İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK SİPÂRİŞ TİPİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE MÜŞTERİ SİPÂRİŞLERİNİN ÇİZELGELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Hakan TEKBAŞ

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği

Programı : Endüstri Mühendisliği

MAYIS 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK SİPÂRİŞ TİPİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE MÜŞTERİ SİPÂRİŞLERİNİN ÇİZELGELENMESİ

DOKTORA TEZİ
Hakan TEKBAŞ
(507042106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat BASKAK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Bülent DURMUŞOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ (MALT. Ü.)
Prof. Dr. Hüseyin BAŞLIGİL (YTÜ)
Doç. Dr. Ferhan ÇEBİ (İTÜ)

MAYIS 2011

ÖNSÖZ

Günümüzde müşteriler en kaliteli ürünleri, en az mâliyetle en uygun teslim tarihinde sunabilecek firmaları yeğlemektedir. Firmalar da sahip oldukları kısıtlı kaynaklarla, müşterilerin isteklerini, stratejileri doğrultusunda dengeli bir şekilde karşılarken mâliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu zor amaca ulaşmak için firmalar, plânlama bölümleri kurmaktadır. Yüzlerce işlemin plânlanmasının ve kontrol edilmesinin zorluğu nedeniyle, plânlama programlarıyla plânlama etkinlikleri gerçekleştirilip, olası sapmalar belirlenerek müşteri hoşnutluğu sağlanmaktadır.

Plânlama programları, ilk zamanlarda işi başlatma kurallarını kullanarak çizelge oluşturmaktaydı. Zamanla, daha farklı yöntemleri kullanan plânlama programları geliştirilmeye başlandı. Ancak gerçek bir üretim ortamının birbirinden farklı özellikleri, çok sayıda işlemin plânlanması gerekliliği ve problemin sınırları aşan zorluğu, iyi bir plânlama algoritmasının üretilmesini engellemektedir. Birçok plânlama programcısı, iyi sonuçları üreten ancak bunu kısa CPU işlem sürelerinde gerçekleştirebilen algoritmaları, akademik makalelerde aramaktadır. Bu nedenle literatüre sunulan algoritmalar, firmaların faaliyetlerini daha etkin plânlamalarına katkı sağlamaktadır.

Literatüre sunulan çok sayıda plânlama algoritması, çok farklı özelliklere sahip yöntemleri, çok farklı özelliklerde üretim ortamlarını temel almaktadır. En genel problemde çalışma yapılması durumunda, oluşturulacak algoritmanın gerçek uygulamalara uyarlanabilmesi kolaylaşacaktır. Gerçek bir üretim ortamında sipârişlerin ürünlerden, ürünlerin işlemlerden oluştuğunu düşünecek olursak, “sipâriş-ürün-işlem” üçlüsü olan müşteri sipârişleri çizelgeleme problemine odaklanılması, bu düşünceye uygun olacaktır. Bu nedenle bir işlemi yapmaya yetkin çoklu alternatif makinalara ve tüm akışların en genel hâline sahip esnek sipâriş tipi çizelgeleme probleminin müşteri sipârişleri çizelgeleme problemiyle bütünleştirilmesi de günümüz üretim ortamlarının taleplerini karşılamak açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında, müşteri sipârişleri çizelgeleme ve esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemleri birleştirilmiştir. Oluşturulan problemin çözümünde yeni bir yaklaşıma sahip Çift Katmanlı Tavlama Benzetimi Algoritması önerilmiştir. Geliştirilen algoritma, kuramsal ve gerçek uygulamalarda sınanarak, sonuçları sunulmuştur.

Bu çalışmanın her aşamasında, konu ile ilgili bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, ilgi ve önerilerini hiç bir zaman esirgemeyen, tez danışmanlığımı özenle yürüten değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Murat BASKAK’a, tez çalışmalarımın izlenmesinde ve değerlendirilmesinde değerli katkılarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof.Dr. M.Bülent DURMUŞOĞLU ve Prof.Dr. Mehmet TANYAŞ’a ve manevî destekleri için aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Hakan TEKBAŞ
Makina Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. SIRALAMA VE ÇİZELGELEME KONUSUNDA GENEL BİLGİLER **7**
3. YAYIN İNCELEMESİ **19**
3.1 ESTÇP Literatürü 19
3.1.1 Tip 1 ESTÇP 20
3.1.2 Tip 2 ESTÇP 22
3.2 MSÇP Literatürü 30
3.3 Literatür Araştırması Sonuçlarının Değerlendirilmesi 34
4. ÇÖZÜLECEK ÇİZELGELEME PROBLEMİ VE ÇÖZÜM İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEMBİLİM **41**
4.1 Problem 41
4.1.1 Problemin tanımı 41
4.1.2 Problemin performans ölçütleri 42
4.1.3 Problemin varsayımları 42
4.1.4 Matematiksel model 44
4.2 Önerilen Algoritma 47
4.2.1 Giriş 47
4.2.2 Önerilen algoritmada uyum değerini enküçüklemek için kullanılan felsefe 48
4.2.3 Çalışma ilkesi 49
4.2.3.1 Ön plânlama 51
4.2.3.2 Plânlama 54
4.2.3.3 Algoritma 2 58
4.2.3.4 Algoritma 3 71
4.2.3.5 Algoritma 4 82
4.3 Rassal Tavlama Benzetimi Algoritması 95
4.3.1 Rassal tavlama benzetimi algoritmasının önemli parçaları 96
4.3.1.1 Temsil 96
4.3.1.2 İlk çözüm 96
4.3.1.3 Uyum değeri 98
4.3.1.4 Komşu çözüm 98
4.3.1.5 Soğuma stratejisi 98
4.3.1.6 Durdurma ölçütü 99
4.3.1.7 Parametre değerlerinin belirlenmesi 99
4.3.2 Rassal tavlama benzetimi algoritmasının çalışma mantığı 99
5. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN PERFORMANSININ SINANMASI **101**
5.1 Giriş 101

5.2 Geliştirilen Plânlama Programının Veri Alışveriş Sistematiği 101
5.3 Deneysel Çalışma 104
5.3.1 Problemler 104
5.3.2 Sonuçlar ve değerlendirmeler 108
5.3.3 Çıkarımlar 120
5.4 Gerçek Uygulama 123
5.4.1 Giriş 123
5.4.2 Uygulama yapılan yerin ve sürecin özellikleri 123
5.4.3 Uygulama yapılan yerin ve sürecin özelliklerinin önerilen algoritmaya uyarlanması 126
5.4.4 Uygulama çalışmasına konu olan problemin özellikleri 127
5.4.5 Sonuçlar 128
5.4.6 Çıkarımlar 131
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 135
KAYNAKLAR 141
EKLER 147
ÖZGEÇMİŞ 191

KISALTMALAR

1	**:** Tek makinalı çizelgeleme problemi
a	**:** Makina sayısı
$\mathbf{B_{m,i,j,k}}$	**:** i. sipârişin j. ürününün k. işleminin m. makinaya yüklenmesi durumunu gösteren 0-1 değişkeni
$\mathbf{C_j}$	**:** j. işin/sipârişin tamamlanma zamanı
$\mathbf{C_{max}}$	**:** Yayılma süresi
$\mathbf{C_{m,i,j,k,i',j',k'}}$	**:** m. makinada i. sipârişin j. ürününün k. işlemini i'. sipârişin j'. ürününün k'. işlemi takip etmesi durumunu gösteren 0-1 değişkeni
CPU	**:** İşlemci
$\mathbf{d_i}$	**:** i. sipârişin teslim tarihi
DOE	**:** Deney tasarımı
ESTÇP	**:** Esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemi
Enb	**:** Enbüyüklemek
Enk	**:** Enküçüklemek
E()	**:** Beklenen değer
$\mathbf{F_{i,j,k}}$	**:** i. sipârişin j. ürününün k. işleminin tamamlanma zamanı
FFc	**:** c iş merkezli esnek akış tipi üretim
FJc	**:** c iş merkezli esnek sipâriş tipi üretim
Fm	**:** m makinalı akış tipi üretim
GA	**:** Genetik algoritma
Inf	**:** Sonsuz
Ing	**:** İngilizce
Jm	**:** m makinalı sipâriş tipi üretim
k	**:** Boltzman sabiti
KKO	**:** Karınca kolonisi optimizasyonu
$\mathbf{L_{max}}$	**:** En büyük gecikme süresi
M	**:** Çok büyük bir sayı (100.000 gibi)
MSÇP	**:** Müşteri sipârişlerinin çizelgelenmesi problemi
Mx	**:** x. makina
N	**:** Sipâriş sayısı
NP-zor	**:** En az "polinomiyel zamanlı olmayan en zor problem kadar zor olan"
$\mathbf{o_j}$	**:** j. ürünün işlem sayısı
Om	**:** m makinalı serbest dolaşımlı atölye
Oxy	**:** x. ürünün y. işlemi
O.H.S	**:** Ortalama hazırlık süresi
O.M.H	**:** İşlemlerin en hızlı kaçıncı makinaya yüklendiğinin ortalaması
$\mathbf{p_i}$	**:** i. etkinliğin işlem süresi (Bölüm 2)
$\mathbf{p_{j,k}}$	**:** j. ürünün k. işleminin tahmini işlem süresi (Bölüm 5)
$\mathbf{p_{m,j,k}}$	**:** j. ürünün k. işleminin m. makinadaki işlem süresi (Bölüm 4, 5)
Pm	**:** m adet özdeş paralel makina
Px	**:** x. ürün (Bölüm 5)
Prob	**:** Olasılık
PSO	**:** Parçacık sürü optimizasyonu
P.Y.İ.S	**:** Paralel yapılan işlem sayısı
Qm	**:** m adet farklı hızlı paralel makina
R	**:** Teslim tarihini belirleme ifâdelerindeki aralık katsayısı (Bölüm 5)
r	**:** Serbest kalma zamanı (Bölüm 2, 4)

$r_{i,j}$: i. sipârişte j. üründen talep edilen miktar (Bölüm 4, 5)
r_{ik} : i. etkinliğin k. kaynakta kapasite kullanım miktarı (Bölüm 2)
R_k : k. kaynağın kapasitesi (Bölüm 2)
Ram : Sanal disk
Rm : m adet ilişkisiz paralel makina
$S_{i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işleminin başlangıç zamanı
$SET_{j,k,j'k'}$: j. ürünün k. işleminden sonra j'. ürünün k'. işlemi gelirse hazırlık süresi
sn : Saniye
t : Zaman (An)
T : Metropolis İfâdesinde kullanılan sıcaklık (Bölüm 4)
T_{oran} : Teslim tarihini belirleme ifâdesinde geciken sipâriş oranı (Bölüm 5)
T_j : j. işin/sipârişin teslim gecikmesi süresi (Bölüm 2 ve 4)
T_{ort} : Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi
TA : Tabu araştırması
TB : Tavlama benzetimi
u_i : i. sipârişin ürün sayısı
U_j : j. işin gecikip gecikmediğini gösteren 0-1 değişkeni
U( ) : Düzgün dağılım
w_j : j. işin ağırlık katsayısı
$X_{m,i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işlemin m. makinada ilk işlem olması durumunu gösteren 0-1 değişkeni
$Y_{m,i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işlemin m. makinada son işlem olması durumunu gösteren 0-1 değişkeni
α1 : İşlemin en erken başlama zamanı
α2 : İşlemin en erken tamamlanma zamanı
α3 : Öncül işlemin başlangıç zamanı
α4 : Ardıl işlem paralel işlenirse en erken başlangıç zamanı
α5 : Öncül işlemin tamamlanma zamanı
α6 : Ardıl işlem paralel işlenirse en erken tamamlanma zamanı
δE : Enerji farkı (Metropolis İfâdesi)
μ : Teslim tarihini belirlemede kullanılan ara ifâde
Δ : İterasyon sonunda bir önceki çözüme göre kötüleşme değeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Literatürde problemleri anlatmak için kullanılan Graham gösterimi (Zhu ve Wilhelm, 2006). 12
Çizelge 3.1 : Literatür araştırması sonuçlarının özeti. 35
Çizelge 3.2 : Literatür araştırması sonuçları. 36
Çizelge 4.1 : Ön plânlama aşamasını açıklayan örnek problem. 54
Çizelge 4.2 : Tek katmanlı TB metasezgiselinin çalışma örneği. 59
Çizelge 4.3 : Sipâriş-iş bazlı gösterim. 61
Çizelge 4.4 : Ön plânlamada parametre değerlerinin belirlenmesi. 66
Çizelge 4.5 : Plânlama aşamasında kullanılan parametre değerleri. 66
Çizelge 4.6 : Algoritma 2'nin nasıl çalıştığını gösteren örnek. 68
Çizelge 4.7 : Şekil 4.12'de verilen Gantt diyagramı için kritik yol kümesi. 72
Çizelge 4.8 : Algoritma 3 ve 4'ün anlatımında kullanılan problemin verileri. 76
Çizelge 4.9 : Tek işlem yer değiştirme algoritmasının komşu çözümleri değerlendirme sonuçları. 81
Çizelge 4.10 : Çizelge 4.9'da verilen tablonun kritik işlemlere göre gruplanmış hali. 82
Çizelge 4.11 : Şekil 4.22'de elde edilen çözümün temsili (kromozomu)..... 86
Çizelge 4.12 : Algoritma 4 ile sınanan komşu çözümlerin etki değerleri raporu. 91
Çizelge 4.13 : Geri çağrılan çözümde reddedilen kritik yolun kullanımının neden olduğu performans artışı. 93
Çizelge 4.14 : Yüklemede komşu çözüm oluşturma. 98
Çizelge 4.15 : Sıralamada komşu çözüm oluşturma. 98
Çizelge 4.16 : Rassal TB algoritmasının belirlenecek parametreleri ve aralıkları.. 100
Çizelge 5.1 : HAZIRLIK sayfasının yapısı. 103
Çizelge 5.2 : VADE sayfasının yapısı. 103
Çizelge 5.3 : MIKTAR sayfasının yapısı. 103
Çizelge 5.4 : ISLEMSUR sayfasının yapısı. 103
Çizelge 5.5 : ISLEMSAY sayfasının yapısı. 104
Çizelge 5.6 : Oluşturulan problemlerin özellikleri. 106
Çizelge 5.7 : İfade (5.3)'ü belirlemek için oluşturulan deneme problemleri ve sonuçları. 107
Çizelge 5.8 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması performans farkı. 109
Çizelge 5.9 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması performans farkının 0,05 önem düzeyinde karşılaştırması. 111
Çizelge 5.10 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının diğer istatistikleri. . 112
Çizelge 5.11 : Yayılma süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları. 115
Çizelge 5.12 : Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları. 115
Çizelge 5.13 : Uyum değeri için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları. 116
Çizelge 5.14 : Ortalama hazırlık süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları. 116

Çizelge 5.15 : Ortalama makina hızı için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları. 117
Çizelge 5.16 : Önerilen algoritmanın parametre değerleri düşürülmesi durumunda sonuçlar..... 119
Çizelge 5.17 : Önerilen algoritma - rassal TB algoritması performans farkının parametre bâzında değişimi. 121
Çizelge 5.18 : Uygulama çalışmasında çizelgelenecek problemin özellikleri..... 128
Çizelge 5.19 : Ürünlerin istasyonlardaki akışları. 128
Çizelge 5.20 : Önerilen algoritmanın belirlenecek parametre değerleri. 129
Çizelge 5.21 : Rassal TB algoritmasının belirlenecek parametre değerleri. 129
Çizelge 5.22 : Uygulama probleminde elde edilen en iyi sonuçlar. 130
Çizelge 5.23 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının deney tasarımı sonuçları..... 131
Çizelge 5.24 : Önerilen algoritmanın parametre değerleri azaltıldığında elde edilen sonuçlar..... 131
Çizelge 5.25 : Çizelge 5.22'de sunulan sonuçların diğer istatistikleri. 131
Çizelge B.1 : Test problemlerinde önerilen algoritmanın kullandığı parametre değerleri. 151
Çizelge B.2 : Test problemlerinde rassal TB algoritmasının kullandığı parametre değerleri. 152

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Makina bazlı Gantt diyagramı (Brucker, 2007).....8
Şekil 2.2 : İş bazlı Gantt diyagramı (Brucker, 2007). 8
Şekil 2.3 : Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması. 9
Şekil 2.4 : Kısıtlı kaynaklı proje çizelgeleme problemi örneği (Brucker ve Knust, 2006).....9
Şekil 2.5 : Akış tipi çizelge örneği.....11
Şekil 2.6 : Sipâriş tipi çizelge örneği.....11
Şekil 2.7 : Serbest dolaşımlı çizelge örneği.....11
Şekil 2.8 : Çizelgelemede makina sayısına ve akış tipine bağlı karmaşıklık yapısının değişimi (Brucker 2007; Pinedo 2008).....14
Şekil 2.9 : Makina çizelgelemede performans ölçütüne bağlı karmaşıklık yapısının değişimi (Brucker 2007; Pinedo 2008).....14
Şekil 2.10 : Çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntembilimleri (Brucker, 2007). 15
Şekil 2.11 : İş-kesme içermeyen sipâriş tipi çizelgeleme problemlerinde çizelge sınıflarının Venn diyagramında gösterimi (Pinedo, 2008). 16
Şekil 2.12 : Gecikme olmayan çizelgeye bir örnek (Pinedo, 2008). 16
Şekil 2.13 : Yarı-aktif ve aktif çizelge örnekleri. 17
Şekil 4.1 : Sipâriş 1'in teslim tarihi 109 olduğu durumda elde edilen en iyi Gantt diyagramı. 50
Şekil 4.2 : Sipâriş 1'in teslim tarihi 80 olduğu durumda elde edilen en iyi Gantt diyagramı. 50
Şekil 4.3 : Önerilen algoritmada hangi akış diyagramının hangi algoritmayı kullandığını gösteren akış diyagramı. 51
Şekil 4.4 : Ana akış diyagramı.....52
Şekil 4.5 : Sipâriş 1 ve 2'nin plânlama sonucu. 55
Şekil 4.6 : Sipâriş 1, 2 ve 4'ün plânlama sonucu. 55
Şekil 4.7 : Ön plânlama sonucu. 55
Şekil 4.8 : Plânlama aşamasının sonucu. 57
Şekil 4.9 : Algoritma 2'nin akış diyagramı.....61
Şekil 4.10 : Temsili kullanarak çizelgenin nasıl oluşturulduğunu gösteren akış diyagramı. 62
Şekil 4.11 : Çizelge 4.3'de verilen temsilin çizelgeye dönüştürülmesi.....63
Şekil 4.12 : Kritik yolun belirlenmesi.....72
Şekil 4.13 : Algoritma 3'ün akış diyagramı. 73
Şekil 4.14 : Algoritma 3'ün etki analizi hesabı. 75
Şekil 4.15 : Tek işlem yer değiştirme algoritması Algoritma 3'ü çalıştırmadan önceki çözümü. 76
Şekil 4.16 : 352 numaralı işlem 1. makinada 3. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 77
Şekil 4.17 : 352 numaralı işlem 2. makinada 4. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 78
Şekil 4.18 : 352 numaralı işlem 3. makinada 6. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 78

