C
Yeni MS	C	A	B

İstasyon (j)	1	2	3	4
Görev	{1}; {2 ve 4}; {3}; {5 ve 6};	{3}; {Ø}	{Ø}; {Ø}	{Ø}; {Ø}
$\{SF_j\}; \{SB_j\}$	{7}	{Ø}	{Ø}	{Ø}
MS : CAB; TLD = [{2;6}, {Ø}, {Ø}];				
TLS = [{1;C}, {Ø}] ; f(b) = 4				

...
 $t = 60$

İstasyon (j)	1	2	3	4
Görev	{1 ve 2}; {4}; {3}; {Ø};	{4}; {3}; {Ø};	{Ø}; {5 ve 6}	{Ø}; {5 ve 6}
$\{SF_j\}; \{SB_j\}$	{Ø}	{7}	{Ø}	{5 ve 6}
MS : BAC; TLD = [{5;6}, {2;7}, {3;5}];				
TLS = [{2;C}, {3;B}] ; f(b) = 4				

Tablo 5 örnek problemin TS_p ile çözümünden elde edilen U-tipi montaj hattı dengesini ve U-tipi montaj hattı üzerinde oluşan istasyonların her çevrimdeki iş yüklerini göstermektedir.

Tablo 5. Örnek problemin iş yükleri ve model karışımları (Workloads and model mixes of illustrative example)

Çevrim	İstasyon											
	1			2			3			4		
	α_j^r	β_j^r	W_{jr}	α_j^r	β_j^r	W_{jr}	α_j^r	β_j^r	W_{jr}	α_j^r	β_j^r	W_{jr}
1	A	Ø	4	B	B	5	C	Ø	0	Ø	A	3
2	B	Ø	3	A	A	2	B	Ø	4	Ø	C	4
3	C	Ø	5	C	C	4	A	Ø	3	Ø	B	4

5. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ (COMPARATIVE ANALYSIS)

Çalışmanın bu bölümünde, TS_p 'ın etkinliğini test etmek için 81 adet test problemi kullanılarak KTPM çözümleri ile karşılaştırılmıştır. TS_p için karşılaştırma deneylerinde P olasılığının 0,5 ve 1.0 olmak üzere iki montaj hattı dengeleme olasılığı kullanılmıştır. KTPM sonuçları sadece KMUM-D sonuçları olduğundan, TS_p etkinliğinin tam olarak belirlenebilmesi için P olasılığı 1.0 alınmıştır. Başlangıç model sırası KTPM model sırası ile aynıdır. Kullanılan test problemlerinin yapısı Tablo 6’de verilmiştir;

Tablo 6. Test problemleri için faktörler ve seviyeleri (Factors and levels for test problems)

N	t	EO	C	M	MSU
10	u.d. [0,15]	0,25; 0,50; 0,75	20; 30; 40	3	3; 5; 7
20	u.d. [0,15]	0,25; 0,50; 0,75	30; 40; 50	3	3; 5; 7
30	u.d. [0,15]	0,25; 0,50; 0,75	40; 50; 60	3	3; 5; 7

Test problemleri görev sayısı (N), görev zamanı (t), esneklik oranı (EO) ve çevrim zamanı (C) üçer seviye alınarak toplam 81 adet test probleminden meydana gelmektedir. Her bir test problemi için üçer deneme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de yer alan kısaltmalar aşağıda tanımlanmıştır;

KTPM = KTPM ile elde edilen istasyon sayısı.
 Ort = TS_p ile elde edilen üç denemenin ortalama istasyon sayısı.
 Min = TS_p ile çözülen üç denemeden elde edilen en küçük istasyon sayısı.
 $\%S = ((\text{Ort} - \text{KTPM}) / \text{Ort}) \times 100$.

