

DÜZELTMELİ TAVLAMA BENZETİMİ İLE BİRİNCİ TİPTE BASİT MONTAJ HATTI Dengeleme: BİR GERÇEK HAYAT UYGULAMASI

Hüseyin GÜDEN*, Sedef MERAL**

* Doğu Akdeniz Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazimağusa, K.K.T.C.

**ODTÜ, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

huseyin.guden@emu.edu.tr, sedef@metu.edu.tr

(Geliş/Received: 05.02.2013; Kabul/Accepted: 08.10.2013)

ÖZET

Bu çalışmada bulaşık makinesi üreticisi bir firmanın montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Bu vaka; çok modelli montaj hattı dengeleme problemine uymaktadır ve her bir bulaşık makinesi modelinde yaklaşık 300 görev, 400 öncelik ilişkisi ve 70 istasyon söz konusudur. Belli bir üretim seviyesini sağlamak üzere, model bazında kullanılan istasyon sayıları en küçüklenmek istenmektedir. Buna göre, model sayısı kadar birinci tipte basit montaj hattı dengeleme vakası üzerinde çalışılmıştır. Problemin bu boyutuyla vakaların en iyi çözümlerinin bulunması matematiksel modellere dayanan yöntemlerle başarılammıştır. Bu sebeple, probleme kısa sürelerde iyi çözümler bulmak üzere bir düzeltmeli tavlama benzetimi sezgiseli geliştirilmiştir. Sezgisel yöntemin performansı literatürdeki test problemleri üzerinde sınanmış ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, geliştirilen sezgisel yöntem ele alınan gerçek hayat probleminin çözümünde kullanılmış ve mevcut uygulamadan daha iyi bir çözüm bulunmuştur.

Anahtar kelimeler:Montaj hattı dengeleme, düzeltmeli tavlama benzetimi, birinci tipte basit montaj hattı dengeleme

AN ADAPTIVE SIMULATED ANNEALING METHOD FOR TYPE-ONE SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING: A REAL LIFE CASE STUDY

ABSTRACT

In this study, real life assembly line balancing problem of a dishwasher producer is addressed. The line considered is a multi-model assembly line and real life problem instance consists of approximately 300 tasks, 400 precedence relations and 70 stations per product model. The number of stations used to meet a specified production rate is desired to be minimized. To do this, a type-one simple assembly line balancing problem instance is considered for each product model. Due to the large size of the problem we could not find the optimal solution of the problem by mathematical programming methods. In order to find good solutions in short times an adaptive simulated annealing algorithm is developed. Performance of the algorithm is tested on several problem instances from the literature and found to be satisfactory. Then it is used to solve the real life problem instance considered and a better solution than the current one is obtained.

Keywords:Assembly line balancing, adaptive simulated annealing, type one simple assembly line balancing

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mevcut rekabet koşulları firmaları ürün çeşitlendirmeye ve yeni ürünler geliştirmeye zorlar. Bu çalışmada ele alınan firma da başlıca 4 modelde bulaşık makinesi ile üretimine devam etmektedir: M1, M2, M3 ve M4. Firma vardiya da 500 bulaşık

makinesi üretmektedir ve bunun yaklaşık %70'i M1, %15'i M2, %10'u M3 ve %5'i M4 modelindedir. Üretim çok modelli montaj hattı tipinde gerçekleşmektedir.

Mevcut durumda firmada görev listesi olmakla birlikte bu listede birçok hata söz konusudur. Bazı

eski modellerdeki görevler listede yer alırken güncel modellerdeki bazı görevler listede yer almamaktadır. Bazı görevler hatta birden çok defa tekrarlanırken her tekrar için farklı bir kod verilmemiş ve bunlar listede sadece bir defa yer almıştır. Dahası, firmada görevler arası öncelik ilişkileri şebekesi bulunmamaktadır. Bazı görevlerin atanabileceği istasyonlarla ilgili özel kısıtlar söz konusudur. Ancak bu bilgiler de yazılı olarak tutulmamaktadır. Hat birkaç ayda bir yeni duruma (talep tahminleri, model değişiklikleri vb.) göre kişisel tecrübelerle dayanarak ve deneme yanılma yöntemiyle yeniden dengelenmektedir. Tüm bu olumsuz koşullar iyi bir çözümün değil uygun herhangi bir çözümün bulunmasını bile oldukça zorlaştırmaktadır. Dengeleme çalışmaları bir haftayı bulmakta ve bu hafta içerisinde üretim ciddi aksaklıklarla zorlukla gerçekleşmektedir. Her model için bu sürecin tekrarlanmasına katlanılamayacağından tüm modelleri, tüm görevleri kapsayacak şekilde tek bir denge bulunmamaktadır. Yani, çok modellenli montaj hattına uygun üretim yapılan firmada karışık modellenli montaj hatlarına uygun bir çözüm bulunmaktadır. Model bazlı bakıldığında bu yaklaşım ile hatta ciddi verimlilik kayıpları oluşmaktadır.

Bu çalışmada her model için görev listesi güncel şekline göre düzeltilmiş, öncelik ilişkileri şebekeleri oluşturulmuş, özel kısıtlar belirlenmiştir. Böylece hat dengeleme çalışmalarını kişisel tecrübelerle ve deneme yanılma yöntemiyle yapma mecburiyeti ortadan kaldırılmış, bilgisayar ortamında kesin veya sezgisel yöntemlerin uygulanmasının önü açılmıştır.

Güncellenen görev listeleri firma yetkililerine sunulmuş, mevcut görev sürelerinin de hatalı olabileceği endişesi bildirilmiştir. Bunun üzerine görev süreleri yeni listeler üzerinden firmada zaman etüdü konusunda çalışan uzmanların titiz çalışmalarıyla belirlenmiştir.

Hattı her model için en verimli şekilde kullanabilmek amaçlanmış ve bu doğrultuda her model için özgün bir denge bulunmaya çalışılmıştır. Model bazlı bakıldığında ele alınan problem basit montaj hattı dengeleme problemine (BMHDP) uymaktadır. BMHDP’de özetle hatta sadece bir modelin üretimi ele alınır, görev sürelerinin kesin olarak bilindiği varsayılır, paralel istasyonlar yoktur, çift taraflı istasyonlar yoktur, aynı işçi/robot birden fazla istasyonda görevlendirilmez. Bir BMHDP’de sabit bir çevrim süresini sağlayacak şekilde istasyon sayısı enküçüklenmeye çalışılıyorsa bu problem birinci tip (BMHDP-1), sabit bir istasyon sayısı ile mümkün olan en küçük çevrim süresi araştırılıyorsa ikinci tip (BMHDP-2) problem olarak sınıflandırılır. Bu çalışmada BMHDP-1 ile ilgilenecektir.