Şekil 4.19 : 231 numaralı işlem 1. makinada 1. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 79
Şekil 4.20 : 231 numaralı işlem 1. makinada 2. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 80
Şekil 4.21 : 231 numaralı işlem 3. makinada 1. sıraya atandığında Gantt diyagramı. 80
Şekil 4.22 : Algoritma 3'ün belirlediği komşu çözüm. 82
Şekil 4.23 : Algoritma 4'ün akış diyagramı. 83
Şekil 4.24 : Algoritma 4'ün etki analizinin akış diyagramı. 84
Şekil 4.25 : 112-121 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 86
Şekil 4.26 : 112-122 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 87
Şekil 4.27 : 112-231 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 88
Şekil 4.28 : 112-232 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 88
Şekil 4.29 : 112-241 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 89
Şekil 4.30 : 112-242 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 89
Şekil 4.31 : 112-351 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 90
Şekil 4.32 : 112-352 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 90
Şekil 4.33 : 112-362 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 90
Şekil 4.34 : 112-361 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı. .. 91
Şekil 4.35 : En son kabul edilen çözümde reddedilen çözümün kritik yolunun kullanılması..... 94
Şekil 4.36 : Rassal TB algoritmasının akış diyagramı. 97
Şekil 5.1 : Plânlama programının veri alışveriş yapısı. 102
Şekil 5.2 : Excel'de veri giriş ekranının sayfaları. 102
Şekil 5.3 : Problem 3bx için önerilen algoritmanın uyum değeri-iterasyon sayısı grafiği..... 114
Şekil 5.4 : Problem 3bx için rassal TB algoritmasının uyum değeri-iterasyon sayısı grafiği..... 114
Şekil 5.5 : İşlem sayısı ve makina sayısına göre yayılma süresi ortalama farkının değişimi. 115
Şekil 5.6 : İşlem sayısı ve sipâriş gecikme oranına göre ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ortalama farkının değişimi. 116
Şekil 5.7 : İşlem sayısı, sipâriş gecikme oranı ve hazırlık süresine göre ortalama hazırlık süresi farkının değişimi. 117
Şekil 5.8 : Ortalama hazırlık süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının işlem sayısı ve sipâriş gecikme oranına bağlı etkileşim grafiği. 118
Şekil 5.9 : İşlem sayısına göre ortalama makina hızının değişimi. 118
Şekil 5.10 : Fabrikada bulunan makinaların ve istasyonların krokisi..... 124
Şekil A.1 : Visual Studio 2008'de üretilen Gantt diyagramı ve Gantt diyagramının açıklamaları. 149
Şekil C.1 : Problem 1ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 143; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 4. 153
Şekil C.2 : Problem 1hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 153; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 9. 153
Şekil C.3 : Problem 1ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 152; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 30,5. 154
Şekil C.4 : Problem 1bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 156; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 42,5. 154
Şekil C.5 : Problem 2ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 253; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 155
Şekil C.6 : Problem 2hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 275; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 155
Şekil C.7 : Problem 2ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 261; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 27,5. 156

Şekil C.8 : Problem 2bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 289; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 38. 156
Şekil C.9 : Problem 3ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 54; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0..... 157
Şekil C.10 : Problem 3hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 60; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 158
Şekil C.11 : Problem 3ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 59; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 3,5. 159
Şekil C.12 : Problem 3bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 65; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 6. 160
Şekil C.13 : Problem 4ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 175; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 161
Şekil C.14 : Problem 4hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 191; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 162
Şekil C.15 : Problem 4ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 179; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 20,5. 163
Şekil C.16 : Problem 4bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 194; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 26,5. 164
Şekil C.17 : Problem 5ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 172; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 165
Şekil C.18 : Problem 5hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 203; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 166
Şekil C.19 : Problem 5ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 184; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 167
Şekil C.20 : Problem 5bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 214; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 5,33. 168
Şekil C.21 : Problem 6ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 80; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 169
Şekil C.22 : Problem 6hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 92; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 170
Şekil C.23 : Problem 6ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 85; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 8. 171
Şekil C.24 : Problem 6bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 92; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 13. 172
Şekil C.25 : Problem 7ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 117; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 173
Şekil C.26 : Problem 7ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 117; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0 (alternatif çözüm). 174
Şekil C.27 : Problem 7hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 137; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 3,75. 175
Şekil C.28 : Problem 7ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 124; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 13. 176
Şekil C.29 : Problem 7bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 139; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 21,5. 177
Şekil C.30 : Problem 8ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 171; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 178
Şekil C.31 : Problem 8hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 200; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,33. 179
Şekil C.32 : Problem 8ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 191; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 12,83. 180
Şekil C.33 : Problem 8bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 210; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 26,50. 181
Şekil C.34 : Problem 9hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 112; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,67. 182

Şekil C.35 : Problem 10hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 81; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0. 183
Şekil C.36 : Problem 11hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 133; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,5. 184
Şekil C.37 : Problem 12hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 80; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,22. 185
Şekil D.1 : Uygulama probleminin önerilen algoritma ile çözümü: Yayılma süresi 6637; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 36,78. 187
Şekil D.2 : Uygulama probleminin fabrika plânlama programı ile çözümü: Yayılma süresi 6767; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 85,92. 188
Şekil D.3 : Uygulama probleminin rassal TB algoritması ile çözümü: Yayılma süresi 6632; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 164,57. 189

ESNEK SİPÂRİŞ TİPİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE MÜŞTERİ SİPÂRİŞLERİNİN ÇİZELGELENMESİ

ÖZET

Günümüzde müşteriler, sipârişlerini oluşturan çeşitli ürünleri ortak teslim tarihleriyle talep etmektedir. Özellikle ihracatçı firmalar, müşterilerinin açtığı sipârişleri oluşturan ürünlerin tümünü, teslim tarihinden önce, aynı anda müşterilerine göndermeleri gerekmektedir. Eğer sipârişi oluşturan ürünlerin tümü, aynı anda sevk edilemezse, yeni bir sevk plânı oluşturulacak, sevkiyat mâliyetleri artacaktır. Bâzen müşteri, sipârişi reddedebilmektedir ve müşteri yitirilebilmektedir. Bu nedenle sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne sahip problemlerin incelenmesi, üretici firmaların müşteri beklentilerini karşılamak açısından önemlidir. Ayrıca gerçek üretim ortamlarında farklı işlemleri gerçekleştirebilen makinalar kullanılmaktadır. Bu makinalardan çıkan ürünler, talep edilen ürünün tümünün tamamlanması beklenmeden bir sonraki işleme geçebilmektedir. Bu çalışmada da bu gereksinimlere yanıt verebilecek paralel işleme özellikli, sıraya bağlı hazırlık süreli, "sipâriş-ürün-işlem" üçlüsü olan esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan problemde yayılma süresinin ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin ağırlıklı toplamı enküçüklenmeye çalışılmıştır.

Yayın araştırması sonucunda esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemini içeren çalışma sayısının kısıtlı olduğu, çoğu çalışmada yayılma süresinin enküçüklenmeye çalışıldığı, sıraya bağlı hazırlık süresini ve paralel işleme özelliğini içeren çalışma sayısının az olduğu görülmüştür. Çalışmaların büyük çoğunluğunda metasezgisel çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Özellikle genetik algoritma gibi popülasyon tabanlı algoritmalar yeğlenmektedir. Son yıllarda problemin zorluğu nedeniyle popülasyon tabanlı algoritmalarla yerel araştırma algoritmalarının bütünleştirilmesi denenmiş, ancak CPU işlem sürelerinde yaşanan artışlar nedeniyle bu tür melez algoritmaların kullanımı kısıtlı kalmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında sunulan problemin çözümünde, popülasyon tabanlı algoritmalar yerine Tavlama Benzetimi gibi tek bir çözümü geliştiren algoritma kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma, çift Tavlama Benzetimi algoritmasını hiyerarşik yapılanmayla bağlamıştır. Her iki algoritma da, gerek yükleme gerekse sıralama problemini aynı anda çözerken iki farklı komşu çözüm oluşturma yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca komşu çözüm oluşturmada kritik yolun değişik kullanımları algoritmaya uyarlanmıştır.

Çalışmada önerilen algoritmanın performansının sınanması için kuramsal (deneysel) uygulama ve gerçek uygulama yapılmıştır. Kuramsal uygulamada, literatürde sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içeren esnek sipâriş tipi çizelgeleme veri kümesi olmadığından 36 problem üretilmiştir. Bu problemler, literatürde yer alan Fattahi'nin rassal tavlama benzetimi algoritması ve önerilen algoritma kullanılarak çözülmüş, performans farkları irdelenmiştir. Ambalaj fabrikasında gerçekleştirilen gerçek uygulamada, önerilen algoritmanın performansı, fabrikanın üretim programlama yazılımıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın performansının üstün olduğunu göstermektedir.

Tez çalışması, toplam altı bölümden oluşmaktadır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde müşteri sipârişleri çizelgeleme problemi ve esnek sipâriş tipi çizelgeleme probleminin önemi anlatılmış ve tez çalışmasında bu iki problemin neden birleştirildiği açıklanmıştır.

İkinci bölümde, çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması ve çözüm yöntembilimleri hakkında özet bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, literatürde yer alan esnek sipâriş tipi çizelgeleme ve müşteri sipârişleri çizelgeleme problemleri incelenmiştir. Literatür araştırması bulguları değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde, problemin matematiksel formülasyonu oluşturularak önerilen algoritmanın özellikleri, çalışma felsefesi örneklerle aktarılmıştır. Önerilen algoritmanın performansının sınanması için kullanılan rassal tavlama benzetimi algoritmasının nasıl çözüm ürettiği, bu bölümün sonunda ayrıntılandırılarak anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, öncelikle oluşturulan algoritmanın diğer programlarla nasıl çalıştığı ve veri giriş ekranları anlatılmıştır. Oluşturulan veri kümesinin ve gerçek uygulama problemlerinin özellikleri sunularak problemler çözülmüş, elde edilen sonuçlar istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir.

Altıncı ve son bölümde, tüm tez çalışmasının genel bir değerlendirmesi yapılarak, ilerleyen dönemde gerçekleştirilebilecek yeni çalışmalar sunulmuştur.

CUSTOMER ORDER SCHEDULING IN FLEXIBLE JOB SHOP MANUFACTURING SYSTEMS

SUMMARY

Nowadays, customers demand orders including various products to be delivered at mutual due date. Especially exporters have to send all the products of the same order to the customer at the same time. If it is not achieved, new delivery plan should be scheduled and this will lead to increasing delivery cost and probably losing trust of customer. Due to these realities, dealing with order-product-operation triplet problems is important to fulfill the expectations of customers. Furthermore identical or unrelated parallel machines are utilized in real manufacturing environments. In case of tight due dates, operations of products should be overlapped to produce orders on time. In this study, flexible job shop scheduling problem including overlapping, sequence-dependent set-up is proposed to fulfill the requirements of real manufacturing environments. Weighted sum of makespan and average order tardiness is tried to be minimized.

After the literature survey is carried out, it is concluded that studies including flexible job shop are limited, majority of studies deal with makespan minimization; few studies deal with sequence dependent set-up and overlapping of operation. Many of these studies utilize meta-heuristics. Especially population based meta-heuristics such as genetic algorithm are preferred to solve flexible job shop scheduling problems. In recent years, local search algorithms have been integrated to improve the performance of population based meta heuristics, but it doesn't become widespread due to long CPU time.

Instead of population based algorithms, algorithm improving only one solution such as simulated annealing, is proposed to solve the problem. Developed algorithm is integrating two separate simulated annealing algorithms hierarchically structured. While both algorithms can solve assignment and sequencing problems simultaneously, they have separate neighborhood search algorithms. Different application of critical path is also tried to improve solution and escape local optima.

To test the performance of the proposed algorithm, experimental and real applications are carried out. As there is no suitable dataset to test our algorithm, 36 problems are generated. These problems are solved by proposed algorithm and random simulated anneling algorithm of Fattahi. Performance of these algorithms are compared with each other. In real application of packaging factory, proposed algorithm is compared with factory planning software. Both application results prove that performance of proposed algorithm is better than others.

In this dissertation there are six sections. Contents of these sections are summarized as follows.

In the first section of dissertation, importance of customer order scheduling problem, flexible job shop scheduling problem and reasons for joining these problems are explained.

In the second section, classification of scheduling problems and solution methodologies are summarized.

In the third section, properties and solution methods of flexible job shop scheduling and customer order scheduling problems in the literature are surveyed. At the end of this section, all data obtained from literature survey are evaluated.

In the fourth section, mathematical formulation of problem is developed. Properties and working principle of proposed algorithm are illustrated by examples. Random simulated annealing of Fattahi is also explained at the end of this section.

In the fifth section, how to enter the inputs of problems to Matlab and which softwares interact with Matlab, are explained. Properties of generated dataset and real case problem are tabulated. Problems are solved. Results are given and statistical analyses are carried out to evaluate results.

In the last section, general evaluation of dissertation is given and potential future relevant studies are outlined.

1. GİRİŞ

Günümüzde firmalar, artan rekâbet ortamıyla karşı karşıya kalmaktadır. Her geçen gün müşteri gereksinimleri ve beklentilerinde çıta yükselmektedir. Müşteriler, kaliteli ürünleri uygun fiyatlarla tedârik eden firmaları seçmektedir. Firma yönetimleri, birbiriyle çelişen bu amaçlara ulaşmak için etkinliklerini daha iyi plânlamaya ve kontrol etmeye zorlanmaktadır. Bu nedenle firma içinde plânlama birimleri kurulmaktadır, üretim plânlama programları kullanılmaktadır. Ancak onlarca makinaya ve yüzlerce işleme sahip üretim plânlama problemlerinin çözümünde kullanılan ve varolan klasik üretim plânlama programlarıyla en iyi çözümü, kısa CPU (işlemci) işlem sürelerinde elde etmek olanaklı olamamaktadır. Araştırmacılar, gelişen bilgisayar teknolojisinden yararlanarak en iyi çözüme daha hızlı yakınsayan algoritmaları geliştirmeye odaklanmaktadır.

Her üretim ortamının kendine özgü özelliklere sahip olması, problemlerin yapısındaki ufak değişikliklerde bile varolan algoritmanın yerine farklı algoritmaların oluşturulmasını gerektirebilmektedir. Örneğin ambalaj üretiminde bâzı işlemlerden sonra belirli bir süre beklemek gerekirken, yine örneğin çelik üretiminde, bâzı işlemlerden sonra hemen bir sonraki işleme geçmek zorunludur (Pan ve Huang, 2009). Ayrıca üretim ortamlarında yaşanan teknolojik değişim de üretim plânlama algoritmalarının değiştirilmesini gerektirmektedir. Örneğin birden çok işlemi yapmaya yetkin makinalar geliştirilmektedir (Billaut ve diğ., 2005). Bu makinaları içeren üretim plânlarının oluşturulması için geleneksel plânlama problemlerindeki birçok kabulün gözden geçirilmesi, verimliliği yüksek plânların oluşturulması için gereklidir. Bu nedenle yeni modellerin ve algoritmaların geliştirilmesine gereksinim duyulmaktadır. Çoğu zaman üretim ortamlarında birbirinden farklı performans ölçütleri enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Bâzen üretim ortamının en önemli amacı, sipâriş gecikmelerini enküçüklemek iken bâzen de geciken sipâriş sayısını enküçüklemek olabilmektedir. Çoğu zaman tek bir performans ölçütü yerine birden çok performans ölçütünün eniyilenmesi de gerekebilmektedir (T'kindt ve Billaut, 2006). Çizelgeleme problemlerinde üretim ortamının sürekli değişen ve gelişen özellikleri nedeniyle yeni matematiksel modeller oluşturulup, yeni algoritmalar ile en iyi çözümlere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Ancak genelde yeni oluşturulan bir problemin sonuçları, ilk dönemlerde yeni algoritmalarla hızla geliştirilirken, gelişim hızı zamanla yavaşlamaktadır. Gelişim hızının yavaşladığı dönemde ise hemen hemen aynı olan

çözüm sonuçlarına ulaşmak için daha kısa CPU işlem sürelerinin elde edilmesi gibi zor bir amaç hedeflenmektedir. Çizelgeleme literatürünün bu dinamik doğası, problemlere olan ilginin azalmamasına, tam tersine artmasına neden olmaktadır ve olmuştur.

Sipâriş tipi (atölye tipi) çizelgeleme problemleri de üretim çizelgelemenin önemli problemlerindendir. Sipariş tipi çizelgeleme problemlerinin çözümü konusunda ilk çalışmalar, Wagner (1959) ve Manne (1960) tarafından yapılmıştır. Problemin NP-zor (Garey ve diğ., 1976) yapısı nedeniyle en iyi çözüme ulaşmak için zaman içinde birçok algoritma önerilmiştir. Klasik sipâriş tipi çizelgeleme probleminde amaç, önceden belirlenmiş işlem sırasına sahip işlerin, çoklu makina ortamında sıralanmasının belirlenmesidir. Her bir işin, bir makinayı salt bir kez ziyaret ettiği kabul edilmektedir (French, 1982; Baker ve Trietsch, 2009). Klasik sipâriş tipi çizelgeleme probleminde bir işin her bir işleminin, salt o işe ayrılmış (adanmış) bir makina tarafından yapıldığı varsayılmaktadır ("Alternatif rota yoktur" kabulü).