Tablo 7'de verilen istasyon sayısı sonuçlarına göre, her biri 27 adet test problemini kapsayan 10, 20 ve 30 görevli test problemi arasından KTPM sırasıyla 22 adedi optimal olmak üzere 25, sadece bir adedi optimal olmak üzere 19 ve dokuz sonuç bulabilmiştir. Buna göre $P = 0,5$ ile komşuluk yapısı oluşturulan $TS_{P=0,5}$ 'in 10, 20 ve 30 görevli test problemlerinde KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı sırasıyla %72; %57,8 ve %66,7 olduğu görülmektedir. %S değeri sırasıyla 5,07; 5,19 ve 4,14'dür. Bununla birlikte üç deneme sonucunda elde edilen en düşük $TS_{P=0,5}$ sonuçlarının KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı ise sırasıyla %84; %94,73 ve %88,88 olarak bulunmuştur. $P = 1.0$ dengeleme olasılığı ile komşuluk yapısı oluşturulan $TS_{P=1,0}$ 'in 10, 20 ve 30 görevli test problemlerinde KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı sırasıyla %56; %63,1 ve %66,7 olduğu görülmektedir. %S değeri ise sırasıyla 6,40; 3,92 ve 4,14'dür. Bununla birlikte üç deneme sonucunda elde edilen en düşük $TS_{P=1,0}$ sonuçlarının KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı ise sırasıyla %84; %94,73 ve %88,88 olarak bulunmuştur.

Tablo 7'de verilen sonuçlara göre 10, 20 ve 30 görevli 81 test problemi arasından KTPM sadece 53 sonuç elde edebilmiştir. $TS_{P=0,5}$ 'in, KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı %66, %S değeri 4,95 ve üç deneme sonucunda elde edilen en düşük $TS_{P=0,5}$ sonuçlarının KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı ise %88,67 olarak bulunmuştur. $TS_{P=1,0}$ 'in, KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı %60, %S değeri 5,13 ve üç deneme sonucunda elde edilen en düşük $TS_{P=1,0}$ sonuçlarının KTPM sonuçlarına ulaşma başarısı ise %88,67 olduğu görülmektedir. Bununla birlikte KTPM'nin uygun çözüm elde edemediği 28 problem için uygun çözümler elde edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Üreticilerin değişen müşteri istek ve ihtiyaçlarına çabuk cevap verebilmeleri ve çevikliklerini arttırabilmeleri için hızlı ve etkin çözüm yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. KMUM-D/S probleminin yapısı NP-Zor olduğundan dolayı, tamsayı algoritmaların uygun çözümlere ulaşması

uzun zaman almaktadır. Bununla birlikte problem yapısı zorlaştıkça optimal çözümlere ulaşamamaktadır. Sezgisel yaklaşımlarla elde edilen sonuçlar optimal sonuç garantisi vermese bile problemin zorluğu ne olursa olsun kısa zamanda optimale yakın uygun çözümler üretebilmektedir. Bu çalışmada, U-tipi montaj hatlarında karışık modelli üretim yapılması durumunda ortaya çıkan, KMUM-D/S probleminin eşzamanlı olarak çözümünün gerçekleştirilmesi amacıyla, U-tipi montaj hattında ihtiyaç duyulacak istasyon sayısını en küçükleyen bir tabu araması algoritması tabanlı sezgisel yaklaşım önerilmiştir. TS_p 'nin, KMUM-D problemi için önerilen KTPM sonuçlarına ulaşma oranı %66, KTPM sonuçlarından ortalama sapma değeri %4,95 olarak bulunmuştur. Önerilen sezgisel yaklaşım kullanılarak, KMUM ile ilgili aşağıda sıralanan çalışmalar yapılabilir;

Montaj işlemlerine, özellikle işçiler tarafından manuel olarak gerçekleştirilen görevlerin tamamlanma zamanları, ortalaması ve standart sapması bilinen belirli bir olasılık dağılımına uyan (stokastik) KMUM-D/S probleminin çözümü gerçekleştirilebilir.

Kısa sürede yüksek miktarlarda üretim yapmak isteyen işletmelerin, çevrim zamanlarını düşürerek, aynı görev dizisinin gerçekleştirildiği iki veya daha fazla sayıda iş istasyonunu paralel olarak kullanmaları söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle KMUM'un paralel iş istasyonları ile dengelemesi ve model sıralaması problemleri çözülebilir.

Tek bir amaç fonksiyonunun en iyilenmesi, pratikte dikkate alınması gereken diğer amaç fonksiyonlarının kötüleşmesine neden olabilir. Bu nedenle tek bir amaç fonksiyonu yerine birden fazla amaç fonksiyonu dikkate alınarak çok amaçlı, KMUM-D/S probleminin çözümü sağlanabilir.