Firmada yapılan çalışmalara göre M1, M2, M3 ve M4 modelleri sırasıyla 270, 282, 271 ve 297 görev ve bu

görevler arasında 401, 416, 408 ve 433 öncelik ilişkisi içermektedir. Bu görevler, görevler arası öncelik ilişkileri, mevcut ve önerilen atamalar Ek’de verilmiştir. Görevlerin atanabileceği 68 istasyon vardır. Ancak, yapılan atamalarda hiç kullanılmayan istasyonlar olabilir. Vaka boyutlarının büyüklüğü sebebiyle matematiksel modeller ile en iyi çözümler bulunamamıştır. Bu nedenle bir sezgisel yöntemin geliştirilmesi benimsenmiştir. Tek bir çözüm üzerinden arama yaptığı ve bu sebeple çok büyük boyutlu problemlerde bile bilgisayarda hafıza sorununa sebep olmadığı, oluşturulan komşu çözümlerde uygulanamaz çözümler ortaya çıkmadığı ve ayrıca bir düzeltme algoritması gerektirmediği için tavlama benzetimi algoritması seçilmiştir. Algoritma parametrelerinin arama geçmişinde edinilen bilgileri kullanarak güncellenebilmesi sağlanmıştır. Yani düzeltilmeli bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın performansı literatürden alınan vakalar üzerinde test edilmiş ve algoritmanın var olan en iyi sezgisellerle yarışabilecek kadar iyi olduğu görülmüştür. Sonrasında algoritma ele alınan gerçek hayat probleminin çözümünde kullanılmıştır. Çok kısa sürelerde hem mevcut çözümden daha iyi, hem de teorik alt sınırlardan çok az sapmalı çözümler elde edilmiştir.

Montaj hattı dengeleme problemi 1950’lerden itibaren üzerinde en çok çalışılan endüstri mühendisliği problemlerinden biri olmuştur. Zamanla problemin birçok uzantısı dikkate alınmış, kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri önerilmiştir. [1-4] son zamanlarda konu üzerine literatür taraması yapan çalışmalardan bazılarıdır.

Problemin NP-zor olması ve büyük boyutlu vakalarda kesin çözüm yöntemlerinde yaşanan çok uzun süre ve bilgisayar hafıza yetersizliği gibi sorunlar birçok kurucu ve modern sezgisellerin geliştirilmesine yol açmıştır. Kurucu sezgiseller genellikle çok kısa zamanlarda uygun çözüm üretirler, ancak çözüm kalitesi tatmin edici olmayabilir. Bu sebeple modern sezgisellerde sadece bir kurucu sezgisel ile elde edilen çözümlerle yetinilmeyip, bu çözümlerden hareketle daha iyi çözümlerin araştırıldığı iyileştirici yaklaşımlar da geliştirilir. Tavlama benzetimi, genetik algoritmalar, tabu arama, karınca kolonisi, kuş sürüsü vb. tüm modern sezgisellerde ana yaklaşım budur. Sezgiselin bir kurucu kısmı, bir de iyileştirici kısmı vardır. Bu sebeple süre açısından bakılırsa kurucu sezgisellere göre daha uzun süreler gerektirirler; ancak daha iyi çözümler elde edilir. Amaç makul süreler içerisinde olabildiğince iyi çözümler bulmaktır.

BMHDP-1 üzerine modern sezgisel yöntemler öneren başlıca çalışmalar araştırılmıştır. Ponnambalam vd. [5] bir çok-amaçlı genetik algoritma, Gonçalves ve Almeida [6] bir genetik algoritma, Yu ve Yin [7] bir düzeltilmeli genetik algoritma, Dou vd. [8] bir kuş

sürüsü algoritması, Lapierre vd. [9] bir tabu arama algoritması, Sabuncuoğlu vd. [10] bir genetik algoritma ve bir genetik algoritma-tavlama benzetimi melez algoritması önermişlerdir. Baykasoğlu [11] çalışmasında çok kurallı, çok amaçlı bir tavlama benzetimi algoritması önermiştir. Bir istasyona atanabilir görevler içerisinde hangisinin seçileceği; en küçük görev süresi, en büyük görev süresi, öncül görev sayısı, ardıl görev sayısı gibi çeşitli kurallara göre belirlenmiştir. İstasyon sayısının enküçüklenmesi ve istasyon yükleri arasındaki dengenin enbüyüklenmesi amaçları dikkate alınmıştır.

Bu çalışma ile BMHDP-1 için, bildiğimiz kadarıyla, ilk defa düzeltilmeli tavlama benzetimi algoritması önerilmektedir. Yerel eniyilerden kurtulmak için arama boyunca elde edilen bilgileri kullanarak algoritmanın kendini düzeltme mekanizması bu algoritmanın özgünlüğüdür. Ayrıca istasyon sayısını enküçüklemek için istasyon yükleri arasındaki dengesizliğin enbüyüklenmeye çalışılması ilk kez önerilen bir yaklaşımdır.

İzleyen bölümde, önerilen düzeltilmeli tavlama benzetimi algoritması anlatılmıştır. Bölüm 3'te literatürden alınan vakalar ve gerçek hayat problemimiz üzerinde yapılan deneyler ile elde edilen sayısal sonuçlar açıklanmıştır. Bölüm 4'te çalışma sonuçlandırılmıştır.

2. GELİŞTİRİLEN DÜZELTİLMELİ TAHLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI (THE ADAPTIVE SIMULATED ANNEALING ALGORITHM PROPOSED)

Tavlama benzetimi, bir kurucu algoritma ile oluşturulan bir çözümden başlayıp her bir ardıştırmada mevcut çözümden küçük değişikliklerle komşu çözümler üreten ve üretilen daha iyi komşu çözümleri doğrudan, daha kötü komşu çözümleri ise belli bir olasılıkla bir sonraki ardıştırmamızın mevcut çözümleri olarak benimseyen bir genel arama algoritmasıdır. Daha kötü komşu çözüm kabul edilmez ise mevcut çözümün başka bir komşu çözümleri oluşturulur ve aynı sorgulama tekrarlanır. Mevcut çözümden daha kötü komşu çözümlere belli olasılıklarla geçişe izin verilerek algoritmaya yerel en iyilerden kurtulma yeteneği kazandırılır. F çözümleri değerlendiren fonksiyon ve t kontrol parametresi iken, daha kötü bir komşu çözümleri kabul edilme olasılığı $Üstel(-(F_{[komşu\ çözümleri]}-F_{[mevcut\ çözümleri]})/t)$ değerine eşittir. Aramanın başlarında t parametresinin değeri yüksek tutulup zamanla azaltılır. Yani, başlangıçta kötü komşu çözümleri kabul edilme olasılığı daha yüksektir, ancak zamanla azalır. Böylelikle başlarda çözüm uzayını daha genel tarayan ve zamanla iyi çözümleri bulunduğu bölgelere odaklanan bir mekanizma amaçlanır. t parametresinin başlangıç değeri ve küçültme hızı algoritmanın başlangıç çözümleriye bağlılığını ve performansını etkilemektedir.

Arama belli bir durdurma koşulu sağlanıncaya kadar devam eder.

Düzeltilmeli tavlama benzetiminde algoritma, kontrol parametresi t 'nin değerini, arama süresince edinilen bilgileri kullanılarak düzeltilir. Böylece arama geçmişine bakarak duruma göre kendini ayarlayan daha akıllı, daha esnek bir yapı oluşturulur. Klasik tavlama benzetimi algoritmasında t parametresinin değeri zamanla sürekli azaltılırken, düzeltilmeli tavlama benzetimi algoritmasında ihtiyaç halinde artırılabilmesi de sağlanır. Böylelikle algoritmanın performansının t parametresine bağlılığı azaltılır.