Geçtiğimiz 20 yıl içinde yaşanan teknolojik gelişmeler, farklı işlemleri yapabilmek gibi üstün özellikleri bünyesinde barındıran makinaların üretim hatlarında yer bulmasına neden olmuştur. Bu nedenle işlemlerin makinalara bire bir yüklenmesi kabulüyle, günümüz üretim ortamlarının gereksinimlerini karşılayacak üretim plânları oluşturmak, uygulanabilir bir çözüm değildir. Firmalar ve akademisyenler, gelişen bu makina özelliklerini yansıtabilecek yeni modeller geliştirip, çözümü için çeşitli algoritmalar önermiştir ve bu yeni problemi de "Esnek Sipâriş Tipi Çizelgeleme Problemi" (ESTÇP) diye adlandırmışlardır. ESTÇP'lerde, her makinanın veya makinaların bir bölümünün, birden çok işlemi yapmaya yetkin olduğu kabul edilir. ESTÇP'ler, klasik sipâriş tipi çizelgeleme problemleri gibi NP-zor'dur (Hartmann, 2002). Bu problemler, genelde bünyesinde iki alt problemi barındırmaktadır. Birincisi işlemlerin makinalara yüklenmesi; ikincisi ise makinalara yüklenen işlemlerin sıralanmasıdır. Literatürde ESTÇP, ikiye ayrılmaktadır: Tip 1 ve Tip 2 (Chen ve diğ., 2007). Tip 1 ESTÇP'de, her bir iş için alternatif işlem sıralarının ve alternatif özdeş veya özdeş olmayan makinaların varolduğu kabul edilmektedir. Bu problem tipinde her iş için işlem sıraları seçilip işlemler makinalara yüklenmektedir, her makinadaki işlem sıraları belirlenmektedir. Tip 2 ESTÇP'de, her iş için tek bir işlem sırası vardır, işlemlerin uygun makinalara yüklenmesi ve her makinadaki işlem sıralaması karara bağlanmaktadır. Literatürde problemin yapısı gereği çözüm için hiyerarşik ve bütünleşik olmak üzere 2 çeşit yaklaşım önerilmektedir. Hiyerarşik yaklaşımda, önce yükleme, sonra sıralama problemi ayrı ayrı çözülmektedir (Kacem ve diğ., 2002; Xia

ve Wu, 2005). Bütünleşik yaklaşımda ise iki problem, eşzamanlı çözülmektedir (Dauzere-Peres ve Paulli, 1997; Mastrolilli ve Gambardella, 1999).

Sanayi uygulamalarında, esnek sipâriş tipi üretim hatlarına sahip işletmeler, müşterilerinden sıkı teslim tarihli (teslim tarihleri gecikmeye eğilimli) sipârişler almaktadır. Bu sipârişleri alma, yönetme ve zamanında işleyip teslim etme konularında süreçlerini etkin bir şekilde yönetebilmeleri gerekmektedir. Müşteri sipârişlerinin yönetiminde üretim kapasitesi, üretim, stok yönetimi ve depoların etkin bir şekilde uyumlu duruma getirilmesi çok önemlidir. Günümüzde fabrikalar çeşitli ürünler üretmektedir, müşteriler ise bu ürünlerden faklı miktarlarda talep etmektedir. Bu problem; genel olarak "Müşteri Sipârişlerinin Çizelgelenmesi Problemi" (MSÇP) olarak adlandırılmaktadır (Julien ve Magazine, 1990). Shapiro ve diğ. (1992), makalelerinde MSÇP'nin neden önemli olduğunu aşağıdaki örnekle açıklamışlardır: "Bir firma, sipârişlerinin %98'ini zamanında gönderdiğini düşünürken, yapılan ankette müşteriler salt sipârişlerin %50'sinden hoşnut kaldığını belirtmiştir. Yapılan ayrıntılı araştırmalarda, firmanın bâzı sipârişlerini 1 birim eksik gönderdiği ve bu bir birimi sonraki sevkiyatla tamamladığı saptanmıştır. Müşteri ise sipârişi, eksik olan 1 birim nedeniyle tümüyle başarısız olarak nitelendirmiştir." Bu nedenle yazarlar, makalelerinde müşteri hoşnutluğu açısından iş bazlı performans göstergelerinin, sipâriş bazlı performans göstergelerinden daha başarısız olduğunu vurgulamışlardır. MSÇP, sipârişi oluşturan ürünlerin tümünün, istenen teslim tarihinde müşterinin eline ulaşmaması durumunda sipârişin zamanında teslim edilemediği düşüncesinden yola çıkarak geliştirilmiştir. Sipârişi oluşturan ürünlerin tümünün aynı anda teslim edilmesi kuralı dikkate alınırken, sipârişlerin salt tek tip üründen oluşmadığı kabul edilmektedir. Ancak sipârişlerin tek tip üründen oluştuğu özel durum ise MSÇP'nin kabullerine uygundur. Yâni bâzı sipârişler, salt tek tip üründen oluşurken, bâzılarında farklı ürünler bulunabilir. Özellikle MSÇP, ihracat ağırlıklı çalışan firmalar için çok önemlidir. Genelde ihracatçı firmaların gemiyle ve hava yoluyla sevkiyatlarını yapması ve sevkiyat alternatiflerinin kısıtlı olması, sevkiyata konu olan sipâriş kalemlerinin aynı anda hazır olmasını zorunlu kılmaktadır. Aksi durumda sipâriş, zamanında teslim edilememektedir. Bunun sonucunda müşteri yitirilmektedir; ertelenen sevkiyat nedeniyle sevkiyat mâliyetleri artmaktadır (Leung ve diğ., 2006). Hattâ bâzı durumlarda sipâriş, müşteri tarafından reddedilmektedir (Müşteriye özel ürünlerin tasarlandığı ambalaj sektöründe, reddedilen ürünlerin yeniden satışı olanaklı olmadığından zararlar artmaktadır. Bu nedenle müşteriye özel ürünlerin sunulduğu sektörlerde MSÇP'nin önemi artmaktadır).

Bu çalışmada üretim ortamlarının gerçeklerini daha iyi yansıtan bir problemin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu nedenle ESTÇP ve MSÇP'nin birleştirildiği bir problem oluşturulacaktır. Problem, sıraya bağlı hazırlık süreleri, paralel yapılan işlemler gibi gerçek üretim ortamlarında sıklıkla rastlanan süreç özelliklerini de içerecektir. Kısa CPU işlem sürelerinde kaliteli çözümler elde edebilecek yeni bir algoritmanın geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca ulaşabilmek için görece kısa CPU işlem sürelerinde kaliteli çözümler üretebilen metasezgisel yöntemler araştırılacaktır. CPU işlem sürelerinin azaltılabilmesi için problemin çözümünde popülasyon tabanlı algoritmalar (Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu gibi) yerine Tavlama Benzetimi (TB) algoritması gibi tek bir çözümü geliştiren metasezgisel algoritmaların üzerinde durulacaktır. Böylece metasezgisel algoritmanın, arama alanını daha etkin araştırabilecek güçlü yerel araştırma algoritmalarıyla bütünleştirilmesi, CPU işlem sürelerini, popülasyon tabanlı algoritmalar kadar arttırmayacaktır. Geliştirilen algoritmanın performansının sınanması için çok sayıda yeni problem oluşturulacaktır. Oluşturulan problemler, literatürde yer alan rassal TB algoritması ile çözülerek, geliştirilen algoritmayla olan performans farkı araştırılacaktır. Geliştirilen algoritmanın olumlu ve olumsuz özellikleri belirlenecektir. Geliştirilen algoritma, gerçek bir uygulamada test edilerek, gerçek bir üretim ortamına uygulanabilirliği irdelenecektir. Çalışmanın amaçları, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içeren ESTÇP'nin oluşturulması ve bu problemi etkin bir şekilde çözebilen melez metasezgisel algoritmanın geliştirilmesi
2. Geliştirilen algoritmanın performansının irdelenmesi için çeşitli özelliklerde örnek problemlerin üretilmesi
3. Üretilen örnek problemlerin, geliştirilen algoritmayla ve literatürde yer alan rassal TB algoritmasıyla çözümü ve sonuçların karşılaştırılarak, geliştirilen algoritmanın olumlu ve olumsuz özelliklerinin belirlenmesi
4. Geliştirilen algoritmanın gerçek bir üretim ortamına uygulanabilirliğinin test edilmesi

Tezin ilerleyen bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de çizelgeleme problemleri özetlenecek, sınıflandırması yapılacak ve çözüm yöntemleri kısaca anlatılacaktır. Bölüm 3'de literatürde yer alan MSÇP ve ESTÇP'ler aktarılacak, literatür sonuçları özetlenerek genel bir değerlendirme yapılacaktır. Bölüm 4'de, oluşturulan problemin özellikleri aktarılacak, matematiksel model sunulacak, geliştirilen TB algoritması ve "Fattahi ve diğ.'nin" (2007) önerdiği rassal TB

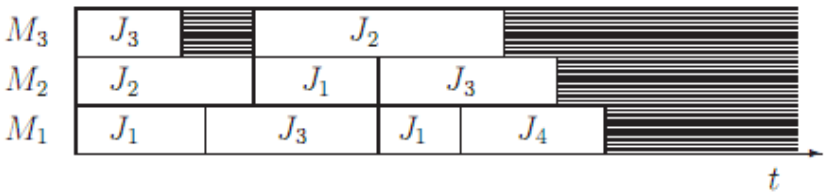
algoritması ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır. Bölüm 5'de bu iki algoritma ile üretilen problemler çözülecek, elde edilen sonuçlar aktarılacak ve istatistiksel bulgular gözönüne alınarak sonuçlar değerlendirilecektir. Ayrıca ambalaj sektöründe bir uygulama gerçekleştirilecektir. Uygulama problemi sonuçlarına göre fabrika plânlama programının, geliştirilen algoritmanın ve rassal TB algoritmasının performansları birbiriyle karşılaştırılacaktır. Bölüm 6'da ise çıkarımlar, tezin literatüre katkısı ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

2. SIRALAMA VE ÇİZELGELEME KONUSUNDA GENEL BİLGİLER

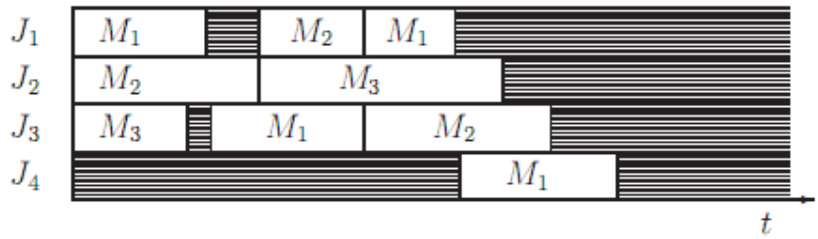
Bu bölümde çizelgeleme kitaplarını temel alarak çizelgeleme hakkında genel bilgiler verilecektir. Çizelgeleme problemleri için tek tip bir sınıflandırma yapılamayacağından çeşitli sınıflandırma şekilleri anlatılacaktır. Problemin zorluğunun nasıl değiştiği ve zorluğu yüksek problemlerde kullanılan yöntembilimleri özetlenecektir.

"T'kindt ve Billaut (2006)" ve Pinedo (2000), kitaplarında çizelgeleme kuramının spor, sağlık, lojistik, bilişim gibi değişik sektörlerdeki problemlere uygulanabileceğini belirtmektedir. Pinedo (2008), çizelgelemeyi faaliyetlerin kısıtlı kaynaklara, zaman dikkate alınarak atanmasına karar verme süreci olarak tanımlamaktadır. Çizelgeleme sürecinde öncelikle elimizde hangi kaynaklardan kaçar adet bulunduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Her işlemin (görev) bu kaynaklardan kaçına gereksinim duyduğu, bu işlemlerin tamamlanması için bu kaynaklarda kaç birim işlem süresinin gerektiği, bu işleme en erken ne zaman başlanabileceği gibi bilgilerin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca öncelik ilişkileri gibi teknolojik kısıtlar da bulunabilmektedir. Bâzen işlemlerin işlem süreleri net bir şekilde ifâde edilememektedir. Bunlara ek olarak kaynakların ve işlemlerin (görevler) içerdiği özellikler, çizelgeleme probleminin yapısını tümüyle değiştirebilmektedir (Baker ve Trietsch, 2009).

Çizelgeleme, bir karar verme süreci olarak, üretim alanında olduğu gibi hizmet sektöründe de önemli bir yere sahiptir ve birçok uygulaması bulunmaktadır. Örneğin işlemlerin makinalara yüklenmesi (üretimde), uçakların havaalanına iniş ve kalkışları (Bazargan, 2010), işlemcide (CPU) gerçekleştirilmeyi bekleyen programlar, literatürde sıklıkla incelenen problemlerdir. Bu problemlerde makina, havaalanı ve işlemci kısıtlı kaynakları; iniş-kalkış, işlemler ve programlar ise faaliyetleri temsil etmektedir. Çizelgelerin zaman ekseninde temsili için Gantt diyagramı kullanılmaktadır. Gantt diyagramı, makina bazlı ve iş bazlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Brucker, 2007). Makina bazlı Gantt diyagramında işlerin işlemleri, makinalarda zaman eksenine göre yerleştirilmektedir (Şekil 2.1). İş bazlı Gantt diyagramında ise makina yerine işe odaklanılırken işi oluşturan işlemlerin makina rotaları ve ilgili makinada kaç birim zaman harcadığı, ne zaman başlayıp tamamlandığı net bir şekilde incelenebilmektedir (Şekil 2.2).



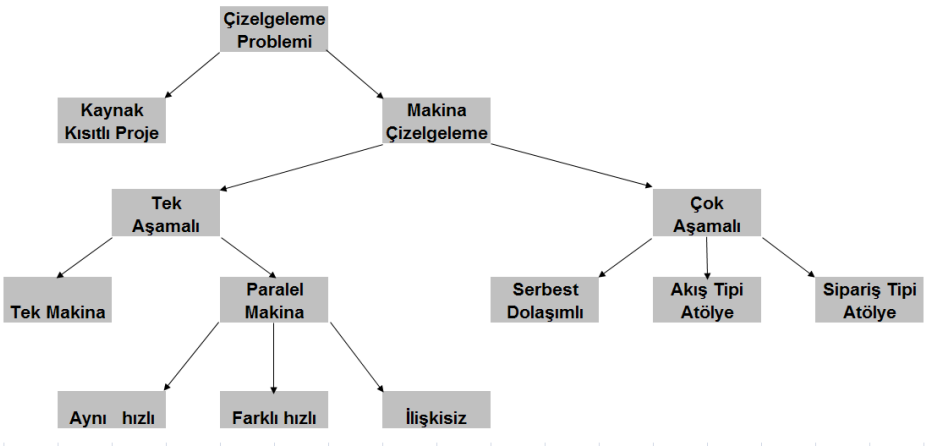
Şekil 2.1 : Makina bazlı Gantt diyagramı (Brucker, 2007).



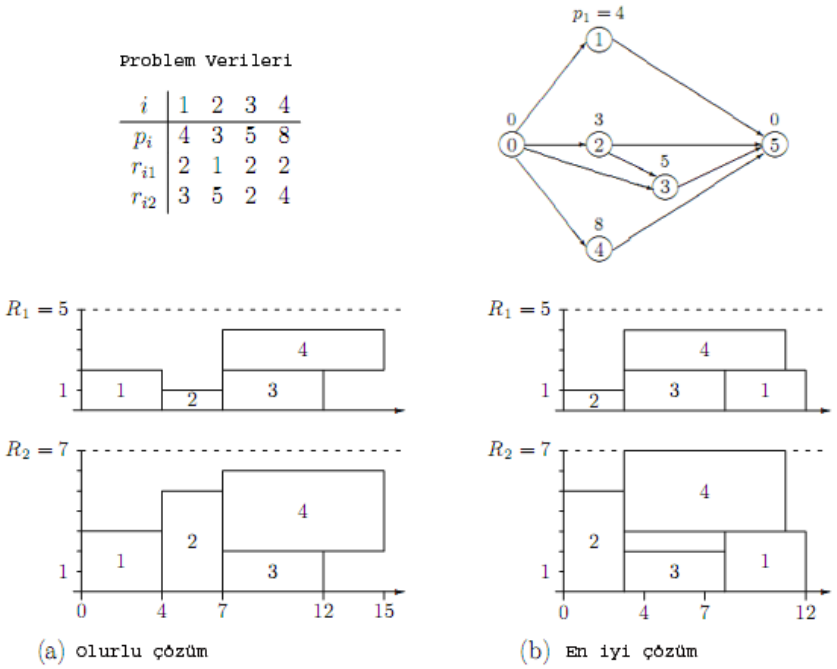
Şekil 2.2 : İş bazlı Gantt diyagramı (Brucker, 2007).

Literatürde çizelgeleme problemleri için çeşitli sınıflandırma tipleri vardır. Örneğin Pinedo (2008), kitabında deterministik ve stokastik makina çizelgeleme problemlerini ayırarak incelerken “Brucker ve Knust (2006)”, “Lopez ve Roubellat (2001)” ve “Herrmann (2006)”, çizelgeleme modellerini kaynak kısıtlı proje çizelgeleme ve makina çizelgeleme olarak ikiye ayırmıştır (Şekil 2.3). Şekil 2.3’de sunulan sınıflandırma, Brucker ve Knust (2006); Brucker (2007); Baker ve Trietsch (2009) ve Pinedo’nun (2008) kitaplarından elde edilen bilgiler ışığında oluşturulmuştur. Kaynak kısıtlı makina çizelgeleme problemi, çizelgeleme problemlerinin en genel durumudur. Makina, insan, para ve enerji kısıtlı kaynak olarak düşünülürken, proje süresi ve mâliyetler enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Bâzı faaliyetler arasında, dikkate alınması gereken öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Kaynak kısıtlı proje çizelgelemede i etkinliğine (i=1, ..., n), k kaynağı (k=1, ..., r) ayrılmaktadır. Her bir kaynağın, R_k birim kapasitesi olduğu düşünülmektedir. Faaliyet i, ilgili kaynakta p_i birim işlem süresine gereksinim duymaktadır. Bâzı faaliyetler arasında uyulması gereken öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Genelde ana amaç, her bir kaynağın kapasitesi aşılmadan ve öncelik ilişkilerine uyularak yayılma süresinin enküçüklenmesidir (Brucker ve Knust, 2006).

Şekil 2.4’de verileri ve öncelik ilişkisi verilen problemde, olurlu çözümlerden biri ve en iyi çözüm sunulmuştur. 1. ve 2. kaynağın kapasiteleri sırasıyla 5 ve 7’dir. Kaynak kapasiteleri aşılmadan, öncelik ilişkilerine uyularak, en iyi yayılma süresine ulaşılmaya çalışılmaktadır. Şekil 2.4’de yayılma süresi; en iyi çözümde 12 ve olurlu çözümde 15 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.3 : Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırılması.



Şekil 2.4 : Kısıtlı kaynaklı proje çizelgeleme problemi örneği (Brucker ve Knust, 2006).

Makina çizelgeleme ise kaynak kısıtlı proje çizelgelemenin özel durumudur. Makina kapasiteleri (R_k'nın değerleri) tek makinalı problemlerde 1'e; paralel özdeş makinalarda makina sayısına eşit kabul edilmektedir (Ayrıca i. faaliyetin k. kaynakta gereksinim duyduğu kapasite (r_{ik}'lar) de 1'e eşit kabul edilmektedir). En genel kaynak kısıtlı çizelgeleme problemini çözen algoritmaların, makina çizelgeleme problemlerini de çözmesi beklenebilir.