U-tipi montaj hattında yer alan klasik ve özellikle karşıya geçişli istasyonlarda çalışan işçilerin, görevlerini yerine getirmek için kat ettikleri yolun seyahat süreleri dikkate alınabilir.

KMUM bir üretim hücresi gibi düşünülerek çoklu U-tipi montaj hatlarında hat dengelemesi ve model sıralaması problemlerini çözmek için kullanılabilir.

Önerilen sezgisel yaklaşım kullanılarak yukarıda verilen çalışmaların çeşitli kombinasyonlarda birlikte ele alınması ile ortaya çıkabilecek yeni problemlerin çözümleri (örneğin; stokastik görev ve seyahat zamanlı, paralel iş istasyonlarına izin verilen çok amaçlı karışık U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemi) kısıtlar üzerinde yapılacak değişikliklerle rahatlıkla yapılabilir.

Tablo 7. TS_p 'in KTPM ile karşılaştırması (Comparison of TS_p to MIPM)

No	N	KTPM	$TS_{p=0,5}$			$TS_{p=1,0}$			No	N	KTPM	$TS_{p=0,5}$			$TS_{p=1,0}$			No	N	KTPM	$TS_{p=0,5}$			$TS_{p=1,0}$		
			Min.	Ort.	%S	Min.	Ort.	%S				Min.	Ort.	%S	Min.	Ort.	%S				Min.	Ort.	%S	Min.	Ort.	%S
1		6	7	7,33	18,14	7	7,33	18,14	28		---	7	7,33	---	7	7,33	---	55		---	7	7	---	7	7,33	---
2		5	5	5	0	5	5	0	29		---	7	7,33	---	7	7,33	---	56		---	8	8	---	8	8	---
3		6	6	6	0	6	6	0	30		---	7	7,67	---	7	7	---	57		---	8	8	---	8	8,33	---
4		3	3	3	0	3	3	0	31		5*	5	5	0	5	5,33	6,19	58		6*	6	6	0	6	6	0
5		4	4	4	0	4	4	0	32		5*	5	5	0	5	5,67	11,82	59		---	6	6,33	---	6	6	---
6		4	4	4	0	4	4,33	7,62	33		5*	5	5,33	6,19	5	5	0	60		---	6	6	---	6	6	---
7		2	2	2	0	2	2	0	34		3	3	3,67	18,26	3	3,33	9,91	61		4*	5	5,33	24,95	5	5,33	24,95
8		3	3	3	0	3	3	0	35		4*	4	4	0	4	4	0	62		---	5	5,33	---	5	5,33	---
9		3	3	3	0	3	3	0	36		4*	4	4	0	4	4,67	14,35	63		---	5	5	---	5	5	---
10		5	6	6,33	21,01	6	6	16,67	37		---	6	6,33	---	6	6,67	---	64		---	6	6	---	6	6	---
11		---	7	7,33	---	7	7	---	38		---	7	7,33	---	7	7,33	---	65		---	7	7,67	---	7	7	---
12		6*	6	6,33	5,21	6	6	0	39		---	7	7,33	---	7	7	---	66		---	7	7	---	7	7	---
13		3	3	3	0	3	3	0	40		5*	5	5	0	5	5,33	6,19	67		6*	6	6	0	6	6	0
14	10	3	3	3	0	3	3	0	41	20	5*	5	5,67	11,82	5	5	0	68	30	---	6	6,33	---	6	6,33	---
15		3	4	4	25	4	4	25	42		5*	5	5	0	5	5	0	69		---	6	6	---	6	6,67	---
16		2	2	2,33	14,16	2	2	0	43		4*	4	4,33	7,62	4	4	0	70		5*	5	5,33	6,19	5	5	0
17		3	3	3,33	9,91	3	3	0	44		4*	4	4,67	14,35	4	4	0	71		5*	5	5	0	5	5	0
18		3	3	3	0	3	3,33	9,91	45		4*	4	4,67	14,35	4	4	0	72		5*	5	5	0	5	5,33	6,19
19		5*	5	5	0	5	5,33	6,19	46		5*	5	5,33	6,19	5	5,33	6,19	73		---	7	7,33	---	7	7	---
20		6*	6	6	0	6	6,33	5,21	47		---	7	7,33	---	7	7	---	74		---	7	7	---	7	7	---
21		---	6	6	---	6	6,33	---	48		---	7	7	---	7	7	---	75		---	8	8	---	8	8,33	---
22		3	3	3	0	3	3,33	9,91	49		5*	5	5	0	5	5	0	76		5*	5	5,33	6,19	5	5	0
23		3	3	3	0	3	3	0	50		5*	5	5	0	5	5	0	77		---	6	6	---	6	6	---
24		3	3	3	0	3	3	0	51		4*	5	5	20	5	5	20	78		---	6	6	---	6	6	---
25		2	3	3	33,33	3	3	33,33	52		4*	4	4	0	4	4	0	79		5*	5	5	0	5	5,33	6,19
26		3	3	3	0	3	3,33	9,91	53		4*	4	4	0	4	4	0	80		5*	5	5	0	5	5	0
27		3	3	3	0	3	3,67	18,26	54		4*	4	4	0	4	4	0	81		---	4	4	---	4	4	---