Geliştirilen algoritmada her bir görevin atanabileceği istasyon numaraları özel kısıtlar dikkate alınarak kaydedilmiştir. Her aşamada görevlerin istasyonlara atanması yapılırken bu kayıtlardan kontrol edilerek sadece özel kısıtlara uygun atamaların yapılması sağlanır. Başlangıç çözümleri COMSOAL kurucu sezgisel algoritması ile oluşturulur. Çözümler "standart kodlama" şeklinde kodlanırlar. Buna göre bir çözümleri temsil eden bir dizinin i 'inci elemanı i 'inci görevin atandığı istasyon numarasını gösterir. Komşu çözümleri üretme mekanizması olarak "aktarma" yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşıma göre mevcut çözümleri rastgele seçilen bir görevin atandığı istasyonun numarası; öncelik ilişkileri, çevrim süresi ve özel kısıtlar dikkate alınarak olurlu alternatif istasyonlardan birine rastgele değiştirilir.

Mevcut çözümleri aynı istasyon sayısına sahip bir komşu çözümleri düşünelim. Buna göre değerlendirme ölçütü sadece istasyon sayısı ise bu iki çözümleri birbiriyle aynı değere sahiptir. Eğer komşu çözümleri mevcut çözümleri göre istasyon yükleri arasındaki dengesizlik fazla ise komşu çözümleri hareketle ilerleyen ardıştırmalarda daha az istasyon sayısına sahip bir çözümleri bulma ihtimali daha yüksektir; çünkü istasyon yükleri arasındaki dengesizlik arttıkça, bazı istasyonların yükü daha da azalırken bazı istasyonların yükleri ise daha da artıyor demektir. Yani görevler az dolu istasyonlardan çok dolu istasyonlara kaydırılıyor demektir. Bu açıdan değerlendirildiğinde istasyon sayısının azaltılması amacı doğrultusunda, komşu çözümleri mevcut çözümleri daha iyi demektir. O halde bu iki çözümleri aynı değerlendirme derecesine sahip olmamalıdır. İstasyon yükleri arasındaki dengesizliğin enbüyüklenmesi istasyon sayısının enküçüklenmesi amacına ulaşmak yönünde bir destekleyici amaç olarak benimsenmiştir. x bir çözümleri, S bu çözümleri kullanılan istasyonlar kümesi, C çevrim süresi ve Y_i ise i istasyonunun yükü iken değerlendirme fonksiyonu

$$F_{(x)} = m1 * |S| + m2 * \sum_{i \in S} \sqrt{C - Y_i}$$

geliştirilmiştir. Burada $m1$ ve $m2$ amaçların görelili ağırlıkları iken $F_{(x)}$ fonksiyonunun ikinci bileşenininin küçülmesi, istasyon yükleri arasındaki dengesizliğin

artması anlamına gelmektedir. Bu kapsamda $F_{(x)}$ fonksiyonunun enküçüklenmeye çalışılması istasyon sayısının enküçüklenmesi ve bu doğrultuda istasyon yükleri arasındaki dengesizliğin enbüyüklenmesi amaçlarını gerçekleştirir.

Geliştirilen algoritmada bir yerel en iyi bölgesinde bulunduğu ve buradan çıkılmadığının tespit edilmesi durumunda, t parametresinin değeri yükseltilerek bu bölgeden çıkış sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Konunun iki boyutu vardır: yerel en iyi bölgesinde olmak ve bu bölgeden çıkamamak. Eğer aramanın son zamanlarında üretilen komşu çözümler arasında mevcut çözüme göre kötü olanların sayısı artıyor ise bu bir yerel en iyi bölgesinde bulunduğu işaret olabilir. Eğer kötü komşuların da kabul edilme olasılığı yeterince yüksek ise algoritma bu bölgeden kurtulmayı başarabilir. Ancak, aramanın son zamanlarında üretilen kötü komşu çözümlerin çok büyük bir bölümü kabul edilmemiş ise bu algoritmanın bulunulan yerel en iyi bölgesinden kurtulmadığının işareti olabilir.

i 'inci ardıştırmada kontrol parametresinin değeri (t_i) şu şekilde belirlenir: $t_i = K/j$. Burada K sabit bir değer ve j 'nin değerinde düzeltmeyi sağlayan bir sayacıdır. Başlangıçta $j=1$ 'dir ve t_i de K 'ya eşittir. Sonrasında her ardıştırmada i ve j birer birer artırılır. Geliştirilen algoritmada, her 100 ardıştırmada bir, son durum incelenerek algoritma buna göre kendini düzenler. Yapılan denemeler sonucunda şu oranlar benimsenmiştir: son 100 ardıştırmada üretilen komşu çözümlerden mevcut çözümlere göre daha kötü olanların sayısı ($KOTSAY$) 90'ı geçerse bu bir yerel en iyi bölgesinde bulunduğu işaret olarak görülür; bu daha kötü çözümlerden kabul edilenlerin sayısı ($KABSAY$) 9'dan daha az ise bu bulunulan yerel en iyi bölgesinden çıkılmadığına işaret olarak görülür. Her iki koşulun da sağlanması durumunda t parametresinin değeri artırılarak daha kötü komşu çözümlerin kabul edilme ve yerel en iyi bölgesinden kurtulma ihtimali yükseltilir. Bu, j sayacının değerinin aşağıdaki şekilde düzeltilmesiyle sağlanır.

$$j = \begin{cases} 1 & KABSAY = 0 \text{ ise} \\ \lfloor K * KABSAY / KOTSAY \rfloor & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$KOTSAY$ arttıkça ve $KABSAY$ azaldıkça j 'nin değeri azalır; bulunulan ve çıkılmayan yerel en iyi bölgesinden kurtulma şansı artırılır.

3. SAYISAL SONUÇLAR (COMPUTATIONAL RESULTS)

Geliştirilen algoritma Turbo Pascal Windows programlama dilinde kodlanmış ve çalışmalar Pentium 4, 3 GHz, 512 MB RAM özelliklerindeki bilgisayarda yapılmıştır.

3.1. Literatürdeki Test Problemleri Üzerinden Performans Değerlendirmesi (Performance Evaluation based on the Test Problem Instances in the Literature)

Algoritmanın performansı literatürden alınan BMHDP-1 test problemleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu amaçla Talbot vd. (1986), Hoffmann (1990, 1992) ve Scholl (1993, 1995) vaka kümelerinden (test problemleri) en iyi çözümü bilinen 265 vaka kullanılmıştır. Her bir vaka için 10 dakikalık arama süresi sınırı durdurma koşulu olarak uygulanmıştır.