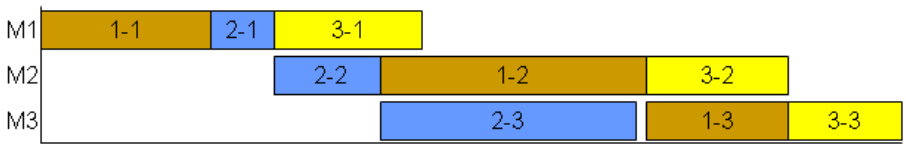
Makina çizelgeleme problemleri ise tek aşamalı ve çok aşamalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Baker ve Trietsch, 2009). Tek aşamalı makina çizelgeleme

problemlerinde her bir işin tek bir işlemden oluştuğu kabul edilmektedir. Çok aşamalı makina çizelgeleme problemlerinde ise her bir işin çok sayıda işlemden oluştuğu kabul edilirken, bir işlemi gerçekleştirecek en az bir makinadan oluşan makina istasyonlarının bulunduğu düşünülmektedir. Her bir işin tüm işlemleri tamamlanıncaya dek, ilgili işin işlemlerinin çeşitli makina kümelerinden geçtiği kabul edilmektedir.

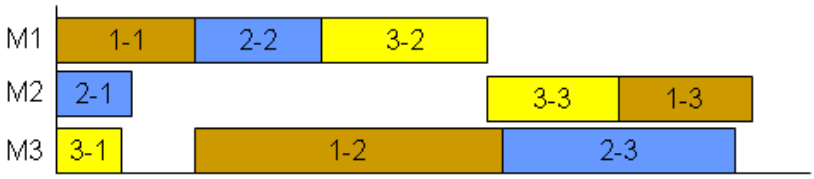
Tek aşamalı makina çizelgeleme problemleri de tek makinalı ve paralel makinalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek makinalı problemler, çizelgeleme problemlerinin en basit hâlidir. Bilgisayar kapasitelerinin sınırlı olması ve problemlerin basitliği nedeniyle 21. yüzyıl öncesi literatürde en çok araştırılan çizelgeleme problemleri bu sınıfa aittir. Tek aşamalı paralel makina çizelgelemede, tek işlemden oluşan işlerin gerçekleştirilebileceği özdeş veya özdeş olmayan m makina bulunmaktadır. Paralel makina probleminin tipine bağlı olarak bir iş, makinaların bâzılarında farklı veya aynı işlem sürelerinde gerçekleştirilebilirken bâzı makinalar bâzı işlemleri gerçekleştirememektedir. Paralel makinalı problemler de üçe ayrılmaktadır. Özdeş hızlı (Ing. Identical) paralel makinalar, farklı hızlı (Ing. Uniform) paralel makinalar ve ilişkisiz (Ing. Unrelated) paralel makinalar (Brucker, 2007; Pinedo, 2008). Özdeş hızlı paralel makinalarda bir işin işlem süresi tüm makinalarda aynıdır. Farklı hızlı paralel makinalarda makina hızları, işin özelliklerine bakılmaksızın farklılık göstermektedir. Örneğin a işinin 1 numaralı makinada 4 birim; 2 numaralı makinada ise 8 birim işlem süresinde gerçekleştirildiği kabul edilsin. Eğer b işi 1 numaralı makinada 6 birim sürede gerçekleştiriliyorsa 2 numaralı makinada 12 birim işlem süresine gereksinim duyacaktır. İlişkisiz paralel makinada işlem süreleri, hem işin özelliklerine hem de makina özelliklerine bağlıdır. İlişkisiz paralel makina, farklı hızlı paralel makinanın; farklı hızlı paralel makina da özdeş paralel makinanın genel durumudur (Pinedo, 2008).

Çok aşamalı makina çizelgeleme problemleri ise günümüzde sıklıkla araştırmalara konu olmaktadır. Bu tip problemler, işi oluşturan işlemlerin izlediği makina rotalarına göre 3'e ayrılmaktadır: Akış tipi, sipâriş tipi ve serbest dolaşımlı (Brucker, 2007; Pinedo, 2008; Baker ve Trietsch 2009). Akış tipi atölyelerde, n iş m tezgâhta gerçekleştirilirken tüm işler aynı tezgâh rotasını izlemektedir (Şekil 2.5). Sipâriş tipi atölyelerde, işler farklı tezgâh rotası izlemektedir (Şekil 2.6). Akış tipi atölye problemleri, sipâriş tipi atölye problemlerinin özel durumudur. Sipâriş tipi atölyede rotalamada kısıtlama yok iken akış tipi atölyede rota, tüm işler için sabittir. Serbest dolaşımlı atölyede ise işin işlemleri arasında öncelik ilişkisi yoktur (Brucker ve Knust, 2006; Şekil 2.7). Özellikle arabanın parçalarının değişimi ve sipârişleri oluşturan

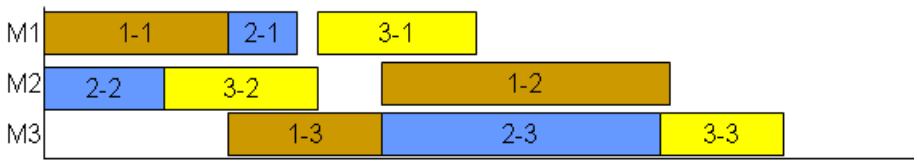
ürünlerin üretilmesi serbest dolaşımlı atölyeye verilebilecek örneklerdir. Akış ve sipâriş tipi atölyelerde bir işlemi yapabilecek birden çok makina varsa esneklik sözkonusudur. Bu çalışmada ilerleyen bölümde esneklik kavramı üzerinde durulacak ve ilgili çalışmalar ayrıntılandırılarak irdelenecektir.



Şekil 2.5 : Akış tipi çizelge örneği.



Şekil 2.6 : Sipâriş tipi çizelge örneği.



Şekil 2.7 : Serbest dolaşımlı çizelge örneği.

Yukarıda anlatılan sınıflandırmanın dışında, işlerin geliş şekline göre statik ve dinamik makina çizelgeleme problemleri ayrımı da yapılabilmektedir (Stankovic ve diğ., 1998; T'kindt ve Billaut, 2006). Eğer çizelgelenecek iş kümesi zamanla değişmiyorsa problem statik; aksi durumda dinamik olarak adlandırılmaktadır. Her ne kadar statik problemler, araştırmacılar tarafından sıklıkla incelense de, dinamik problemlerin gerçek uygulamaları yansıtabilmesi nedeniyle önemi tartışılmazdır. Ayrıca veriler tam doğrulukla biliniyorsa deterministik makina çizelgeleme problemleri; eğer veriler (işlem süreleri, serbest kalma zamanları gibi) tam doğrulukla bilinemiyor ancak olasılık dağılımıyla ifâde edilebiliyorsa stokastik makina çizelgeleme problemleri olarak adlandırılmaktadır (Pinedo 2008; Baker ve Trietsch, 2009). Stokastik makina çizelgeleme problemlerinin zorluğu nedeniyle deterministik makina çizelgeleme problemlerini içeren çalışma sayısı literatürde fazladır.

Çizelgeleme literatüründe problemlerin kısa gösterimleri ve sınıflandırılması için α/β/γ temsili kullanılmaktadır (Graham ve diğ., 1979). α makina ortamını; β iş karakteristiklerini; γ ise enküçüklenmeye çalışılacak amaç fonksiyonunu

anlatmaktadır. α, β ve γ'nın alabileceği değerler, Çizelge 2.1'de görülmektedir. Örneğin FF| r_j| $\sum w_j T_j$ gösteriminde, işlerin serbest kalma zamanlarının dikkate alındığı (r_j) esnek akış tipi üretim ortamında (FF) işlerin ağırlıklı teslim gecikmesi süreleri toplamının enküçüklenmeye ($\sum w_j T_j$) çalışılacağı anlatılmaktadır.

Çizelge 2.1 : Literatürde problemleri anlatmak için kullanılan Graham gösterimi (Zhu ve Wilhelm, 2006).

α	Açıklaması	β	Açıklaması	γ	Açıklaması
1	Tek makina	prec	Öncelik ilişkili	C_{max}	Yayılma süresi
Pm	m adet özdeş paralel makina	d	Teslim tarihli	L_{max}	Maksimum gecikme süresi
Qm	m adet farklı hızlı paralel makina	r	Serbest kalma zamanlı	T_{max}	Maksimum teslim gecikmesi süresi
Rm	m adet ilişkisiz paralel makina	brkdown	Makina arızası	$\Sigma(w_i)C_i$	Ağırlıklı tamamlanma zamanı toplamı
Fm	m makinalı akış tipi üretim	bloc	Bloklama etkisi	$\Sigma(w_i)T_i$	Ağırlıklı teslim gecikmesi süresi toplamı
FF	Esnek akış tipi üretim	nwt	Beklememe kısıtlı	$\Sigma(w_i)U_i$	Ağırlıklı geciken iş sayısı toplamı
Jm	m makinalı sipâriş tipi üretim	prmpt	İş kesmeli	Σsij	Toplam hazırlık süresi
FJ	Esnek sipâriş tipi üretim	recrc	Yeniden girişli	Π	maliyeti
Om	m makinalı serbest dolaşımlı atölye	s_{jk}	Hazırlık süreli		
		f_{mls}	gruplama		

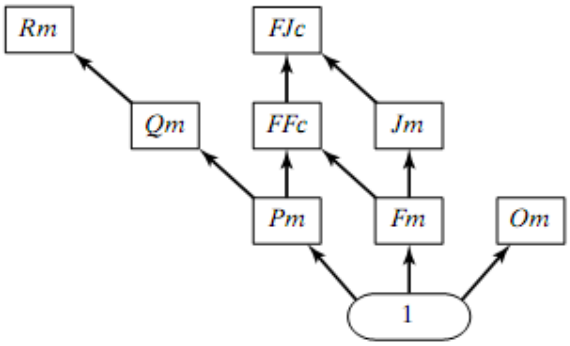
Literatürde problemler, enküçüklenmeye çalışılan performans ölçütü sayısına bağlı olarak tek ölçütlü ve çok ölçütlü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek ölçütlü makina çizelgeleme problemlerinde salt bir performans ölçütü enküçüklenirken, çok ölçütlü makina çizelgeleme problemlerinde birden çok performans ölçütü eşzamanlı olarak enküçüklenmeye çalışılmaktadır (Donoso ve Fabregat, 2007; Weise, 2008; Pinedo, 2008). Çok ölçütlü makina çizelgeleme problemlerinde, performans ölçütlerinin ağırlıklı toplamı enküçüklenirken performans ölçütlerinin ağırlık katsayılarını belirlemek, en zor aşamalardan biridir. Bu nedenle çok ölçütlü çizelgeleme problemlerinde pareto optimal çözümlere ulaşılması da yeğlenelebilmektedir. Pareto optimal çözümlerde performans ölçütlerinden birinin sonucu kötüleşmedikçe diğer performans ölçütleri geliştirilememektedir (Pinedo, 2008). Elde edilen pareto optimal çözümlerde bir performans ölçütü değerinde iyileşmenin diğer performans ölçütü değerlerini nasıl etkilediği görülebildiğinden, karar vericiye durumu daha iyi yorumlama olanağı sunulmaktadır.

Çizelgeleme problemlerinde atölye performansını sınamak için kullanılabilecek çok sayıda performans ölçütü bulunmaktadır. Etkinliğin eniyilenmesinde seçilebilecek kimi ölçütler aşağıda sıralanmıştır (Tanyaş ve Baskak, 2003):

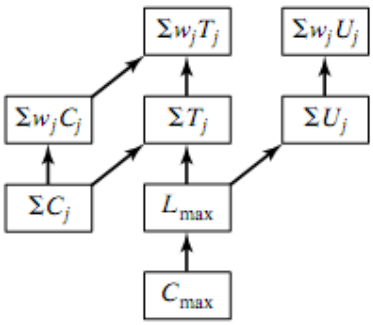
- Sipârişin/işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesi
- Ortalama tamamlanma zamanının enküçüklenmesi
- Ortalama ağırlıklı tamamlanma zamanının enküçüklenmesi
- Yayılma süresinin enküçüklenmesi

- Ortalama bekleme süresinin enküçüklenmesi
- Ortalama gecikme veya teslim gecikmesi süresinin enküçüklenmesi
- Ortalama ağırlıklı gecikme veya teslim gecikmesi süresinin enküçüklenmesi
- En büyük gecikme veya teslim gecikmesi süresinin enküçüklenmesi
- Ara stok düzeyinin enküçüklenmesi
- Erken teslim mâliyetinin enküçüklenmesi
- Geciken iş sayısının enküçüklenmesi
- Ağırlıklı geciken iş sayısı toplamının enküçüklenmesi
- Tezgâh ve işgücü kullanım oranlarının enbüyüklenmesi
- Kritik makina yükünün enküçüklenmesi
- Toplam makina yükünün enküçüklenmesi
- Sipârişin/işin akış süresinin enküçüklenmesi
- Ortalama akış süresinin enküçüklenmesi

Literatürde çizelgeleme problemlerini çözmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler adım adım yönergelerini uygulayarak sonuca ulaşmaktadır. Toplama, çıkarma, çarpma, karşılaştırma gibi gerçekleştirilen işlemlerle sonucun elde edilmesi için belirli bir işlem süresine gereksinim duyulmaktadır. Eğer bu işlemlerle sonucun elde edilme süresi, girdi sayısının polinomiyal fonksiyonuyla ifâde edilebiliyorsa bu algoritmalar polinomiyal zamanlı olarak adlandırılmaktadır. $O(n^2)$ gibi (n, problemi anlatmak için kullanılacak bilgi miktarını ifâde etmektedir). Polinomiyal zamanlı algoritmalarla çözülebilen problemler, P sınıfına ait problemler olarak adlandırılmaktadır (Leung, 2004; Blazewicz ve diğ., 2007; Baker ve Trietsch, 2009). Diğer bir problem tipi de NP-zor sınıfına aittir. NP-zor sınıfına ait problemlerin, polinomiyal zamanlı algoritmalarla çözülemediğine inanılmaktadır. Şekil 2.8 ve 2.9'da problemlerin özelliklerine bağlı olarak makina çizelgeleme problemlerinin zorluğunun nasıl değiştiği görülmektedir (Brucker, 2007; Pinedo 2008). 1 makinalı problemler en basit problemler iken, esnek sipâriş tipi problemler ve ilişkisiz paralel makina problemleri zorluğu yüksek problemlerdir. Şekil 2.9'da ise ağırlıklı sipâriş teslim gecikmesi süresi toplamının ve ağırlıklı geciken iş sayısı toplamının zorluğunun yüksek olduğu görülmektedir.



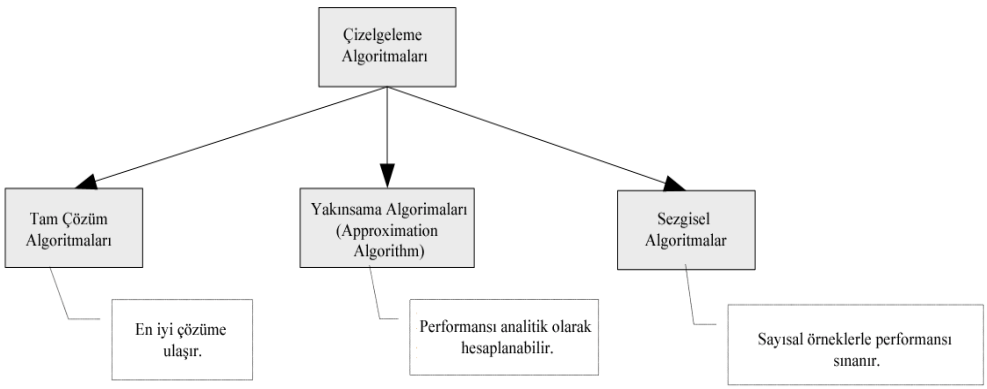
Şekil 2.8 : Çizelgelemede makina sayısına ve akış tipine bağlı karmaşıklık yapısının değişimi (Brucker 2007; Pinedo 2008).



Şekil 2.9 : Makina çizelgelemede performans ölçütüne bağlı karmaşıklık yapısının değişimi (Brucker 2007; Pinedo 2008).

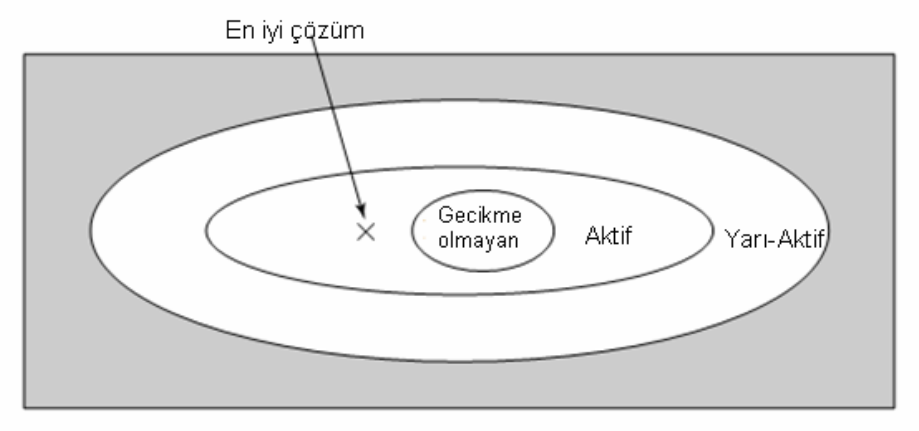
Literatürde çizelgeleme problemlerinin çözümü için Şekil 2.10'da gösterilen 3 ana yöntembilimi kullanılmaktadır (French, 1982; Michalewicz ve Fogel, 2000; Blazewicz ve diğ., 2007; Xhafa ve Abraham, 2008). Dal-Sınır, dinamik programlama algoritmaları ve karma tamsayılı programlama, tam çözüm algoritmalarına verilebilecek örneklerdir. Tam çözüm algoritmaları, en iyi çözüme ulaşmalarına rağmen CPU işlem süreleri, problem boyutuna ve özelliklerine bağlı olarak hızla artabilmektedir. Bu nedenle NP-zor problemlerde yakınsama algoritmaları (Ing. Approximation algorithm) ve sezgisel algoritmalar yeğlenmektedir. Yakınsama algoritmaları, polinomiyal zamanda en iyi çözüme belirli yakınlıkta çözümün elde edilmesini garanti altına almaktadır. (Gonzalez, 2007). Ancak en iyi çözüme olan yakınlık garantisi de kötü olabilmektedir. Her zaman yakınsama algoritmaları elde edilemeyeceği için çizelgeleme literatüründe sıklıkla sezgisel algoritmaların kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada da problemin zorluğu nedeniyle sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Weise (2008) sezgiseli, algoritmanın o ana kadar elde ettiği bilgileri kullanarak hangi aday çözümün test edileceğine veya yeni çözümün nasıl oluşturulacağına karar veren eniyileme algoritmasının bir parçası olarak tanımlamaktadır. Pinedo (2008), sezgisel algoritmaları yapıcı (Ing. Constructive) ve

yinelemeli (Ing. Iterative veya Improvement) olarak ikiye ayırmaktadır. Yapıcı algoritmalara verilebilecek en önemli örnek, işi başlatma kurallarıdır. İşi başlatma kurallarıyla çizelgeye her adımda bir işlem eklenmektedir. Yinelemeli sezgiseller ise, oluşturulan ilk çözümü her adımda geliştirmektedir. TB, TA (Tabu Araştırması), GA (Genetik Algoritma), KKO (Karınca Kolonisi Optimizasyonu) ve PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) gibi metasezgisel yöntemler bu sınıfa aittir. Bu tip algoritmalarda en önemli adımlar, komşu çözümlerin nasıl oluşturulacağı ve çözümlerin nasıl temsil edileceğidir. İyi bir komşu çözüm belirleme yöntemi, algoritmanın performansını doğrudan etkileyebileceğinden çok önemlidir.