* optimal çözüm elde edilememiştir
 --- uygun çözüm elde edilememiştir

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kim, Y.K., Kim, S.J., Kim, J.Y., "Balancing And Sequencing Mixed-Model U-Lines With A Co-Evolutionary Algorithm", **Production Planning And Control**, Vol. 11, No. 8, 754-764, 2000.
2. Miltenburg, J., "Balancing And Scheduling Mixed-Model U-Shaped Production Lines", **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, 14, 119-151, 2002.
3. Kara, Y., **U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Modeller Ve Otomotiv Yan Sanayinde Bir Uygulama**, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2004.
4. Sparling, D., Miltenburg, J., "The Mixed-Model U-Line Balancing Problem", **International Journal of Production Research**, 36, 485-501, 1998.
5. Kim, Y.K., Kim, J.Y., Kim, Y., "An Endosymbiotic Evolutionary Algorithm For The Integration Balancing And Sequencing In Mixed-Model U-Lines", **European Journal of Operational Research**, 168, 838-852, 2006.
6. Kara, Y., Özcan, U., Peker, A., "An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, DOI: 10.1007/s00170-006-0437-2.
7. Kara, Y., Özcan, U., Peker, A., "Balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines with multiple objectives", **Applied Mathematics and Computation**, DOI: 10.1016/j.amc.2006.05.185.
8. Glover, F., M. Laguna, "Tabu Search", **Kluwer Academic Publishers**, Boston, 1997.
9. Glover, F., Taillard, E., Werra, D., "A User's Guide To Tabu Search", **Annals Of Operations Research**, 41, 3-28, 1993.
10. Macaskill, J.L.C., "Production-Line Balances For Mixed Model Lines", **Management Science**, 19, 423- 434, 1972.
11. Özcan, U., **Karışık Modelli U Tipi Montaj Hatlarında Dengeleme ve Sıralama Problemleri İçin Yeni Bir Sezgisel Yaklaşım**, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
12. Baybars, I., "A survey of exact algorithms for the simple line balancing problem", **Management Science**, 32, 909-932, 1986.
13. Ghosh, S., Gagnon, J., "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems", **International Journal of Production Research**, 27, 637-670, 1989.
14. Erel, E., Sarin, S.C., "A survey of the assembly line balancing procedures", **Production Planning and Control**, 9, 414-434, 1998.
15. Miltenburg, J., Wijngaard, J., "The U-line line balancing problem", **Management Science**, 40, 1378-1388, 1994.
16. Scholl, A., Klein, R., "ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines", **International Journal of Production Research**, 37(4), 721-736, 1999.
17. Ohno, K., Nakade, K., "Analysis and optimization of a U-shaped production line", **Journal of the Operations Research Society of Japan**, 40, 90-104, 1997.
18. Guerriero, F., Miltenburg, J., "The stochastic U-line balancing problem", **Naval Research Logistics**, 50, 31-57, 2003.
19. Erel, E., Sabuncuoğlu, I., Aksu, B.A., "Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing", **International Journal of Production Research**, 39(13), 3003-3015, 2001.
20. Gökçen, H., Ağpak, K., "A goal programming approach to simple U-line balancing problem", **European Journal of Operational Research**, 171, 577-585, 2006.