Bu 265 vakadan 237 tanesinin (%89,4) en iyi çözümü bulunmuştur. 22 tanesine (%8,3) en iyi çözümden %5'ten daha az sapan çözümler bulunmuştur. Kalan 6 vakaya (%2,3) en iyi çözümden %5'ten daha fazla sapan çözümler bulunmuştur. Bu sonuçlara göre geliştirilen algoritma istasyon sayısını enküçüklemeye oldukça iyi performans göstermektedir. En iyi çözümü bulunamayan problemlerle ilgili bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: En iyi çözümü bulunamayan problemler

Problem	Görev Sayısı	C	İst. Say. (Eniyi)	İst. Say. (Bulunan)	Sapma (%)
arcus2	111	11570	13	14	7,6
barthold2	148	85	50	51	2
buxey	29	47	7	8	14,2
lutz3	89	110	15	16	6,6
lutz3	89	118	14	15	7,1
sawyer	30	47	7	8	14,2
scholl	297	1394	50	51	2
scholl	297	1452	48	49	2
scholl	297	1515	46	47	2,1
scholl	297	1584	44	45	2,2
scholl	297	1659	42	43	2,3
scholl	297	1742	40	41	2,5
scholl	297	1787	39	40	2,5
scholl	297	1834	38	39	2,6
scholl	297	1883	37	38	2,7
scholl	297	1935	36	37	2,7
scholl	297	1991	35	36	2,8
scholl	297	2049	34	35	2,9
scholl	297	2111	33	34	3
scholl	297	2177	32	33	3,1
scholl	297	2247	31	32	3,2
scholl	297	2322	30	31	3,3
scholl	297	2402	29	30	3,4
scholl	297	2488	28	29	3,5
scholl	297	2580	27	28	3,7
scholl	297	2680	26	27	3,8
scholl	297	2787	25	26	4
tonge	70	251	14	15	7,1

Ortak vakalar üzerinde analizler yapmış olan literatürdeki diğer çalışmalar incelenmiştir. Kullanılan bilgisayarın özellikleri, kodlama dili, koşum sırasında kullanıcı veya bilgisayar tarafından otomatik olarak çalıştırılan programlar, işletim sistemi, hatta bilgisayar donanımındaki parçalar ve bunların markaları bile yöntemin performansını etkileyebilmektedir. Bu sebeple farklı zamanlarda, farklı bilgisayarlarda, farklı kişilerce yapılmış

çalışmalardaki verilen değerlerden hareketle önerilen yöntemler arasında kesin performans karşılaştırmaları yapmak mümkün değildir. Kabaca özetlemek gerekirse Gonçalves ve Almeida [6] çalışmalarında Pentium II 300 MHz işlemci, 64 MB RAM özelliklerindeki bir bilgisayar kullanmışlar ve aynı vaka kümesinden 213 tanesinin en iyi çözümünü bulmuşlar, ancak çözüm süreleriyle ilgili bilgi vermemişlerdir. Lapiere vd. [9] çalışmalarında Sun UltraSparc 10, 100 MHz bilgisayarını kullanmışlardır. 39 adet orta ve büyük boyutlu vaka üzerinden testler yapmışlardır. Bunlardan 37 adeti bu çalışmada da kullanılmış ortak vakalardır. Tüm ortak vakalarda her iki çalışmada da aynı istasyon sayılarına sahip çözümler bulunmuştur. Çözüm sürelerinin [72-116] saat aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Baykasoğlu [11] çalışmasında Pentium III MMX, 450 MHz, 256 MB RAM özelliklerindeki bir bilgisayar kullanmıştır. 57 adet genellikle küçük boyutlu problemler üzerinde testler yapmıştır. Tüm vakalar bu çalışmada da kullanılmış ortak vakalardır ve iki çalışmada da tümünün en iyi çözümleri bulunmuştur. Çözüm süresinin 4 dakika civarında olduğu belirtilmiştir. En güncel olarak Dou vd. [8] çalışmalarında Pentium 4, 1.7 GHz işlemci, 512 MB RAM özelliklerindeki bir bilgisayar kullanmışlardır. Küçük boyutlu 20 adet problem üzerinde testler yapmışlardır. Her iki çalışmada da tüm vakaların en iyi çözümleri bulunmuş, ancak süre belirtilmemiştir. Buna göre bu çalışmada önerilen sezgiselin literatürdeki en iyi sezgiseller ile yarışabilecek düzeyde, hatta onlardan daha iyi olduğu sonucuna varılabilir.

3.2. Ele Alınan Gerçek Hayat Problemi Üzerinden Performans Değerlendirmesi (Performance Evaluation based on the Real Life Case)

Geliştirilen algoritmanın performansı ele alınan gerçek hayat problemi üzerinden de test edilmiştir. Algoritmanın ürün modellerindeki ve üretim seviyelerindeki farklılaşmalara olan tepkisi, başarımları ve tutarlılığı incelenmiştir. Farklı model seviyeleri olarak M1, M2, M3 ve M4 modelleri, farklı üretim seviyeleri olarak vardiyada 300, 500 ve 600 adetlik üretim seviyeleri alınmıştır. Cevap değişkenleri olarak istasyon sayısı ve istasyon sayısı teorik alt sınırından olan sapma belirlenmiştir. Durdurma koşulu olarak 10,000 adet ardıştırma uygulanmıştır. Buna göre bir deney için koşum süresi toplam [1-1,5] dakika aralığında gözlemlenmiştir. Her bir bileşim için 10 adet koşum yapılmıştır. İstasyon sayılarının, bu 10 adet koşumun sonuçları kullanılarak bulunan ortalamaları ve standart sapmaları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 3’de görevlerin toplam süresinin çevrim süresine bölümünün üst tam sayıya yuvarlanmasıyla elde edilen teorik alt sınır değerleri ve bulunan istasyon sayılarının bu alt sınırlardan olan sapmalarının ortalamaları verilmiştir.

Tablo 2’ye göre sonuçta bulunan çözümlerin standart sapması tüm model ve üretim seviyeleri için biradet

istasyonun altındadır (ortalama 0,45 istasyon). Buna göre önerilen yöntemin tutarlı olduğu söylenebilir. Tablo 3’e göre sonuçta bulunan çözümlerin teorik alt sınırdan sapmaları 1 ya da 2 adet istasyondur. Bulunan çözümlerin en iyi çözüm olma ihtimalleri de düşünüldüğünde teorik alt sınırdan 1 ya da 2 istasyonluk sapmanın da oldukça küçük bir sapma olduğu söylenebilir. Buna göre yöntemin başarımları seviyesi de tatmin edicidir.

Tablo 2: Üretim seviyeleri ve ürün modellerine göre 10 koşumda bulunan istasyon sayılarının ortalama ve standart sapmaları

Model	İstatistik	Üretim Seviyesi					
		300		500		600	
		ilk	son	ilk	son	ilk	son
M1	Ortalama	25	21,4	34	31,1	38,3	35,1
	Std. Sapma	0	0,51	0	0,31	0,67	0,31
M2	Ortalama	25	22,6	35	32,1	39,8	36,7
	Std. Sapma	0	0,69	0	0,31	0,42	0,48
M3	Ortalama	25	21,3	34,9	31,2	38,1	35,3
	Std. Sapma	0	0,48	0,31	0,42	0,31	0,48
M4	Ortalama	26	23,5	37,5	34,2	42,1	39,6
	Std. Sapma	0	0,52	0,70	0,42	0,99	0,51

Tablo 3: Üretim seviyeleri ve ürün modellerine göre istasyon sayısı alt sınırları ve 10 koşumda bulunan istasyon sayılarının alt sınırlardan sapma ortalamaları

Üretim Seviyesi	Model	M1	M2	M3	M4	
		300	Alt sınır	20	20	20
	İlk sapma	5	5	5	4	
	Son sapma	1,4	2,6	1,3	1,5	
	İyileşme oranı	0,72	0,48	0,74	0,63	
	500	Alt sınır	29	30	30	33
	İlk sapma	5	5	4,9	4,5	
	Son sapma	2,1	2,1	1,2	1,2	
	İyileşme oranı	0,58	0,58	0,76	0,73	
	600	Alt sınır	34	35	34	38
	İlk sapma	4,3	4,8	4,1	4,1	
	Son sapma	1,1	1,7	1,3	1,6	
	İyileşme oranı	0,74	0,65	0,68	0,61	

Bu tablolarda “ilk” COMSOAL algoritması ile bulunan başlangıç çözümünü, “son” arama boyunca bulunan en iyi çözümü göstermektedir. “İyileşme oranı” ise $(ilk-son)/ilk$ formülü ile bulunmuştur.