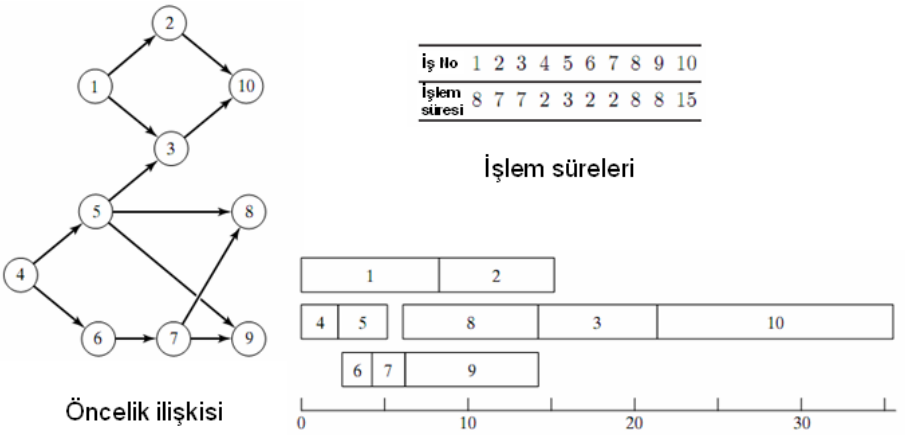


Şekil 2.10 : Çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntembilimleri (Brucker, 2007).

İterasyonlar sırasında algoritmalar, çizelge oluştururken farklı yöntemler kullanmaktadır. Çizelge oluşturma yöntemlerinin, en iyi çözümün elde edilmesinde önemli etkisi bulunmaktadır. Pinedo (2008) ve “Billaut ve diğ. (2005)”, çizelge sınıflarını, gecikme olmayan (Ing non-delay), aktif (Ing. aktive) ve yarı-aktif (Ing. semi-active) olmak üzere üçe ayırmaktadır (Şekil 2.11). Makinalarda boş bir an varsa ve o anda gerçekleştirilmeyi bekleyen işlem yoksa çizelgenin, gecikme olmayan çizelge sınıfına dahil olduğu kabul edilmektedir. Şekil 2.12’de verilen gecikme olmayan çizelge örneğinde 5 ve 8 numaralı işlerin arasındaki boşluğun olduğu anda, gerçekleştirilebilecek başka bir iş yoktur. 3 numaralı iş, 1 numaralı işin tamamlanmasını beklemektedir. Eğer 8 numaralı iş 8 birim anından sonra başlasaydı çizelge gecikme olmayan çizelge sınıfında yer almayacaktı.

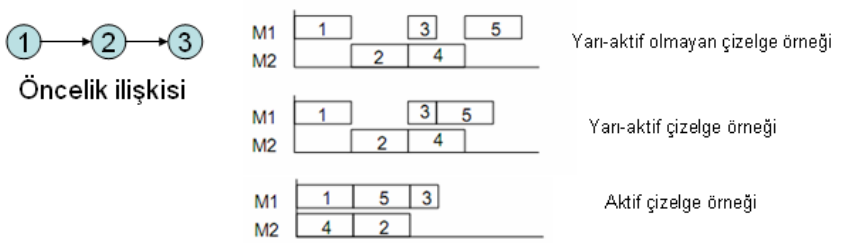


Şekil 2.11 : İş-kesme içermeyen sipâriş tipi çizelgeleme problemlerinde çizelge sınıflarının Venn diyagramında gösterimi (Pinedo, 2008).



Şekil 2.12 : Gecikme olmayan çizelgeye bir örnek (Pinedo, 2008).

Aktif ve yarı-aktif çizelgeleri anlatabilmek için yerel sola kaydırma (Ing. local left shift) ve genel sola kaydırma (Ing. global local shift) tanımlarına gereksinim vardır. Yerel sola kaydırmada bir işlem, çizelgedeki varolan işlem sıralamasını değiştirmeden sola kaydırılabilmektedir. Genel sola kaydırmada, varolan çizelgedeki işlem sırası değişirken, diğer işlemlerin sağa kaymasına (gecikmesine) neden olmaması gerekmektedir. Yarı-aktif çizelgelerde yerel sola kaydırma yapılamamaktadır. Aktif çizelgelerde ise gerek yerel, gerekse genel sola kaydırmalar yapılamamaktadır. Şekil 2.13'de verilen örnekte, ilk durumda 5 numaralı iş ile 3 numaralı iş arasındaki boşluk, 5 numaralı işe uygulanan yerel sola kaydırma ile ortadan kaldırılarak ikinci durum oluşturulmuş ve yarı-aktif çizelge elde edilmiştir. İkinci durumda genel sola kaydırma uygulanarak (5 numaralı işleme 1. makinada; 4 numaralı işleme 2. makinada) aktif çizelge elde edilmiştir (4 ve 5 numaralı işler için öncelik ilişkisi yoktur).



Şekil 2.13 : Yarı-aktif ve aktif çizelge örnekleri.

En iyi çözümlerin aktif çizelge sınıfında yer aldığı bilinmektedir (Şekil 2.11). Bu nedenle birçok sipâriş tipi çizelgeleme probleminde aktif çizelge üreten algoritmalar kullanılmaktadır. Giffler ve Thompson (1960) algoritması da aktif çizelge üreten önemli algoritmalardandır.

Bu tez çalışmasında sunulacak problemin yapısı, yukarıda anlatılan sınıflandırmalara göre statik - deterministik - makina çizelgeleme - çok aşamalı - sipâriş tipi çizelgeleme problemine karşılık gelmektedir. Ancak klasik sipâriş tipi çizelgeleme probleminden farkı, bir işlemi gerçekleştirebilecek çok sayıda makina seçeneğinin bulunmasıdır. Çok ölçütlü problemde performans ölçütlerinin ağırlıklı toplamı enküçüklenmeye çalışılacaktır. Problemin NP-zor olması nedeniyle, yinelemeli sezgisel yöntemlerle çözümü önerilecektir. Önerilen algoritma, kullandığı temsil nedeniyle yarı-aktif çizelgeler üretmekle birlikte, çözümün ilerleyen iterasyonlarında, içeriğini oluşturan sezgisellerin yardımıyla aktif çizelge sınıfına dahil çizelgeler oluşturmaktadır.

.

3. YAYIN İNCELEMESİ

Bu bölümde tez çalışmasına konu olan problemin, ESTÇP ve MSÇP'nin her ikisini de içermesi nedeniyle literatürde yer alan önemli ESTÇP ve MSÇP çalışmaları aktarılacaktır. Birinci kısımda Tip 1 ESTÇP ve Tip 2 ESTÇP çalışmaları aktarılacak, ikinci kısımda MSÇP çalışmaları özetlenecektir. Üçüncü kısımda ise MSÇP ve ESTÇP'nin her ikisini de içeren çalışmalara dikkat çekilerek, literatür araştırması sonuçları yorumlanacaktır.

3.1 ESTÇP Literatürü

Literatürde ESTÇP'lerin genel sınıflandırmasında iki farklı görüş dikkati çekmektedir. Birinci görüşe göre makina ve süreç plânı esnekliğini temel alan ayrım kullanılmaktadır. Genelde yazarların büyük bir kısmı, makalelerinde bu ayrımı ifâde etmese de, problem tanımlamalarında bu ayrım net bir şekilde yapılabilmektedir. Bu görüşe göre ESTÇP'ler, içerdiği esnekliğe göre ikiye ayrılmaktadır: Tip 1 ve Tip 2 (Chan ve diğ., 2006; Chen ve diğ., 2007). Tip 1 ESTÇP'de, her iş için birden çok işlem sırası alternatifi ve her işlem için birden çok makina alternatifi bulunabilmektedir. Tip 2 ESTÇP'de her iş için işlem sırası sabitlenirken, her işlemin gerçekleştirilebileceği makina sayısı, Tip 1'deki gibi birden fazla olabilmektedir. Ayrıca her makina tüm işlemleri gerçekleştirebiliyorsa tam esneklik; bâzı makinalar bâzı işlemleri gerçekleştiremiyorsa kısmî esneklik sözkonusudur. Literatürde tam esnek durum için geliştirilen algoritmalar, aynı zamanda kısmî esnek durum için de kullanılabilmektedir. Eğer A makinası X işlemini gerçekleştiremiyorsa X işleminin A makinasındaki işlem süresi, büyük bir değer seçilerek, algoritmanın X işlemini A makinasına yüklemesi engellenmektedir. Ancak bu değişiklik sonucunda algoritmanın performansı zayıflayabilmektedir. Tip 2 ESTÇP'de, her bir işlemin yükleneceği makinanın ve her bir makinadaki işlem sırasının belirlenmesi gerekmektedir (İki alt-problem). Tip 1 ESTÇP'de ise her bir işin işlem sırasına, her bir işlemin yükleneceği makinaya ve her bir makinadaki işlem sırasına karar verilmesi gerekmektedir (Üç alt-problem). ESTÇP'lerin sınıflandırılmasında kabul gören ikinci görüş ise, ifâde edilen alt-problemlerin çözüm yöntembilimini temel almaktadır. Bu görüşe göre alt-problemlerin birlikte (bütünleşik yöntembilimi) veya ayrı ayrı (hiyerarşik yöntembilimi) çözülmesi, ayrı bir sınıflandırmaya neden

olmaktadır (Brandimarte, 1993; Dauzere-Peres ve Paulli, 1997). Ancak bu tür bir sınıflandırma, özellikle Tip 2 çalışmalarında vurgulanmaktadır. Tip 1 çalışmalarında üç farklı alt-problemin olması nedeniyle, bu tip bir ayrım net bir şekilde ifâde edilmemektedir. Bu nedenle bu çalışmada esnekliği temel alan sınıflandırma kullanılacaktır.

3.1.1 Tip 1 ESTÇP

Kim ve Egbelu (1999), her iş için birden çok süreç plânının olduğu bir problem üzerinde çalışmıştır. Sundukları problem, makina esnekliğini içermediği için Tip 1 ESTÇP olarak adlandırılamaz. Salt süreç plânı esnekliği sözkonusudur. Ancak bu çalışmaya ESTÇP literatüründe sıklıkla atıfta bulunulduğu için Tip 1 ESTÇP sınıfında yer verilmiştir. Çalışmada, işlem sırasından bağımsız hazırlık süresini içeren problemin yayılma süresinin enküçüklenmesi için iki algoritma önerilmiştir. Birinci algoritma "ön-işleme (Ing. preprocessing) algoritması", dal-sınır algoritması ve karma tamsayılı programlamadan oluşmaktadır. İkinci algoritma ise karma tamsayılı programlamadan kaynaklanan, uzun CPU işlem sürelerini önlemek için karma tamsayılı programlama yerine işi başlatma kurallarını kullanmaktadır. Yazarlar, CPU işlem sürelerini ve çözüm kalitesini birlikte değerlendirdiklerinde ikinci algoritma ve birinci algoritma arasında ciddi bir performans farkı olmadığı sonucuna varmıştır.

Baykasoğlu ve diğ. (2004), makalelerinde Baykasoglu'nun (2002) Tip 1 ESTÇP'ye uyarladığı problemlerin dilbilgisel (Ing. grammatical) terimlerle ifâde edilmesi yöntemine, süreç plânı ve makina seçiminin bir olasılıkla karar verilmesini eklemiştir. Yazarlar, makina seçimlerinde olasılığın hesaplanmasında makina hızlarını kullanırken süreç plânı olasılıklarının belirlenmesinde uzman bilgisine gereksinim duyulduğunu belirtmektedirler. Önerdikleri TA metasezgiseliyle, işlerin süreç plânı ve işlemlerin makina seçimleri değiştirilerek komşu çözüm elde edilirken ESTÇP, sipâriş tipi çizelgeleme problemine dönüştürülmektedir. Giffler ve Thompson algoritması, TA algoritmasının belirlediği işi başlatma kurallarını kullanarak çizelge oluşturmaktadır. Çalışmalarında amaç fonksiyonu, "yayılma süresi, toplam teslim gecikmesi süresi ve yük dengesi" performans ölçütlerinden oluşmaktadır. Her iki çalışmada da süreç plânı ve makina seçimlerine eşzamanlı karar verilirken, makinalardaki işlem sıralaması problemi ayrı çözülmektedir.

Park ve Choi (2006), makalelerinde Tip 1 ESTÇP'de kaliteli bir çizelgelemenin yapılabilmesi için süreç plânı seçimi, işlemlerin makinalara yüklenmesi ve makinalardaki işlem sıralamasının belirlenmesi problemlerinin ayrı ayrı çözülmemesi

gerektiğini belirtmişlerdir. Bu düşünceye uygun bir şekilde geliştirilen GA, süreç plânını seçme, yükleme ve sıralama problemlerini birlikte çözmüştür (Bütünleşik çözüm yöntembilimi). Yazarlar, enjeksiyon kalıp fabrikasını temel alan üç sayısal örnek oluşturmuştur. Örnek problemler, bütünleşik ve hiyerarşik GA ile çözülmüştür. Bütünleşik yöntembilimli GA'nın daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang ve Gen (2006), makalelerinde işlem sırasına bağlı hazırlık süresi, "makinalar arası ve fabrikalar arası transfer süresi" ve sabit parti büyüklüğünü (lot) içeren Tip 1 ESTÇP'yi incelemiş; doğrusal olmayan öncelik ilişkisini dikkate alarak uygun işlemlerin kombinasyonlarıyla seçenek işlem sıralarını oluşturmuştur. Yayılma süresinin enküçüklenmesi amacıyla, çok aşamalı karar verme modeline benzer bir yaklaşımla işlem sayısı kadar aşamadan oluşan GA kromozomunu geliştirmişlerdir. Her bir aşama bir işlemi ifâde ederken, aşamaların dizilişinde yâni işlemlerin dizilişinde öncelik ilişkisine uymayan kromozomlar düzenlenmektedir. İşlemler sıralandıktan sonra makinalara yüklenmektedir. Önerilen GA'da, tek noktalı çaprazlama ve "işlem sıraları ve makina seçimleri" için ayrı ayrı mutasyon uygulanmaktadır. Yazarlar, makalelerinde sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü kullansalar da sipârişler, salt tek tip üründen oluşmaktadır.

Chen ve diğ. (2007), özdeş paralel makinalı yeniden girişli süreç özelliğine sahip Tip 1 ESTÇP'nin çözümünde işi başlatma kurallarını kullanan yapıcı bir sezgisel algoritma önermiştir. Problemlerinde işler çok sayıda işlemden oluşurken işlerin, (parça) montajıyla ürünler oluşmaktadır. Her bir işlemin işlenebileceği bir istasyon bulunmaktadır. Ürün ağacı yapısına göre süreç alternatiflerinin belirlendiği problemde her bir istasyon, özdeş paralel makinalardan oluşmaktadır. Yazarlar, yükleme ve sıralama problemlerini hiyerarşik yöntembilimine göre çözmektedir. Öncelikle yükleme probleminde, işi başlatma kurallarıyla yüklenecek işlem belirlenmektedir. Belirlenen işlem, makina yüklerine göre paralel özdeş makinalara atanmaktadır. Sıralama probleminin çözümünde aynı makinadaki işlemler, işi başlatma kurallarına göre sıralanmaktadır. Yazarlar, tek tip ve iki tip ürün içeren test problemlerinde algoritmalarını sınarken, diğer algoritmalarla sonuçlarını karşılaştırmamıştır.

Mishra ve diğ. (2007), Tip 1 ESTÇP'de dış kaynak kullanımını incelemiştir. Çalışmanın amacı, yayılma süresinin enküçüklenmesidir. Çoklu müşteri sipârişleri, seçenek işlem sıraları, transfer süreleri, sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içermesi, montaj ve dış kaynak kullanımının ESTÇP'ye uyumlandırılması, çalışmayı dikkat çekici kılmaktadır. Yazarlar, olurlu çözüm alanını daha etkin araştırabilmek için beş çeşit komşu çözüm oluşturma yöntemi kullanmaktadır. Tavlama Benzetiminde yerel

en iyi çözümden kaçmak için Boltzman fonksiyonu yerine Cauchy fonksiyonu kullanılmıştır. Problemin çözümünde melez TA-TB algoritması önerilmiştir. Önerdikleri algoritma, yükleme ve sıralama problemini eşzamanlı çözdüğü için bütünleşik yöntembilimini kullanmaktadır. TB algoritmasının aynı olurlu çözümleri yeniden denemesini engellemek ve buna bağlı olarak çözümün gelişme hızını arttırmak için TA kullanılmıştır. Problemler oluşturularak algoritmanın performansı test edilmiş ve diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Baykasoğlu ve Özbakır (2008), Baykasoglu ve diğ.'nin (2004) önerdikleri çözüm yönteminde "süreç plânı, makina esnekliği" nin ve işi başlatma kurallarının sayısının çizelgeleme performansına etkisini incelemiştir. Yazarlar, önerilen problemi dilbilgisel terimlerle modellemiş ve TA ile çözmüştür. Yayılma süresi, makina yük dengesi ve işlerin ortalama bekleme süresi, performans ölçütlerine göre makina, süreç plânı esnekliğinin ve işi başlatma kurallarının sayısının etkisi, Taguchi deneyi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre makina esnekliğinin çizelgeleme performansına etkisinin, diğer parametrelere göre daha baskın olduğu belirlenmiştir. Makina esnekliği belirli bir eşik değeri aştıktan sonra çizelgeleme performansında yaşanan artış hızının azaldığı belirtilmektedir.