Yöntemin faktör seviyelerindeki değişimlere olan tepkisini incelemek için Mann-Whitney testi kullanılmıştır. Buna göre 0,05 anlamlılık seviyesinde faktör seviye çiftleri arasındaki farkın güven aralıkları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: Faktör seviye çiftleri arasındaki sonuçların farklarının 0,05 anlamlılık düzeyindeki güven aralıkları

Sonuç türü: Std. sapma		Sonuç türü: İyileşme oranı		Sonuç türü: Alt sınırdan sapma	
Faktör seviye çifti	Güven aralığı	Faktör seviye çifti	Güven aralığı	Faktör seviye çifti	Güven aralığı
300-500	(0,0600;0,3800)*	300-500	(-0,2800;0,1600)	300-500	(-0,8000;1,4000)
300-600	(-0,0300;0,3800)	300-600	(-0,2599;0,1300)	300-600	(-0,4000;1,5000)
500-600	(-0,2000;0,1101)	500-600	(-0,1599;0,1500)	500-600	(-0,5000;1,0000)
M1-M2	(-0,3800;0,2001)	M1-M2	(-0,0699;0,2600)	M1-M2	(-1,5000;0,4000)
M1-M3	(-0,1701;0,0901)	M1-M3	(-0,1800;0,0600)	M1-M3	(-0,2002;0,9802)
M1-M4	(-0,2101;0,0899)	M1-M4	(-0,1500;0,1300)	M1-M4	(-0,5000;0,9000)
M2-M3	(-0,1700;0,2700)	M2-M3	(-0,2800;-0,0300)*	M2-M3	(0,4003;1,4802)*
M2-M4	(-0,2101;0,2700)	M2-M4	(-0,2500;0,0400)	M2-M4	(0,1001;1,3999)*
M3-M4	(-0,1000;0,0600)	M3-M4	(-0,0500;0,1500)	M3-M4	(-0,4801;0,1001)

Sıfırı kapsayan güven aralıkları o faktör seviyeleri arasında ilgili sonuçlar içinde anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir. Tablo 4’de ‘*’ ile işaretlenmiş olan güven aralıkları aralarında anlamlı fark olan sonuçları göstermektedir. Genel olarak bakıldığında önerilen algoritmanın, gerçek hayat problemi üzerinde yapılan testlerde, ürün modelindeki veya üretim seviyesindeki değişimlerden etkilenmediği söylenebilir. Tüm bu sonuçlar algoritmanın ele alınan gerçek hayat problemi üzerinde de tutarlı şekilde iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

3.3. Mevcut ve Önerilen Çözümler (Current and Proposed Solutions)

Mevcut durumda M1, M2 ve M3 modellerinde 36 istasyon, M4’de 37 istasyon kullanılmaktadır. Modeller bazında vardiyada üretim seviyeleri ise sırasıyla yaklaşık 350, 75, 50 ve 25 adettir. Vardiya boyunca oluşan toplam atıl süre yaklaşık olarak 39 saattir. Günlük üretim seviyeleri önerilen çözümde de aynı olmak üzere kullanılan istasyon sayıları sırasıyla 31, 30, 30 ve 31’dir. Vardiya boyunca oluşan toplam atıl süre ise 12 saattir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada bir gerçek hayat montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Problemin kesin çözüm yöntemleriyle çözümü mümkün olmadığı için özgün bir düzeltmeli tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. İstasyon sayısı enküçükleme çalışılırken istasyon yükleri arasındaki dengesizliğin enbüyüklenmesi bir yardımcı amaç olarak ele alınmıştır; iki farklı amacın bu şekilde gözetilmesi çalışmanın bir farklılığıdır. Ayrıca önerilen soğutma çizelgesi ve düzeltme yaklaşımı da bu çalışmanın farklılıklarından biridir. Yapılan testler sonucunda algoritmanın performansının çok iyi olduğu görülmüştür. Ele alınan gerçek hayat probleminin verileri de benzer çalışmalarda kullanılabilirliği açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın firmaya katkıları ise modeller bazında görev listelerinin düzeltilmesi, öncelik ilişkilerinin ve özel kısıtların belirlenmesi, üretim bandını hiç

etkilemeden bilgisayar ortamında ve dakikalar içerisinde çözüm veren bir yöntemin geliştirilmiş olmasıdır. Mevcut durumda çok modelli hat karışık modelli hatmış gibi dengelenirken ve bu da hem kullanılan istasyon sayılarını hem de hatta oluşan atıl süreyi artırırken, yapılan çalışmalar ile her model için özgün bir dengelemenin yapılması mümkün hale gelmiştir. Mevcut ve önerilen çözümlere bakılacak olursa; önerilen çözüm ile yaklaşık %17 daha az sayıda istasyon ile ve yaklaşık %70 daha az atıl zaman ile aynı üretim seviyesi sağlanmaktadır.

Önerilen yaklaşım ile modeller bazında çok iyi çözümler bulunmuş olsa da çok modelli bu montaj hattında bir modeldeki üretimden bir sonraki modeldeki üretime geçildiğinde hatta yapılmak üzere yeni görevler, artık yapılmayacak olan görevler ve yapıldığı istasyonlar değişen görevler gündeme gelecektir. Bu da hatta bazı ekipmanların yerlerinin değişmesi, işçilere farklı görevlerin atanması gibi sebeplerle bir hazırlık süreci oluşturacaktır. Önerilen çözümde bu geçiş sürecinin sebep olacağı verimlilik kaybı henüz belli değildir.

Birinci tip problemlerde çok iyi sonuçlar veren önerdiğimiz düzeltmeli tavlama benzetimi sezgiselinin ikinci tip problemlere de uyarlanması, ele alınan gerçek hayat probleminin çok modelli yapısının da dikkate alınarak modeller arasındaki ortak işlerin mümkün olduğunca aynı istasyonlara atanarak bir modelden diğer bir modele geçiş sürecindeki verimlilik kaybının da enazlanmaya çalışılması ve modellerin üretim sırasının da belirlenmesi gelecek çalışma konuları arasındadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., Bratcu, A., “State of art of optimization methods for assembly line design”, **Ann. Reviews in Control**, Cilt 26, 163-174, 2002.
2. Scholl, A., Becker, C., “State of the art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing”, **EJOR**, Cilt 168, 666-693, 2006.
3. Becker, C., Scholl, A., “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing”, **EJOR**, Cilt 168, 694-715, 2006.

4. Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., “A classification of assembly line balancing problems”, **EJOR**, Cilt 183, 674-693, 2007.
5. Ponnambalam, S.G., Aravindan, P., Naidu, G.M., “A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 16, 341-352, 2000.
6. Gonçalves, J. F., Almeida J. R., “A Hybrid Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing”, **Journal of Heuristics**, Cilt 8, 629-642, 2002.
7. Yu, J., Yin, Y., “Assembly line balancing based on an adaptive genetic algorithm”, **Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 48, 347-354, 2010.
8. Dou, J., Li, J., Lv, Q., “A Hybrid Particle Swarm Algorithm for Assembly Line Balancing Problem of Type 1”, **Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, China**, 1664-1669, 2011.
9. Lapierre, S.D., Ruiz, A., Soriano, P., “Balancing assembly lines with tabu search”, **European Journal of Operational Research**, Cilt 168, 826-837, 2006.
10. Sabuncuoglu, I., Erel, E., Tanyer, M., “Assembly line balancing using genetic algorithms”, **Journal of Intelligent Manufacturing**, Cilt 11, 295-310, 2000.
11. Baykasoğlu, A., “Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems”, **J. of Intelligent Manufacturing**, Cilt 17, 217-232, 2006.

EK: Görevler, Öncelik İlişkileri, Görev Süreleri, Mevcut ve Önerilen Çözümler[§]

Görev	Ardıl Görevler	Görev Süresi (sn)	Atandığı İstasyon Numarası								
			Mevcut Çözüm				Önerilen Çözüm				
			M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	
1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	278	3,5	-	21	21	21	-	23	23	23	
3	56	2,5	1	1	1	1	4	4	4	20	
4	70	2	18	18	18	18	1	1	1	1	
5	23	3,5	2	2	2	2	1	1	1	1	
6	35	7,2	-	-	3	4	-	-	1	4	
7	24	4,5	1	1	-	-	4	4	-	-	
8	25	0	11	11	11	11	11	11	11	11	
9	50	12,5	3	3	3	3	1	1	1	1	
10	26	12	-	-	-	1	-	-	-	1	
11	27, 60	3,5	3	3	3	3	12	12	12	12	
12	28, 60	3,5	2	2	2	2	4	4	4	4	
13	30	14,6	2	2	2	2	2	2	2	2	
14	29	14,6	5	5	5	5	1	1	1	4	
15	69	2	3	3	3	4	1	1	1	1	
16	31	2,5	3	3	3	3	4	4	4	4	
17	282	3,5	-	1	1	1	-	1	50	1	
18	227	6,5	2	2	2	2	12	12	12	12	
19	282	4,7	1	1	1	1	2	2	2	2	
20	22	5,5	-	-	-	3	-	-	-	1	
21	278	4,7	19	19	19	19	2	2	2	51	
22	58, 60	9,3	-	-	-	3	-	-	-	2	
23	32, 33, 71	4	2	2	2	2	2	2	2	2	
24	35	4,5	3	3	-	-	4	4	-	-	
25	36	6,4	11	11	11	11	11	11	11	11	
26	50	10	-	-	-	3	-	-	-	2	
27	60	3,8	-	3	3	4	-	12	12	12	
28	60	3,8	-	3	3	4	-	11	11	11	
29	60	3,8	5	5	5	5	12	12	12	12	
30	60	3,8	2	2	2	2	2	2	2	2	
31	37	3,1	5	5	5	5	4	4	4	12	
32	34, 35	5,6	2	2	2	2	2	2	2	2	
33	34, 35	3,5	2	2	2	2	4	4	4	4	
34	35	9,5	-	-	3	4	-	-	4	4	
35	38	3	3	3	3	4	4	4	4	4	
36	39	3,5	11	11	11	11	11	11	11	11	
37	85	4,1	5	5	5	5	12	12	12	12	
38	41	4,2	5	5	5	5	4	4	4	4	
39	40	2	11	11	11	11	11	11	11	11	
40	42	2,1	11	11	11	11	11	11	11	11	
41	45, 48, 55	8	5	5	5	5	4	4	4	4	
42	43, 44	4,5	11	11	11	11	11	11	11	11	
43	49	14,5	11	11	11	11	11	11	11	11	
44	60	4,2	11	11	11	-	11	11	11	-	
45	46	3,5	5	5	-	-	4	4	-	-	
46	47	4,5	12	12	-	-	4	4	-	-	
47	48	4,5	12	12	-	-	12	12	-	-	
48	60	6	12	12	12	12	12	12	12	12	
49	50, 53	0	11	11	11	11	11	11	11	11	
50	51	8,9	12	12	12	12	12	12	12	11	
51	52	6,5	12	12	12	12	12	12	12	12	
52	60	3,6	12	12	12	12	12	12	12	12	
53	54	4	11	11	11	11	11	11	11	11	
54	60	3,6	11	11	11	11	11	11	11	11	
55	60	11	-	-	12	12	-	-	4	12	
56	57	3,1	1	1	1	1	11	11	11	20	
57	88	4,1	5	5	5	5	20	20	20	20	
58	59	5,7	-	-	-	4	-	-	-	19	
59	274	5,5	-	-	-	4	-	-	-	28	
60	61, 62, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 81, 82, 83, 84, 123, 218, 219, 265, 266	C	17	17	17	17	17	17	17	17	
61	236	C	22	22	22	22	22	22	22	22	
62	63	7	-	-	-	18	-	-	-	28	

63	64, 67	11	-	-	-	18	-	-	-	28
64	65	2,5	-	-	-	20	-	-	-	30
65	66	3,5	-	-	-	24	-	-	-	33
66	227	3,5	-	-	-	34	-	-	-	33
67	68	3	-	-	-	20	-	-	-	44
68	274	4,5	-	-	-	38	-	-	-	44
69	85, 91	2,5	18	18	18	18	20	20	20	20
70	88, 91	2,5	18	18	18	18	19	19	19	19
71	95	10,7	19	19	19	19	2	2	2	23
72	95	5,9	20	-	-	-	20	-	-	-
73	95	4,9	-	21	21	21	-	23	23	23
74	87	2,9	21	21	21	21	20	20	20	20
75	86	2,9	18	18	18	18	23	23	23	23
76	90	2,5	19	19	19	19	19	19	19	19
77	78	3,9	19	19	19	19	19	19	19	19
78	79	8	19	19	19	19	19	19	19	19
79	80	21	20	20	20	20	19	19	19	19
80	91	1,5	20	20	20	20	19	19	19	19
81	89	2,5	18	18	18	18	19	19	19	19
82	95	5	18	18	18	18	23	23	23	23
83	95	2,7	20	20	20	20	20	20	20	20
84	95	4,5	18	18	18	18	19	19	19	19
85	94	4,3	20	20	20	20	25	25	25	25
86	95	4	19	19	19	19	23	23	23	23
87	95	4	23	23	23	23	20	20	20	20
88	96	4,3	18	18	18	18	20	20	20	20
89	96	1,2	20	20	20	20	26	19	19	19
90	95	1,8	20	20	20	20	23	23	23	23
91	92, 93	6,1	21	21	21	21	20	20	20	20
92	95	7,8	21	21	21	21	20	20	20	20
93	95	7,8	21	21	21	21	20	20	20	20
94	113	4,2	24	24	24	24	25	25	25	25
95	94, 96, 97, 102, 105, 106, 107, 108, 111, 112, 271	2,5	23	23	23	23	23	23	23	23
96	113	4,2	23	23	23	23	26	24	24	24
97	98, 99, 100, 101	2,3	23	23	23	23	23	23	23	23
98	109	3,7	24	24	24	24	24	24	24	24
99	109	3,7	23	23	23	23	25	25	25	25
100	109	3,7	24	24	24	24	24	24	24	24
101	122	5,3	24	24	24	24	25	25	25	25
102	103	2	23	23	23	23	23	23	23	23
103	104	7,4	24	24	24	24	24	24	24	24
104	113	5,5	24	24	24	24	24	24	24	24
105	122	3,8	26	26	26	26	24	24	24	24
106	122	3,9	23	23	-	-	23	23	-	-
107	108	3	23	23	-	-	23	23	-	-
108	122	3,9	23	23	23	-	26	26	26	-
109	110	2,6	26	26	26	26	26	26	26	26
110	122	4,5	26	26	26	26	26	26	26	26
111	122	8,5	23	-	23	-	23	-	23	-
112	113, 114	5,5	23	23	23	23	23	23	23	23
113	133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 151, 152, 153	3	24	24	24	24	26	25	25	25
114	115, 116	3,8	23	23	23	23	24	24	24	24
115	117	3,5	25	25	25	25	24	24	24	24
116	117	4,5	26	26	26	26	24	24	24	24
117	118, 119	2,2	26	26	26	26	24	24	24	24
118	120, 121	6,3	27	27	27	27	25	25	25	25
119	120, 121	5,8	27	27	27	27	24	24	24	24
120	122	9,5	27	27	27	27	25	26	26	26
121	122	9,5	28	28	28	28	25	25	25	25
122	124, 220	7,5	28	28	28	28	26	26	26	26
123	203	2,5	19	19	19	19	24	24	24	24
124	125	9	28	28	28	28	26	26	26	26
125	126	0,5	28	28	28	28	27	27	27	27
126	127, 128, 129	3,7	28	28	28	28	27	27	27	27
127	130	11,6	30	30	30	30	28	27	27	27
128	130	7,8	30	30	30	30	27	27	27	27
129	130	7,8	31	31	31	31	38	38	38	38
130	131	6,5	32	32	32	32	38	38	38	38
131	132	0,5	38	38	38	38	52	52	52	52
132	293, 294	2,7	38	38	38	38	53	52	53	52
133	157	4,5	27	27	27	27	28	25	25	25