3.1.2 Tip 2 ESTÇP

Brandimarte (1993), ESTÇP'nin çözümü için işi başlatma kurallarından yararlanan TA tabanlı bir algoritma önermiştir. Yazar, literatürde ilk kez hiyerarşik yöntembilimini kullanarak, yükleme ve sıralama problemlerini ayrı ayrı çözen iki farklı algoritma geliştirmiştir. İlk algoritmada yükleme probleminin çözümünde işi başlatma kuralı; sıralama probleminin çözümünde TA kullanılmıştır. İkinci algoritmada ise yükleme probleminin çözümünde kritik yoldan yararlanılmaktadır. Performans ölçütleri ise ağırlıklı teslim gecikmesi süresi toplamı ve yayılma süresi olarak belirlenmiş, ancak bu performans ölçütleri ayrı ayrı eniyilenmiştir, yâni yazar, bu makalede tek ölçütlü problemle ilgilenmektedir. Brandimarte'nin bu çalışmasında oluşturduğu örnek problemler, birçok makalede geliştirilen algoritmaların testi için kullanılmaktadır.

Dauzere-Peres ve Paulli (1997), Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde bütünleşik yöntembilimini kullanmıştır. Yazarlar, yükleme ve sıralama alt-problemlerini ayrı ayrı çözmek yerine komşu çözüm oluşturma yöntemini değiştirerek birlikte çözmektedir. Bir işlem, başka bir yerleşim noktasına (lokasyona) atanırken eğer makina numarası değişmiyorsa, aynı makinada bir sıralama değişikliğine neden olmaktadır. Aksi durumda işlemin yüklendiği makina da değişmektedir. Yazarlar, kritik yolu kullanarak

seçenek komşu çözümleri oluştururken, yayılma süresini arttırmayacak komşu çözümlerin belirlenmesi için beş farklı komşu çözüm tipi geliştirmiştir. Beş farklı komşu çözüm tipi, yayılma süresini azaltma potansiyeline göre sıralanarak uyum değerini en fazla geliştirme olasılığı olan sınıfa düşen komşu çözümlerin seçilmesi önerilmiştir. TA algoritmasında ilk çözüm oluşturulurken, makina yükleri dengelenmeye çalışılmaktadır. Yazarlar, literatürde yer alan veri kümelerini ve kendi oluşturdukları problemleri, önerdikleri TA ile çözerek sonuçları karşılaştırmaktadır.

Mastrolilli ve Gambardella (1999), Dauzere-Peres ve Paulli'nin (1997) önerdiği bütünleşik yöntembilimli TA algoritmasının komşu çözüm oluşturma yönteminde değişiklikler yapmıştır. İki farklı komşu çözüm oluşturma yöntemi önerilmiştir. Denenen komşu çözümlerin gerçek yayılma süresinin hesaplanması, çok yüksek CPU işlem sürelerini gerektirdiğinden tahminî yayılma süresinin hesaplanması için yeni bir yöntem önerilmiş ve TA yordamlarına (prosedürlerine) eklenmiştir. Böylece daha kısa sürelerde etkin bir araştırma yapılması garanti altına alınmıştır. Yazarların sunduğu algoritmanın performansı, test problemlerinde sınanmıştır. Algoritma sonuçları, 2000 ve öncesi çalışmalarla karşılaştırıldığında algoritmanın performansının üstün olduğu görülmektedir.

Thomalla (2001) makalesinde, teslim gecikmesi sürelerinin dengeli dağılması için ikinci dereceden teslim gecikmesi sürelerinin ağırlıklı toplamını enküçüklemeye çalışmıştır. Yazar, problemin çözümü için makina kapasite kısıtlarına Lagrange gevşetmesi kullanan bir sezgisel algoritma önermiştir. Diğer çalışmalardan bir farkı da, daha önceden belirlenmiş bakım sürelerinin modele eklenmesidir. Ufak ölçekli problemler, önerilen algoritmayla çözülüp performansı çeşitli işi başlatma kuralları ve dal-sınır algoritmasıyla karşılaştırılmıştır.

Kacem ve diğ. (2002), Tip 2 ESTÇP'nin çözümü için yerelleştirme yaklaşımı (Ing. Approach by localization) adını verdikleri bir yöntem geliştirmiştir. Yerelleştirme yaklaşımıyla yükleme problemi çözülmektedir. Sıralama problemi ise işi başlatma kuralları ile çözülmektedir. Ayrıca yerelleştirme yaklaşımıyla GA'nın birleştirildiği bir yöntem de önerilmektedir. Önerilen algoritma, yükleme ve sıralama problemlerini ayrı ayrı çözdüğü için hiyerarşik yöntembilimini kullanmaktadır. Literatürde yer alan çeşitli algoritmalarla performansları karşılaştırıldığında, önerdikleri algoritmanın performansının üstün olduğu görülmektedir. Özellikle CPU işlem süreleri, önemli oranda düşürülmüştür. Ayrıca bu çalışmada tasarlanan yerelleştirme yaklaşımı, literatürde en çok atıfta bulunulan algoritmalardan biridir.

Alvarez-Valdes ve diğ. (2005), bakım, işlemlerin paralel işlenmesi (Ing. overlapping) ve beklemeden işlenme gibi çeşitli kısıtları olan bir problemi, cam endüstrisini temel alarak oluşturmuştur. Makaleye göre, sıcak camın, süreç gereği beklemeden işlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle partiler hâlinde makinalarda işlenen parçalar, o partinin o makinada tamamlanmasını beklemeden diğer makinalara geçebilmektedir. Bâzı işler, daha âcil olabilmektedir. Bâzı makinalar salt bir işi yapabilirken, bâzıları birden çok işlemi aynı anda yapabilmektedirler. Yazarlar, erken ve geç bitirme mâliyetini enküçüklemek için sezgisel algoritma önermiştir. Önerilen sezgisel algoritmanın, ilk çözümü nasıl oluşturduğu ve hangi komşu çözümü seçeceği, makalede ayrıntılı bir şekilde ifâde edilmiştir. İlk çözüm oluşturulduktan sonra, önce ardılı olmayan işlemlerin yeri teslim tarihleri dikkate alınarak değiştirilmektedir. Sonraki aşamada, eğer iş gecikiyorsa ardılı olan işlemi sola kaydırarak ardıl işleme yer açılmaktadır. Yazarlar, algoritmanın gerçek bir uygulamada kullanıldığını, sonuçların iyi, CPU işlem sürelerinin çok kısa olduğunu belirtseler de uygulama sonuçları verilmemiştir.

Gomes ve diğ. (2005), ara stok kapasitesi sınırlandırılmış, istasyonlarda özdeş paralel makinalar bulunan ve yeniden girişli akışa (bir işin aynı istasyona en az iki kere uğraması) sahip ESTÇP'yi çözmek için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Amaç, "sipâriş teslim gecikmesi mâliyeti, ara stok mâliyeti, erken teslim mâliyeti ve çizelgeleme dönemi sonunda tamamlanamayan sipârişlerin mâliyeti" toplamının enküçüklenmesidir. Yazarlar, makalelerinde sıkı ve gevşek teslim tarihli sipârişli problemleri, hem sipâriş tipi hem de akış tipi üretim sistemlerinde çözmüştür. Artan CPU işlem kapasiteleri nedeniyle CPU işlem sürelerinin hızla düştüğü ve önerilen karma tamsayılı programlama modelinin uygulanabilirliğinin arttığı vurgulanmıştır.

Xia ve Wu (2005), çalışmalarında yayılma süresi, toplam makina yükü ve kritik makina yükünden oluşan çok ölçütlü ESTÇP'nin çözümü için melez PSO-TB algoritması önermiştir. Yazarlar, sıralama ve yükleme problemlerini ayrı ayrı çözen hiyerarşik yöntembiliminden yararlanmıştır. PSO ile yükleme, TB ile sıralama problemi çözülmektedir. TB algoritması, aynı makinada ardışık dizilmiş işlemlerin yerlerini değiştirerek komşu çözüm oluşturmaktadır. Ayrıca makalede makinaların kısmî esnek (Bâzı işlemler, bâzı makinalarda yapılamaz.) ve tam esnek (Tüm işlemler, tüm makinalarda yapılabilir.) olması durumlarını da içeren örnek problemler çözülerek, önerdikleri algoritmanın performansı test edilmiştir. Kacem veri kümesi sonuçları incelendiğinde sonuçların o ana kadar elde edilmiş en iyi sonuçlar olduğu görülmektedir. Ancak CPU işlem süreleri makalede belirtilmemiştir.

Chan ve diğ. (2006), sabitleyici ve takımlar gibi kısıtlı kaynakları içeren özdeş paralel makinalı Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde hiyerarşik yöntembilimini kullanan çift katmanlı GA önermiştir. Yükleme probleminde yayılma süresi ve makina boş kalma mâliyetinin enküçüklenmesi; sıralama probleminde yayılma süresinin enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Yazarlar, makina boş kalma mâliyetinin düşük tutulmasının, kaynakların daha etkin kullanılmasına neden olacağını belirtmektedir. Öncelikle sabitleyici gibi kısıtlı kaynakları dikkate almayan sipâriş tipi çizelgeleme ve esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemlerinde, algoritmanın performansı test edilmiştir. Kısıtlı kaynak sıkılığı (aynı kaynakları kullanan işlem sayısının göreceli olarak arttığı durum) gevşekten sıkıya doğru değiştirildiğinde algoritmanın nasıl sonuçlar ürettiği araştırılmıştır.

Kunadilok (2007), sınırlandırılmış ara stok kapasiteli, yeniden-girişli ESTÇP'yi incelemiştir. Yazar doktora tezinde, her iş merkezinin eş makinalara sahip olduğunu, makina hazırlık sürelerinin işlem sırasına bağlı değiştiğini ve işlerin hazır olma zamanlarının sıfırdan farklı olduğunu kabul etmiştir. Ağırlıklı teslim gecikmesi süresi toplamını enküçüklemek için rassal anahtarlı GA (Ing. random key GA) ve geniş adımla çeşitlendirmeli TA (Ing. large step diversification TS) algoritmaları önerilmiş, küçük ölçekli problemlerin çözümünde karma tamsayılı programlama ile bu iki algoritmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. TA algoritmasında, komşu çözüm oluşturmada kritik yoldan yararlanılmaktadır. Çoklu takaslar gerçekleştirilerek Gantt diyagramında ortaya çıkabilecek boş anlar azaltılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca çözümün gelişmediği duruma ulaşılması hâlinde, TA algoritması geniş adımlı çeşitlendirme moduna geçerek, çözüm, yerel en iyi çözümden uzaklaştırılmaktadır. Genel en iyi çözüme ulaşılmaya çalışılmaktadır. Test problemleri kullanılarak, önerilen iki algoritmanın perfomansları, birbirleriyle ve basit sezgisellerle karşılaştırılmıştır.

Fattahi ve diğ. (2007), küçük ölçekli problemler için karma tamsayılı doğrusal programlama, büyük ölçekli problemler için ise çözüm süresi görece kısa olan çeşitli metasezgisel algoritmalar önermiştir. Yazarlar, makalelerinde performans ölçütü olan "yayılma süresini" enküçüklemek için hiyerarşik ve bütünleşik yöntembilimini kullanan TB ve TA algoritmalarını denemiştir. Ayrıca bütünleşik ve hiyerarşik yöntembilimlerinden hangisinin daha başarılı olduğunu incelemişlerdir. Sayısal örnekler üzerinde yapılan testlerde hiyerarşik çözüm yönteminin çok daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Yazarlar, küçük ölçekli problemler için TB/TA hiyerarşik yöntemini önerirken, büyük ölçekli problemler için TA/TB hiyerarşik yönteminin daha iyi sonuçlar ürettiğini belirtmiştir.

Saidi-Mehrabad ve Fattahi, (2007) işlem sırasına bağlı hazırlık sürelerini içeren ESTÇP'yi TA ile çözmüştür. Sunulan problemin matematiksel modeli oluşturularak küçük bir problem, önerilen algoritmayla çözülmüştür. Yazarlar, TA ile elde edilen sonuçları, dal-sınır algoritması sonuçlarıyla karşılaştırmış, kısa CPU işlem sürelerinde en iyi çözüme ulaşıldığı belirtilmiştir. Uyum değerinin standart sapmasının, durdurma ölçütü değerine göre nasıl değiştiği de bu çalışmada incelenmiştir.

Gao ve diğ. (2007), Tip 2 ESTÇP'de "yayılma süresi, kritik makina yükü ve toplam makina yükü" nden oluşan çok ölçütlü amaç fonksiyonunu enküçüklemeye çalışmıştır. Yazarlar, bu amaca ulaşmak için melez "değişen darboğaz-GA" (Ing. shifting bottleneck-GA) algoritmasını önermiştir. Yerel araştırmada yeri değiştirilecek işlemlerin belirlenmesinde kritik yol kullanılmaktadır. İncelenen problemde 2 farklı komşuluk arama mekanizması önerilmiştir. Birinci yöntemde aynı makinada ardışık kritik işlemlerden (kritik blok) ilk iki veya son iki işlem takas edilmektedir. İkinci yöntemde ise kritik işlem, farklı bir makinaya yüklenmektedir. GA ve yerel araştırma algoritmasının her ikisi de bütünleşik yöntembilimini kullanmaktadır. Geliştirdikleri algoritma, Kacem ve diğ. (2002) ve Brandimarte'nin (1993) veri kümeleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın performansının iyi olduğunu kanıtlamıştır.

Liouane ve diğ. (2007), yayılma süresi performans ölçütlü ESTÇP'yi KKO-TA melez metasezgiseli yöntemi kullanarak çözmeyi önermektedir. Yazarlar, KKO ile çizelge oluşturduktan sonra kritik yoldan seçilen işlemleri, TA ile başka yerleşim noktalarına atayarak çözümü geliştirmektedir. Kacem veri kümesi, önerilen algoritmayla çözülmüş ve performansı, Kacem ve diğ.'nin (2002) önerdiği algoritmayla karşılaştırılmıştır.

Shi-Jin ve diğ. (2007), yayılma süresi, toplam makina yükü ve kritik makina yükünün ağırlıklı toplamını enküçüklemek için çok ölçütlü ESTÇP'nin çözümünde dal-sınır algoritmasına benzeyen filtrelenmiş kiriş araştırma (Ing. filtered-beam-search) yöntemini önermiştir. Bu algoritma, işi başlatma kurallarını yerel ve genel değerlendirme fonksiyonlarında kullanarak bir sonraki adımda incelenecek düğümleri belirlemektedir. Yazarlar, geliştirilen problemlerde çeşitli işi başlatma kurallarını yerel ve genel değerlendirme fonksiyonu olarak kullanmış ve performansa olan etkisini irdelemiştir. Ayrıca Kacem veri kümesi, önerilen algoritmayla çözüldüğünde Kacem'in yerelleştirme yaklaşımından daha iyi sonuçların daha kısa CPU işlem sürelerinde elde edildiği vurgulanmıştır.

Pezzella ve diğ. (2008), Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde GA metasezgiselini kullanmaktadır. Yazarlar, Kacem ve diğ.'nin (2002) önerdiği yerelleştirme yaklaşımıyla ilk çözümü oluşturmaktadır. GA ile ilk çözüm geliştirilmektedir. Yeni bireyler oluşturulurken yükleme ve sıralama problemleri için ayrı ayrı çaprazlama ve mutasyon operatörü denenmiştir. Ayrıca popülasyonu oluşturacak bireylerin seçiminde üç farklı yöntemden biri rassal kullanılmaktadır. Literatürde yer alan dört farklı veri kümesi, önerilen algoritma ile çözülerek yayılma süresi enküçüklenmeye çalışılmıştır. Algoritmanın performansı diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre önerilen algoritmanın performansının, diğer algoritmalara yakın olduğu görülmektedir.

Gao ve diğ. (2008), makalelerinde yayılma süresinin enküçüklenmesini, yüksek öncelikli performans ölçütü kabul ederken, aynı yayılma değerine sahip iki çözüm elde edilirse en iyi çözümü belirlemek için ikinci performans ölçütü olarak "en büyük makina yükü" kullanılmaktadır. Toplam makina yüküne ise en düşük önem verilmektedir. Yazarlar, problemin çözümünde GA kullanmaktadır. Yakınsama hızını arttırmak için değişken komşuluk arama yöntemi (Ing. Variable Neighborhood Descent) GA ile birlikte kullanılmıştır. Her bir yavru birey, popülasyona eklenmeden önce yerel araştırmayla geliştirilmektedir. Yazarlar, kritik yolda bir değişiklik yapılmadan yayılma süresinin azaltılamayacağı düşüncesini yerel araştırmada kullanmaktadır. Tek işlem ve çift işlem yer değiştirilerek yerel araştırma gerçekleştirilmektedir. İki işlem yer değiştirme CPU işlem sürelerini arttırdığı için, her bir GA iterasyonunda bir kez kullanılırken, tek işlem yer değiştirme, yerel en iyi çözüme ulaşana dek sürmektedir. Literatürde yer alan problemler çözülerek algoritmanın performansı irdelenmektedir. Algoritma, yükleme ve sıralamayı eşzamanlı gerçekleştirdiği için bütünleşik yöntembilimini kullanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın performansının iyi olduğunu göstermektedir.

Vilcot ve Billaut (2008), sıraya bağlı hazırlık süreli ve doğrusal olmayan akışlı (İşlemlerin bâzılarının birden çok öncül işleminin olduğu durum) ESTÇP'yi incelemiştir. Bu çalışmada en büyük gecikme süresi (L_{max}) ve yayılma süresi için pareto optimal çözümlere ulaşmak amaçlanmaktadır. Yazarlar, problemin çözümünde GA ve TA metasezgisellerini ayrı ayrı ve birlikte kullanmıştır. TA'da ilk çözüm oluşturulurken makina yükü dengelenerek yükleme; işi başlatma kurallarıyla da sıralama gerçekleştirilmektedir. TA'da komşuluk aramada kritik işlemler, başka bir yerleşim noktasına atanmaktadır (Bütünleşik yöntembilimi). "TA ilk çözümlü" ve "rassal ilk çözümlü" iki farklı GA ile problemler çözülerek performansı karşılaştırılmıştır. TA ilk çözümlü GA'nın daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Yazarlar, çalışmalarının sıraya bağlı hazırlık süresini içerdiğini belirtseler de, çözdükleri veri kümesinde sıraya bağlı hazırlık süreleri bulunmamaktadır.

Rossi ve Boschi (2009), çalışmalarında özdeş paralel makinalı Tip 2 ESTÇP'de, yayılma süresinin enküçüklenmesi için melez GA-KKO yöntemini önermiştir. GA ve KKO, aynı anda ürettiği çözümleri yerel araştırmayla geliştirdikten sonra birbiriyle paylaşarak popülasyonu çeşitlendirmektedir. Melez algoritma, gelişme olmayan iterasyon sayacına ulaşması durumunda yeniden ilk çözümler oluşturarak yeniden çalıştırılmaktadır. Yazarlar, bütünleşik yöntembilimini kullanan önerdikleri algoritmayı sayısal örneklerle test etmiş ve performansının, çalışmada kullanılan melez yöntemin bileşenleri olan "GA ve KKO" dan daha üstün olduğunu belirtmiştir.