134	157	8,5	25	25	25	25	28	30	30	30
135	157	4,5	26	26	26	26	30	30	30	30
136	157	3,5	27	27	27	27	26	26	26	26
137	157	3,9	27	27	-	-	26	27	-	-
138	157	4,2	30	30	30	30	28	25	25	25
139	157	4,5	-	27	-	27	-	25	-	25
140	141	3	24	24	24	24	26	26	26	26
141	157	7,5	26	26	26	26	27	26	26	26
142	156	3	-	-	-	25	-	-	-	26
143	144	3	-	24	-	24	-	26	-	26
144	157	9	-	25	-	25	-	27	-	27
145	147	3	25	25	25	25	27	27	27	27
146	157	3	25	25	25	25	28	27	27	27
147	157	5,5	25	25	25	25	28	27	27	27
148	157	4,5	25	25	25	25	27	27	27	27
149	157	3,9	30	-	30	-	28	-	25	-
150	157	7	-	-	-	25	-	-	-	27
151	157	3,9	27	27	27	-	30	30	30	-
152	154	6,5	-	-	-	26	-	-	-	28
153	155	4,3	-	-	-	24	-	-	-	28
154	157	6,5	-	-	-	26	-	-	-	28
155	157	6,4	-	-	-	27	-	-	-	28
156	157	5,6	-	-	-	26	-	-	-	28
157	171, 172, 173, 174, 177, 178, 181	2,5	30	30	30	30	30	30	30	30
158	159	1	29	29	29	29	29	29	29	29
159	160, 163, 171	2,5	29	29	29	29	29	29	29	29
160	161, 165	2,8	29	29	29	29	29	29	29	29
161	162, 170	7	29	29	29	29	29	29	29	29
162	169	2,8	-	-	-	29	-	-	-	29
163	164	2,5	29	29	29	29	29	29	29	29
164	166	2,8	29	29	29	29	29	29	29	29
165	166	3,6	29	29	29	29	29	29	29	29
166	167	3,1	29	29	29	29	29	29	29	29
167	168	3,2	29	29	29	29	29	29	29	29
168	170	4,5	29	29	29	29	29	29	29	29
169	170	5,5	-	-	-	29	-	-	-	29
170	157	2	29	29	29	29	29	29	29	29
171	205	2,5	32	32	32	32	32	32	32	32
172	175	3	30	30	30	30	30	30	30	30
173	176	3	31	31	31	31	30	30	30	30
174	182	4	30	30	30	30	30	30	30	30
175	182	4	31	31	31	31	30	30	30	30
176	182	4	31	31	31	31	30	30	30	30
177	179	3	30	30	30	30	30	30	30	30
178	180	3	30	30	30	30	30	30	30	30
179	182	4	31	31	31	31	30	30	30	30
180	182	4	31	31	31	31	30	30	30	30
181	182	4	30	30	30	30	30	30	30	30
182	183	3	31	31	31	31	31	31	31	31
183	184, 185, 186, 187	3,5	31	31	31	31	31	31	31	31
184	188, 189, 195, 196	4,9	31	31	31	31	31	31	31	31
185	188, 189, 195, 196	4,9	31	31	31	31	31	31	31	31
186	278	4	38	38	38	38	50	33	44	33
187	282	4	38	38	38	38	38	38	38	38
188	189	13	-	32	-	32	-	31	-	31
189	190	3,5	32	32	32	32	31	31	31	31
190	191	18	33	33	33	33	31	32	31	32
191	192, 207, 208	6	33	33	33	33	32	32	32	32
192	193	4,5	-	33	-	33	-	33	-	33
193	194	5,2	-	33	-	33	-	33	-	33
194	207, 208, 210	9,5	-	34	-	34	-	33	-	33
195	199	3,5	33	33	33	33	38	38	38	38
196	197, 198	2,9	31	31	31	31	31	31	31	31
197	200	4,7	32	32	32	32	31	31	31	31
198	200	6,5	-	32	-	32	-	31	-	31
199	234	C	43	43	43	43	43	43	43	43
200	201	3,7	32	32	32	32	32	32	32	32
201	202, 204	0,3	32	32	32	32	32	32	32	32
202	204	5,2	-	32	-	32	-	32	-	32
203	204	5,9	21	21	21	21	27	31	31	31
204	205	4,2	33	33	33	33	32	32	32	32
205	206	6,5	33	33	33	33	32	32	32	32

206	209	5,4	34	34	34	34	32	32	32	32
207	210	4,5	34	34	34	-	32	33	32	-
208	210	4,5	34	34	34	-	32	33	32	-
209	210, 211	2,5	34	34	34	34	32	33	32	33
210	217	2,4	34	34	34	34	32	33	32	33
211	212	4,5	34	34	34	34	32	38	32	38
212	213	5,5	34	34	34	34	38	38	38	38
213	214	2,5	34	34	34	34	38	38	38	38
214	215	4,2	38	38	38	38	38	38	38	38
215	216	3	38	38	38	38	38	38	38	38
216	217	8,4	38	38	38	38	38	38	38	38
217	227	2,5	44	44	44	44	44	38	44	38
218	274, 275, 276, 277, 280, 281	6,5	19	19	19	19	23	23	23	23
219	274, 275, 276, 277, 280, 281	6,5	21	21	21	21	28	20	20	20
220	221, 222, 223, 224, 225	0,5	28	28	28	28	27	33	27	33
221	226	3,2	28	28	28	28	27	33	27	33
222	226	3,2	28	28	28	28	27	33	27	33
223	226	3,2	28	28	28	28	27	33	27	33
224	226	3,2	28	28	28	28	27	33	27	33
225	226	3	-	28	-	28	-	33	-	33
226	227, 233	0,5	28	28	28	28	27	33	27	33
227	228, 229	5,5	44	44	44	44	44	44	44	44
228	230	0	44	44	44	44	44	44	44	44
229	230	0	44	44	44	44	44	44	44	44
230	231	2,1	44	44	44	44	44	44	44	44
231	232	10,6	44	44	44	44	44	44	44	44
232	235	2,1	44	44	44	44	44	44	44	44
233	234	2,1	38	38	38	38	38	38	38	38
234	235	1	44	44	44	44	44	44	44	44
235	237, 274, 275, 276, 277, 280, 281	5,5	44	44	44	44	44	44	44	44
236	237	4,3	38	38	38	38	25	25	25	25
237	238, 239	C	45	45	45	45	45	45	45	45
238	308	C	54	54	54	54	54	54	54	54
239	240, 242, 248	0,5	49	49	49	49	49	49	49	49
240	241, 247	3	49	49	49	49	49	49	49	49
241	244	10,2	49	49	49	49	49	49	49	49
242	243	0	49	49	49	49	49	49	49	49
243	245	6,8	49	49	49	49	49	49	49	49
244	249	0	49	49	49	49	49	49	49	49
245	246	2,1	49	49	49	49	49	49	49	49
246	249	2,1	49	49	49	49	49	49	49	49
247	249	5,8	49	49	49	49	49	49	49	49
248	249	3,5	49	49	49	49	49	49	49	49
249	250, 251	0,5	49	49	49	49	49	49	49	49
250	267, 268	3,5	49	49	49	49	49	49	49	49
251	252	0,5	50	50	50	50	51	50	51	50
252	253, 254, 259, 260, 261, 262	4,3	50	50	50	50	51	50	51	50
253	256	0,8	50	50	50	50	51	50	51	50
254	255	2,1	50	50	50	50	51	50	51	50
255	256	0,5	50	50	50	50	51	50	51	50
256	257	0,5	50	50	50	50	51	50	51	50
257	258	4,5	50	50	50	50	51	50	51	50
258	263	4,9	50	50	50	50	51	50	51	50
259	263	3,5	50	50	50	50	51	50	51	50
260	263	2,1	50	50	50	50	51	50	51	50
261	263	4,9	50	50	50	50	51	50	51	50
262	263	2	50	50	50	50	51	50	51	50
263	264	1	50	50	50	50	51	50	51	50
264	293, 294	0,5	50	50	50	50	51	50	51	50
265	308	7,1	55	55	55	55	55	55	55	55
266	269, 270	2,5	38	38	38	38	52	19	52	19
267	269, 270	6,8	49	49	49	49	50	50	50	50
268	269, 270	0,8	49	49	49	49	52	49	52	49
269	289	5,1	50	50	50	50	52	50	52	50
270	289	3,9	50	50	50	50	52	51	52	51
271	272, 273	5,9	38	38	38	38	51	52	51	52
272	293, 294, 299	2,8	53	53	53	53	53	52	53	52
273	293, 294	2,8	53	53	53	53	53	52	53	52
274	275, 276, 277, 280, 281	4,1	-	-	-	44	-	-	-	44
275	278	7,8	-	-	50	50	-	-	56	51
276	278	2,9	44	44	44	44	49	44	44	44
277	278	2,3	49	49	49	49	49	44	49	44

278	279	15	51	51	51	51	50	49	49	51
279	284, 286	4,1	51	51	51	51	50	50	50	51
280	282	7,8	-	-	44	44	-	-	44	44
281	282	2,9	44	44	44	44	44	44	44	44
282	283	15	51	51	51	51	44	44	50	49
283	284, 285	4,1	51	51	51	51	49	44	50	50
284	287	8	52	52	52	52	51	51	51	51
285	287	7,8	52	52	52	52	50	50	50	50
286	287	7,8	51	51	51	51	50	51	50	51
287	289, 290, 291, 292	3	52	52	52	52	52	51	52	52
288	293, 294	3	52	52	52	52	52	51	52	52
289	288	2,7	52	52	52	52	52	51	52	52
290	288	7,8	52	52	52	52	52	51	52	52
291	288	7,8	52	52	52	52	52	51	52	52
292	288	7,8	52	52	52	52	52	51	52	52
293	298, 300, 301, 305, 306	0,5	55	55	55	55	55	55	55	55
294	295, 296, 297	0,5	53	53	53	53	53	52	53	56
295	313	22	53	53	53	53	53	52	53	56
296	313	2,8	53	53	53	53	53	52	53	56
297	313	9	53	53	53	53	53	52	53	56
298	302	5,5	55	55	55	55	55	55	55	55
299	313	3,5	53	53	53	53	53	52	53	52
300	304	3,2	55	55	55	55	55	55	55	55
301	304	5,3	55	55	55	55	55	55	55	55
302	303	1,5	55	55	55	55	55	55	55	55
303	304	2,8	55	55	55	55	55	55	55	55
304	307	2,7	55	55	55	55	55	55	55	55
305	308	4,5	55	55	55	55	55	55	55	55
306	308	5,5	55	55	55	55	55	55	55	55
307	308	1	55	55	55	55	55	55	55	55
308	309, 310, 311, 312	0,5	55	55	55	55	55	55	55	55
309	-	20	56	56	56	56	56	56	56	56
310	-	5,1	56	56	56	56	56	56	56	55
311	-	5,1	56	56	56	56	56	56	56	55
312	-	5,5	56	56	56	56	56	56	56	55
313	-	0,5	53	53	53	53	53	52	53	56

‡ Bir görev için görev süresinin C olması o görevin özel bir istasyonda tek başına yapıldığını göstermektedir. Bu şekilde o istasyona başka görevlerin atanması engellenmiştir. Bir görev için görev süresinin sıfır olması, o görevin hatta robot tarafından yapılan bir görevle aynı anda ve iş gören tarafından robota paralel olarak yapıldığı içindir. Görev süresi robotun görev süresinden kısa olduğu için sıfır olarak alınmıştır. Aynı istasyonda yapılması gereken görevler gruplandırılarak tek bir görev gibi alınmış, öncelik ilişkileri buna göre düzeltilmiş ve önerilen yöntemle bu görevlerin aynı istasyona atanması sağlanmıştır. Bir görevin süresi, yer aldığı modelden modele değişmemektedir. Mevcut ve önerilen çözümlerde bir görevin atandığı istasyonun girilmemiş olması o görevin o modelde olmadığını göstermektedir. Öncelik ilişkileri tüm görevleri kapsayan birleştirilmiş öncelik ilişkileri şebekesine göre verilmiştir. Bir modele ait öncelik ilişkileri serimi oluşturulurken bir görev o modelde bulunmuyorsa yukarıdaki listede o görevin öncülü olan görevlerin her biri o görevin ardılı olan her bir görevin öncülü olarak alınır.