Xing, ve diğ. (2009) "yayılma süresinin, makinaların toplam yükünün ve kritik makina yükünün" ağırlıklı toplamını enküçüklemek için KKO'dan yararlanan simülasyon modelini önermektedir. Simülasyonda yükleme modülü, kritik makina yükü ve toplam makina yükü toplamını azaltmayı amaçlarken, sıralama modülünde rassal sıralama yapılmaktadır. Yazarlar, rassal sıralama nedeniyle simülasyon performansının yeterli olmadığını vurgulamış ve bu sorunu gidermek için simülasyonda sıralama modülüne KKO'yu eklemiştir. Ayrıca yükleme modülünün performansının arttırılması için işlemleri hızlı gerçekleştiren makinaların araştırılması denenmiştir. Yazarların önerdiği hiyerarşik yöntembilimli simülasyon modelinin performansı, diğer algoritmalarla (Kacem'in önerdiği yerelleştirme yaklaşımlı GA ve Xia ve Wu'nun önerdiği PSO-TB melez algoritması) karşılaştırılmıştır. Bu makalede Kacem veri kümesi çözüm sonuçları incelendiğinde, elde edilen değerlerin, literatürde sunulan en iyi değerler olduğu görülmektedir.

Gen ve diğ. (2009), Zhang ve Gen'in (2006) önerdiği çok aşamalı işlem tabanlı GA ile Gao ve diğ.'nin (2007) önerdiği "değişken komşuluk arama" yerel araştırma algoritmasını birleştirmiştir. Ancak Kacem veri kümesinde test edilen algoritmanın performansının, Gao ve diğ.'nin (2007) önerdiği algoritmadan farklı olmadığı görülmektedir. 56 işlemli, sıraya bağlı hazırlık süresi içermeyen bir problemi 136 dakika gibi uzun CPU işlem sürelerinde çözmesi dikkat çekicidir.

Fattahi ve diğ. (2009), paralel yapılan işlemlere sahip Tip 2 ESTÇP'nin hiyerarşik TB ile çözülmesini önermektedir. Yazarlar, bu çalışmada "Fattahi ve diğ.'nin (2007)" önerdiği çift katmanlı hiyerarşik yöntembilimli TB algoritmasını kullanmıştır. Çift katmanlı TB algoritması, küçük ölçekli problemlerde dal-sınır algoritmasının ürettiği en iyi çözümlere ulaşmıştır. Büyük ölçekli problemlerde dal-sınır algoritmasının ürettiği üst ve alt sınır değerler ile karşılaştırılmaktadır.

Bagheri ve diğ. (2010) makalelerinde, literatürde sıklıkla incelenen Kacem veri kümesi problemlerini çözmek için bütünleşik yöntembilimini kullanan yapay bağışıklık sistemi algoritmasını (Ing. Artificial immune algorithm) önermiştir. Kacem veri kümesinde "yayılma süresi, makinaların toplam yükü ve kritik makina yükünün" ağırlıklı toplamı enküçüklenmeye çalışılmıştır. İlk çözüm, Kacem ve diğ.'nin (2002) geliştirdiği yerelleştirme yaklaşımı kullanılarak belirlenmektedir. İlk çözüm, yapay bağışıklık sistemi metasezgiseli ile geliştirilmektedir. Kısa CPU işlem sürelerinde Kacem veri kümesinde başarılı sayılabilecek sonuçlar elde edilirken yayılma süresinin enküçüklenmeye çalışıldığı Fattahi ve diğ.'nin (2007) Fdata veri kümesinde ortalama %5 daha iyi sonuçlar üretilmiştir.

Wang ve Yu (2010), makina bakımı sürelerini içeren Tip 2 ESTÇP'yi filtrelenmiş kiriş araştırma yöntemi ile çözmeyi önermektedir. Yazarlar, oluşturdukları problemde kritik makina yükü, toplam makina yükü ve yayılma süresinin ağırlıklandırılmış toplamını enküçüklemeye çalışmaktadır. Önerilen algoritmanın performansının testi için Kacem veri kümesi makina bakım sürelerini içerecek şekilde değiştirilmiştir. Algoritmanın performansı, değiştirilen veri kümesinde test edilerek GA ile performansı karşılaştırılmıştır.

Yazdani ve diğ. (2010), Tip 2 ESTÇP'de yayılma süresini enküçüklemek için değişken komşuluk arama algoritmasını önermektedir. Yazarlar, Pezzella ve diğ.'nin (2008) önerdiği ilk çözüm oluşturma yöntemini kullanmaktadır. Önerdikleri algoritmada sadece yükleme, sadece işlem sıralaması değişikliği ve her ikisinide aynı anda gerçekleştiren komşu çözüm oluşturma yöntemleri sırayla kullanılmaktadır. Kacem veri kümesi, sadece yayılma süresini enküçüklemek amacıyla çözülmüştür. Ancak elde edilen sonuçların diğer algoritmalara göre başarısız olduğu görülmektedir.

Rajkumar ve diğ. (2011) "yayılma süresinin, makinaların toplam yükünün ve kritik makina yükünün" ağırlıklı toplamını enküçüklemek için hiyerarşik çözüm yöntembilimini kullanan Grasp (Ing. greedy randomized adaptive search procedure) metasezgiselini önermektedir. Bu yöntemde bir olurlu ilk çözüm oluşturulduktan sonra yerel araştırma aşamasında bu ilk çözüm geliştirilmektedir. Yerel araştırma aşaması, yerel en iyi çözüm bulunana kadar devam etmektedir. Yazarlar, gerek yükleme gerekse sıralama probleminin çözümü için ayrı ayrı Grasp metasezgiseli kullanmaktadır. Önerdikleri yöntem, 3 örnek problem üstünde test edilmiştir.

Zhang ve diğ. (2011), Tip 2 ESTÇP'de yayılma süresini enküçüklemek için işlem bazlı temsilden faydalanan GA kullanmıştır. Yazarlar, temsille oluşturulan çizelgeyi

önerdikleri algoritma ile aktif çizelgelere çevirmektedir. Yazarlar, ilk popülasyonu oluştururken global, yerel ve rassal seçim adını verdikleri üç farklı yöntem kullanmaktadır. Literatürde bulunan veri kümeleri, önerdikleri GA ile çözülmüştür. Ancak 1999'da literatüre sunulan Mastrolili ve Gambardella'nın TA algoritması ile sonuçların karşılaştırılması, algoritmanın performansı konusunda net bir bilgi vermemektedir.

Li ve diğ. (2011), tek ölçütlü Tip 2 ESTÇP'de yayılma süresini enküçüklemek için TA metasezgiseli önermektedir. Yazarlar, ilk çözümü oluştururken makina yükleme için dört; işlem sıralama için dört farklı yöntem önermektedir. Yükleme probleminin çözümünde kullanılan TA metasezgiseli komşu çözümü belirlerken basit işi başlatma kurallarının kombinasyonundan oluşan bir sezgisel kullanmaktadır. Sıralama probleminin çözümünde kritik yol kavramı kullanan komşu çözüm oluşturma yönergesi kullanılmaktadır. Algoritmanın performansı, çeşitli veri kümelerinde sınanarak performansının kabul edilebilir seviyede olduğu belirtilmiştir.

Moslehi ve Mahnam (2011), "yayılma süresinin, makinaların toplam yükünün ve kritik makina yükünün" ağırlıklı toplamını enküçüklemek için bütünleşik çözüm yöntembilimi kullanan melez PSO metasezgiselini önermektedir. PSO ile yükleme ve sıralama problemi çözülürken her iterasyonda kritik yolda yer alan işlemler mevcut makinadan, daha hızlı gerçekleştirilebilecek makinalara yüklenerek yayılma süresi azaltılmaya çalışılmaktadır. Kacem veri kümesi, önerilen algoritmayla çözülmüştür. Önerdikleri algoritmanın performansı, literatürde yer alan diğer algoritmalara yakın olduğu görülmektedir.

3.2 MSÇP Literatürü

Sipâriş tipi üretim ortamlarında, her bir sipârişte çeşitli ürünlerden değişik miktarlarda talep edilmesi yaygın olarak karşılaşılan durumdur (Bâzı durumlarda talep miktarı 1 ile sınırlandırılmaktadır). Sipârişi oluşturan ürünlerin tümünün teslim tarihlerinde sevke hazır olması, müşterilerin beklentilerini karşılamak ve üreticilerin mâliyetlerini düşürmek için gereklidir. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından MSÇP incelenmiştir. Ancak bu çalışmalarda genelde sipâriş-ürün ikilileri kullanılmaktadır.

İlk kez Julien ve Magazine (1990), MSÇP'yi incelemiştir. Makalelerinde sıraya bağlı hazırlık süreli, iki ürün aileli, tek makinalı çizelgeleme problemi oluşturulmuştur. Yazarlar, dinamik programlama ile siparişlerin tamamlanma zamanı toplamını enküçüklemektedir.

Liao ve Chuang (1996), işlerin ürün ailelerine göre gruplandığı tek makinalı MSÇP'yi incelemiştir. İncelenen problemde sipârişin, aynı ürün ailesinden ürünleri içermemesi gerekmektedir. Eğer farklı iki ürün ailesinden iş, arka arkaya üretilecekse hazırlık süresi gerekmektedir. En büyük teslim gecikmesi süresi ve hazırlık süresi toplamı arasında bir ödünleşme (Ing. trade-off) noktası bulunarak en iyi çözümler belirlenmeye çalışılmıştır. Dal-sınır algoritması kullanılarak, pareto optimal sonuçlar belirlenmiş ve gelişen pazar koşullarına göre en uygun çözümün seçilmesinin doğru olacağı ifâde edilmiştir. Eğer piyasa rekâbetçiyse, firma daha çok hazırlık yapacak, yâni daha az gecikmeyle sipârişlerini teslim edecektir.

Blocher ve Chhajed (1996), makalelerinde paralel özdeş makinalı MSÇP'de sipârişlerin ortalama tamamlanma zamanlarını enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Yazarlar, incelenen problemin NP-zor olduğunu kanıtladıktan sonra önerilen problemin çözümü için işi başlatma kurallarından yararlanan sezgisel algoritmalar geliştirmiştir. Önerilen "iki bileşenli sıralı sezgisel", sipârişlerin sıralamasını yaptıktan sonra "sipârişlerin işleri" ni makinalara yüklemektedir. İki bileşenli dinamik algoritmada ise bir sonraki sipârişin belirlenmesine, bir önceki sipârişin işleri makinalara yüklendikten sonra karar verilmektedir. Yazarlar, alt sınır değer geliştirerek sezgisel algoritma sonuçlarını, bu alt sınır değerle karşılaştırmıştır. Sezgisel sonuçlarının alt sınır değere çok yakın olduğu belirtilmiştir. Ayrıca makina sayısı, sipâriş sayısı, sipârişte talep edilen ortalama ürün sayısı, işlerin işlem süresi dağılımı, sipârişte talep edilen işlerin dağılımı gibi değişkenlerin sezgisel algoritmanın performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. İş, sipâriş ve makina sayısı etkisinin (α=) 0,05 önem düzeyinde olduğu görülmüştür. Ayrıca sezgiseller arasında performans farkının olmadığı belirtilmiştir.

Blocher ve diğ. (1998) sipâriş tipi atölye (esnek sipâriş tipi çizelgeleme probleminin özel hâli) ve MSÇP'yi birleştirmiştir. Yazarlar, sipâriş performansının arttırılmasında iş bazlı işi başlatma kuralları yerine, sipâriş bazlı işi başlatma kurallarının yeğlenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Simülasyonlarla çeşitli teslim tarihleri sıkılığı ve atölye yararlanma oranlarında, ortalama sipâriş akış süresi ve toplam teslim gecikmesi süresinin nasıl değiştiği test edilmiştir. Sonuç kısmında, sipâriş bazlı işi başlatma kurallarının, iş bazlı işi başlatma kurallarından daha başarılı olduğu ifâde edilmiştir. MSÇP ile sipâriş tipi çizelgeleme problemlerinin birleştirilmesi, bu çalışmayı diğer MSÇP çalışmalarından farklı kılmaktadır.

Yang ve Posner (2005), çalışmalarında iş-işlem veya sipâriş-iş yerine parti-iş ikilisini kullanmıştır. İncelenen problemde her bir makina, k faklı işi gerçekleştirebilmektedir. Önceki MSÇP'lerde olduğu gibi, her partinin işleri eşzamanlı yapılabilmektedir.

Problemi çözmek için işi başlatma kurallarını kullanan üç farklı sezgisel algoritma önerilmiştir. 2. ve 3. sezgisel algoritmanın iki paralel makinalı durumda üretebileceği en kötü çözümün, en iyi çözümden ne kadar kötü olabileceği kanıtlanmıştır. İki sezgisel de, büyük boyutlu problemlerde sınanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yang (2005), değişik özellikli MSÇP'ler için problemin zorluk yapısını incelemiştir. Yazar, makalesinde özellikle MSÇP'nin hangi problemlerde kullanılabileceğini irdelemiştir. Montaj istasyonlarında, bir ürünün nihaî duruma gelebilmesi için, ürünü oluşturan tüm parçaların montaja hazır olması gerekmektedir. Bu problemin, sipârişi oluşturan ürünlerin aynı anda müşteriye gönderilmesiyle eşdeğer olduğu vurgulanmaktadır.

Ahmadi ve diğ.'nin (2005), lens üretimini temel alan problemlerinde her bir ürün, bu ürüne ayrılmış bir makina tarafından işlenebilmektedir. Problemlerinde, her bir sipârişte talep edilen ürün sayısı birden büyüktür. Yazarlar, özellikle sipârişi oluşturan ürünlerin aynı zamanda sevk edilmesi gerekliliğine dikkat çekmektedir. Bu nedenle MSÇP'nin gerçek üretim ortamları için önemli olduğunu ifâde etmektedir. Yedi sezgisel algoritma geliştirilerek, sipârişlerin ağırlıklı tamamlanma zamanı toplamı enküçüklenmeye çalışılmış, sayısal örnekler çözülerek önerilen algoritmaların performansı test edilmiştir.

Leung ve diğ. (2005), salt makinaların bir tip ürünü üretebildiği MSÇP'yi makalelerinde incelemiştir. Yazarlar, problemi paralel işlemeli serbest dolaşımlı atölye olarak adlandırmaktadır. Serbest dolaşımlı atölyede aynı anda aynı ürünün işlemleri yapılamadığı için serbest dolaşımlı atölyeye, paralel işlemeli ön adı eklenmiştir. Sunulan problemin, salt üç makinadan oluşması durumunda bile problemin NP-zor olduğu kanıtlandıktan sonra çeşitli işi başlatma kuralları ve TA kullanan algoritmalar örnek problemleri çözmüştür. TA algoritması, işi başlatma kurallarının elde ettiği en iyi çözümü geliştirmektedir.

Leung ve diğ. (2006), bir sipârişin her ürününün paralel özdeş makinalarca üretilebildiği MSÇP'yi incelemiştir. Sipârişlerin tamamlanma zamanlarının ağırlıklı toplamının enküçüklenmesi için, işi başlatma kurallarını kullanan dokuz sezgisel algoritma önerilmiştir. Yazarlar, bu algoritmaları oluştururken "Blocher ve Chhajed'in (1996) makalesinde" ifâde edilen iki bileşenli sezgiselden yararlanmıştır.

Lin ve Kononov (2007), salt o iş için ayrılmış makinalara sahip (Ing. dedicated machine) MSÇP'de geciken iş sayısının ağırlıklı toplamını ve toplam geciken iş sayısını ayrı ayrı enküçüklemeye çalışmıştır. Önceki çalışmalara paralel şekilde, aynı işin değişik işlemlerinin aynı anda gerçekleştirilebileceği kabul edilmektedir.

Yazarlar, geciken iş sayısının ağırlıklı toplamı ve toplam geciken iş sayısı problemleri için iki farklı doğrusal programlama tabanlı yakınsama algoritması (Ing. LP based approximation algorithm) önermişlerdir.

Erel ve Ghosh (2007) makalelerinde Julien ve Magazine (1990) gibi tek makinalı MSÇP'yi modellediler. Her ürünün ait olduğu ürün aileleri belirlenip, makinalarda aile geçişlerinde hazırlık süresi dikkate alınmıştır. Yazarlar, önce önerilen problemin zorluğunu incelediler ve NP-zor olduğunu kanıtladılar. İkinci aşamada sipârişlerin tamamlanma süresi toplamı, dinamik programlama tabanlı bir algoritma ile enküçüklenmeye çalışıldı. En son bölümde algoritmanın kabul edilebilir CPU sürelerini geçmemesi için küçük-boyutlu problemler üzerinde test edilmesi gerektiği vurgulandı. Algoritmanın sayısal örnekler üzerindeki testi bu makalede gerçekleştirilmedi.

Hazır ve diğ. (2008), makalelerinde tek makinalı, ürün tipine bağlı hazırlık süreli MSÇP'de sipâriş akış süresi toplamını enküçüklemeye çalışmıştır. Problem, TB, GA, TA ve KKO gibi metasezgisellerle çözülüp performansları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca yazarlar, ürün tipine bağlı hazırlık süresinin, müşteri-ürün yoğunluk oranının, ürün ve sipâriş sayısının, algoritmaların performansı üzerindeki etkisini de irdelemiştir (Eğer müşteri-ürün oranı 1 ise, müşteri sipârişinde tüm ürünleri talep etmektedir). Yazarlar, artan müşteri-ürün oranının problemi zorlaştırdığını ifâde etmiştir. Müşteri-ürün oranı düşük ise TB iyi sonuçlar üretirken oran arttığında TB performansı zayıflamaktadır. Buna karşın TA ve KKO performansı TB'ye göre belirgin bir şekilde olumlu yönde farklılaşmaktadır. Ayrıca küçük ölçekli problemlerde TB; büyük ölçekli problemlerde TA ve KKO'nun iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Leung ve diğ. (2008a), her makinanın salt belirli bir ürünü üretebildiği (adanmış makina) ve her makinanın tüm ürünleri üretebildiği iki durumu ayrı ayrı incelemiştir. Her iki durumda da tüm ürünler, eşzamanlı işlenebilmektedir. Esnekliğin olmadığı durumda işi başlatma kuralları ve bâzı kısıtların gevşetildiği doğrusal programlama tabanlı sezgisel algoritma; esnekliğin olduğu durumda "Blocher ve Chhajed'in (1996) makalesinde aktarılan iki bileşenli dinamik sezgisel ve sıralı sezgisel algoritmalarına benzer iki algoritma önerilmiştir. Yazarlar, sıralı sezgisel algoritmanın daha başarılı sonuçlar ürettiğini belirtmektedir. Bu sonucun, literatürle çeliştiği vurgulanmıştır.

Leung ve diğ. (2008b) iş-kesmenin izin verildiği, özdeş, paralel makinalardan oluşan ve her paralel makinanın k farklı ürün üretebildiği problemlerinde, her sipârişin ürünleri eşzamanlı üretilebilmektedir. Yazarlar, sunulan problemin uygulanabileceği

iki durumu makalelerinde belirtmiştir. Birinci durumda sevkiyat mâliyetlerinin azaltılması için aynı sipârişin ürünleri aynı anda müşteriye gönderilmektedir; ikinci durumda ise araba onarımında aynı anda birden çok parça operatörlerce değiştirilmektedir (Operatörler, makina gibi düşünülmektedir). Makalede, 2 makinalı ve eşit önem dereceli sipârişler sözkonusu iken problemin NP-zor olduğu kanıtlandıktan sonra, ağırlıklı tamamlanma zamanı toplamının enküçüklenmesi için işi başlatma kuralları kullanan sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Hsu ve Liu (2009), makalelerinde sipâriş tipi çizelgeleme problemiyle müşteri sipârişlerini çizelgeleme problemini birleştirmiştir. Çalışmalarında ara stok seviyesi azaltılmaya çalışılmaktadır. Yazarlar, üç basit işi başlatma kuralını kullanarak basit bir öncelik göstergesi geliştirmiştir. Bu göstergeyi kullanarak yeni bir işi başlatma kuralı geliştirilmiştir. Yazarlar, Blocher ve diğ.'nin (1998) gerçekleştirdiği benzetime benzer bir test düzeneğiyle geliştirdikleri işi başlatma kuralının performansını, çeşitli işi başlatma kurallarıyla karşılaştırmaktadır.

Liu (2009), parti bölme (Ing. lot streaming) sıraya bağlı hazırlık süresi gibi süreç özelliklerine sahip sipâriş tipi çizelgeleme problemiyle müşteri sipârişlerini çizelgeleme problemini birleştirmiştir. Yazarlar parti bölme problemini GA ile çözerken sıralama problemini basit işi başlatma kuralları ile çözmektedir. Her iki problemin de GA ile çözümünü tavsiye etmelerine rağmen bunun CPU işlem sürelerini çok arttıracağı için kullanışlı olmadığını belirtmektedirler. GA'nın parti bölme ve parti bölmesiz kombinasyonlarının performansları karşılaştırılmıştır.

3.3 Literatür Araştırması Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 3.1'de incelenen tüm problemlerin özelliklerine göre sınıflandırılması ve ilgili sınıflandırmada kaç problemin yer aldığı bilgisi verilmektedir. Örneğin 36 makalenin ESTÇP ile ilgilendiği, 15 makalede oluşturulan ESTÇP'nin hiyerarşik yöntembilimi ile çözüldüğü, 9 makalede sıraya bağlı hazırlık süresinin sözkonusu olduğu görülmektedir. 36 problemde tek ölçüt eniyilenmeye çalışılmaktadır. 34 makalede yayılma süresi, enküçüklenmeye çalışılan performans ölçütlerinden biridir. Eğer problem tek ölçütlü ise ve yayılma süresi işaretliyse (Çizelge 3.2) salt yayılma süresi enküçüklenmiştir. Ancak hem yayılma süresi hem kritik makina yükü işaretliyse farklı iki problemin oluşturulduğu bu problemlerden birinde yayılma süresi enküçüklenirken diğerinde kritik makina yükünün enküçüklendiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.1 : Literatür araştırması sonuçlarının özeti.

Problem Tipi	Sayısı
Müşteri Sipârişlerini Çizelgeleme Problemi	18
Tek Makinalı Çizelgeme Problemi	4
Özdeş Hızlı Paralel Makina Problemi	6
Adanmış Paralel Makina Problemi	4
Sipâriş Tipi Çizelgeleme Problemi	4
Esnek Sipâriş Tipi Çizelgeleme Problemi	36
Esneklik Tipi	**Sayısı**
Tip 1	8
Tip 2	29
Yöntembilimi	**Sayısı**
Hiyerarşik Yöntembilimi	15
Bütünleşik Yöntembilimi	25
Süreç Özellikleri	**Sayısı**
Serbest kalma	7
Bakım	3
Beklememe	1
İş-kesme	1
Parti	3
Paralel işleme	3
Öncelikli İş	1
Kaynak Kısıtı	1
Sıraya Bağlı Hazırlık	9
Yeniden Girişli	3
Montaj	2
Dış Kaynak	1
Transfer	2
Ara stok	2
Performans Ölçütü Sayısı	**Sayısı**
Tek Ölçütlü	36
Çok Ölçütlü	20
Çok Ölçütlü Problemlerde Amaç	**Sayısı**
Pareto En İyi Çözüm	6
Ağırlıklandırılmış En İyi Çözüm	14

Performans Ölçütleri	Sayısı
Yayılma Süresi	34
Ortalama Tamamlanma Zamanı	6
Ağırlıklı Tamamlanma Zamanı Toplamı	4
Ortalama Akış Süresi	3
Ağırlıklı Teslim Gecikmesi Süresi	4
Maksimum Teslim Gecikmesi Süresi	2
Toplam Teslim Gecikmesi Süresi	3
Kritik Makina Yükü	11
Toplam Makina Yükü	11
Makina Yük Dengesi	2
Ortalama Bekleme Süresi	1
Ağırlıklı Erken Teslim Süresi Toplamı	2
Ağırlıklı $(\text{Teslim Gecikmesi Süresi})^2$ Toplamı	1
Makina Boş Kalma Süresi	1
Ara Stok Maliyeti	1
Maksimum Gecikme	2
Hazırlık Süresi Toplamı	1
Ağırlıklı Geciken İş Sayısı Toplamı	1
Geciken İş Sayısı Toplamı	2
Çözüm Yöntemleri	**Sayısı**
Tabu Araştırması	14
Tavlama Benzetimi	6
Genetik Algoritma	14
Parçacık Sürü Optimizasyonu	2
Karınca Kolonisi Optimizasyonu	4
Yapay Bağışıklık Sistemi	1
Karma Tamsayılı Programlama	1
Filtrelenmiş Kiriş Araştırma	2
Dal & Sınır Algoritması	1
Dinamik Programlama	2
Sezgisel	12
İşi Başlatma	15
Simülasyon	2
Yerel Araştırma	7
Kritik Yol	9
Diğer (VNS ve GRASP)	2

Çizelge 3.2'de literatür araştırması sonuçları, makalelerin yayınlanma tarihlerine göre listelenmiştir. Bu çizelgelerde problem tipi, esneklik tipi, yöntembilimi, incelenen problemin süreç özellikleri, amaç fonksiyonu tipi, performans ölçütleri ve kullanılan çözüm yöntemleri tek bir tablodan okunabilmektedir. Örneğin Julien ve Magazine (1990) için problem tipi incelendiğinde yazarların tek makinalı MSÇP problemini çalışmalarında inceledikleri anlaşılmaktadır. Genelde esneklik ve yöntembilimi sütunları, incelenen problem ESTÇP ise doldurulmuştur. Amaç fonksiyonu sütununda problemin tek ölçütlü mü, çok ölçütlü mü olduğu işaretlenmektedir. Eğer çok ölçütlü ise çalışmada pareto optimal çözümün mü arandığı veya ağırlıklandırılmış performans ölçütlerine göre mi en iyi çözümün araştırıldığı ifâde edilmektedir.

Çizelge 3.2 : Literatür araştırması sonuçları.

| Yazarlar | Problem Tipi | | | | | | Esneklik | | Yöntembilimi | | Süreç Özellikleri | | | | | | | | | | | | | | | | Amaç Fonk. | | | Performans Ölçütleri | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Çözüm Yöntemi | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Çizelge 3.2 : (devam) Literatür araştırması sonuçları.

| Yazarlar | Problem Tipi | | | | | | Esneklik | | Yöntembilimi | | Süreç Özellikleri | | | | | | | | | | | | | | | | Amaç Fonk. | | Performans Ölçütleri | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Çözüm Yöntemi | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Çözüm yönteminde çeşitli yöntemler listelenmiş olup, bu yöntemlerden hangilerinin ilgili çalışmada kullanıldığı belirtilmektedir. Ayrıca yerel araştırma içeren çalışmalar, Çizelge 3.2'de "yerel araştırma" sütunu işaretlenerek belirtilmiştir. Bâzı çalışmalarda önce bir algoritma ile çözüm oluşturulmaktadır ve sonrasında yerel araştırma algoritması ile çözüm geliştirilmektedir. Geliştirilen çözümde ana algoritma, başka bir komşu çözüme geçmektedir ve yerel araştırma algoritması çözümü yeniden geliştirmektedir. Eğer bu tür bir ilişki varsa yerel araştırma sütunu da işaretlenmektedir.

Bu çalışmada sunulan problem, sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içermektedir. Üretim ortamı, ESTÇP'nin özelliklerine sahiptir. Ancak paralel yapılan işlemler, sıraya bağlı hazırlık süreleri gibi bâzı ek özellikleri içermektedir. Enküçüklenmeye çalışılacak performans ölçütleri, ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ve yayılma süresidir. Literatür araştırması sonuçlarını, önerilen problemin bu özelliklerini de dikkate alarak irdelediğimizde, aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Literatürde genelde Tip 2 ESTÇP incelenmiştir. Süreç plânı esnekliği problemi zorlaştırdığı için, Tip 1 ESTÇP içeren çalışma sayısı azdır.
2. Literatürde sıraya bağlı hazırlık süreli Tip 2 ESTÇP çalışma sayısı azdır. Bunun en önemli nedeni, literatürdeki birçok çalışmada komşu çözüm oluşturulurken genel kabul görmüş yöntemlerin kullanılmakta olmasıdır. Bu yöntemlerde, hazırlık süresi dikkate alınmamaktadır. Sıraya bağlı hazırlık süresi eklendiğinde, komşu çözüm oluşturma yöntemlerinin tümüyle değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca sıraya bağlı hazırlık süresi eklenmesi, problemin zorluğunu arttırmaktadır.
3. Literatürdeki ESTÇP çalışmalarının büyük bir bölümünde, kaliteli çözümleri kısa CPU sürelerinde elde etmeyi amaçlayan metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Özellikle GA ve TA içeren çalışma sayısı fazladır. Ancak GA ve PSO gibi çok sayıda bireyin gelişiminin amaçlandığı metasezgisellerde yerel araştırma algoritmalarından yararlanılmaktadır ki bu özellik CPU işlem sürelerini arttırmaktadır. Özellikle GA metasezgiselini kullanan çok sayıda makale yayımlayan Gen ve diğ., 2009 yılında yerel araştırmalı GA ile 56 işlemli, sıraya bağlı hazırlık süresi içermeyen Tip 2 ESTÇP'yi, iki saati geçen CPU işlem sürelerinde çözmüştür. Popülasyon tabanlı algoritmalara, yerel araştırma algoritmalarının eklenmesi çözüm kalitesini geliştirmektedir. Ancak bu tür algoritmaların, kısa CPU işlem sürelerinde çözüme ulaşması olası değildir.

4. ESTÇP çalışmalarında, çözülen problemlerde 50-80 işlemli problemlerin, büyük ölçekli problemler sınıfına ait olduğu kabul edilmiştir. Halbuki MSÇP çalışmalarının çoğunda işlem sayısının 200'ü aşması durumunda problem büyük ölçekli problem olarak adlandırılmaktadır. Özellikle esneklik kavramı, problemlerin çözüm sürelerini çok arttırdığı için ESTÇP çalışmalarında test edilen problem boyutları küçültülmek zorundadır.

5. Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunda yayılma süresi enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Yerel araştırma algoritmaları, yayılma süresinin enküçüklenmesi için kritik yol tanımından yararlanmaktadır. Diğer performans ölçütlerinin enküçüklenmesinde, genel kabul görmüş kritik yol tanımı bulunmamaktadır. Bu nedenle diğer performans ölçütlerinin enküçüklenmesinde, yerel araştırma içermeyen metasezgisel algoritmaların kullanımı yeğlenmektedir.

6. Literatürde MSÇP ve ESTÇP'nin her ikisini de içeren çalışma sayısı azdır. Mishra ve diğ. (2007) çalışmalarında sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içeren Tip 1 ESTÇP'yi, TB ve TA kullanarak çözmüştür. Ancak makalenin literatür araştırması kısmı incelendiğinde, ESTÇP çalışmalarından çok, dış kaynak kullanımı konusuna odaklanıldığı görülmektedir. Yazarların makalesinde ana amaç, yayılma süresinin enküçüklenmesidir. Blocher ve diğ. (1998), sipâriş tipi çizelgeleme problemi ve MSÇP'yi içeren bir çalışma yapmıştır. Sipâriş bazlı ve iş bazlı işi başlatma kurallarının, sipâriş bazlı performans ölçütlerini enküçüklemedeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın yapıldığı dönemde çağdaş CPU kapasitelerinden yoksun olunması, işi başlatma kurallarının kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Ancak CPU kapasitelerin belirli bir düzeye ulaştığı günümüzde, önerilen tez probleminin çözümü metasezgisel yöntemlerle olanaklıdır. Yine de şu ana kadar bu konuda çalışmaların istenen düzeye ulaşmamış olması, ESTÇP literatürünün yeni gelişmeye başlamış olmasına bağlanabilir.

7. MSÇP çalışmaları incelendiğinde, çalışmaların tümüne yakınında neden MSÇP'nin önemli olduğu anlatılmaktadır. Bu çalışmalarda günümüzde firmalara ulaşan sipârişlerin birden çok kalemden oluştuğu (ürün) belirtilmektedir. Müşteriler, sipârişi oluşturan ürünlerin aynı anda gemiyle veya başka bir transfer yöntemiyle teslimini talep etmektedir. Eğer sipârişi oluşturan ürünlerden biri yetiştirilemezse sevkiyatın iptali ve yeni bir sevkiyatın plânlanması gerekmektedir. Bu durum, artan mâliyetlere neden olmaktadır.

8. Literatürdeki MSÇP'lerde sipâriş-ürün ikilisi kullanılmaktadır. Sipâriş-ürün ikilisini, sipâriş-ürün-işlem üçlüsü gibi düşünecek olursak, ürünlerin salt bir işlemden oluştuğu kabul edilebilir. Her sipârişin ürünleri aynı anda gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumun uygulanabilir olduğu yerlerden biri, müşteri sipârişleri çizelgeleme, diğeri ise araba onarımında arabanın parçalarının birden çok operatörce aynı anda değiştirilmesidir. İkinci durum, birinci duruma göre mantıklıdır. Çünkü gerçek uygulamalarda salt bir işlemden oluşan ürünlere rastlanmamaktadır. Bu nedenle Mishra ve diğ. (2007) ve Blocher ve diğ.'nin (1998) ifâde ettikleri sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne sahip MSÇP'ye odaklanılması, gerçek uygulamalar için gereklidir.

9. Literatürde MSÇP'nin çözümünde işi başlatma kurallarını kullanan sezgiseller ve Lagrange gevşetmeli sezgiseller yoğun bir şekilde yeğlenmiştir. Metasezgisel kullanımı kısıtlıdır. Ancak kullanılan sezgisellerin performansı en iyi çözümle kıyaslandığında, kabul edilebilir düzeylerde olduğu görülmektedir.

10. Literatür araştırması sonuçlarına göre Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde bütünleşik yöntembilimi sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle ESTÇP literatürünün ilk yıllarında bütünleşik yöntembilimli algoritmaların daha iyi sonuçlar ürettiği belirtilse de, aynı algoritmanın hiyerarşik yöntembilimini kullanan modeliyle birebir bir karşılaştırma yapılmamıştır. Ancak Fattahi ve diğ. (2007), aynı algoritmalarda hiyerarşik ve bütünleşik yöntembiliminin performansını sınamış ve hiyerarşik yöntembiliminin daha iyi sonuçlar ürettiğini ifâde etmiştir. Literatürde GA çalışmalarına sıklıkla rastlanmaktadır. GA çalışmalarında genelde çaprazlamayla yükleme ve sıralama problemi aynı anda çözüldüğü için GA metasezgiselinde bütünleşik yöntembiliminin kullanımı kaçınılmazdır. Bu nedenle de ESTÇP literatüründe bütünleşik yöntembiliminin kullanımı yaygındır.

4. ÇÖZÜLECEK ÇİZELGELEME PROBLEMİ VE ÇÖZÜM İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEMBİLİM

4.1 Problem

4.1.1 Problemin tanımı

Bu çalışmada MSÇP ve Tip 2 ESTÇP birleştirilmiştir. Sipârişi oluşturan ürünlerin tümünün, istenen teslim tarihinde müşterinin eline ulaşmaması durumunda sipârişin zamanında teslim edilemediği kabul edilmiştir. Bu nedenle sipârişi oluşturan ürünler için ayrı ayrı teslim tarihi yerine her bir sipârişe özel teslim tarihi dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada sunulan problemde sipârişler ürünlerden; ürünler işlemlerden oluşmaktadır (Sipâriş-ürün-işlem üçlüsü). Bir işlemi yapmaya yetkin, bir veya birden çok makina vardır. İşlemlerin makinalardaki hızları, işlemlerin özelliklerine göre farklılık gösterebilmektedir. İşi (ürün) oluşturan işlemler, belirli bir makina rotası izlememektedir. İşi oluşturan işlemlerin sıralaması sabittir (Tip 1 esneklik yoktur). Sipârişi oluşturan ürünlerden birden fazla talep edilebilmektedir ve aynı üründen birden fazla talep edilmesi durumunda ilgili ürün, bir makinadan diğer makinaya geçerken, talep edilen miktarın tümünün bitirilmesi zorunlu değildir (Salt bir adet üretilmesi, diğer makinaya geçmek için yeterlidir). Bir makinada bir işlemin bitiminde diğer işleme başlayabilmek için hazırlık gerekmektedir. Hazırlık süresini etkileyen en önemli değişkenler, varolan ve önceki işlemlerdir. Problemi şöyle özetleyebiliriz:

1. Sipârişler, ürün veya ürünlerden oluşmaktadır. Ürünler de işlemlerden oluşmaktadır. Sipârişi oluşturan ürünlerin her birinden en az birer adet talep edilmektedir.
2. Her bir sipârişi oluşturan ürünler için ortak bir teslim tarihi vardır. Bu teslim tarihi, sipâriş teslim tarihidir. Eğer sipârişi oluşturan ürünlerden biri gecikirse sipâriş de gecikmektedir. Sipâriş gecikme süresi, sipârişi oluşturan ürünlerden en çok geciken ürünün teslim gecikmesi süresine eşittir.
3. Sipârişi oluşturan ürünlerden en az birer adet talep edilmektedir. Eğer ilgili sipârişte o üründen birden fazla talep edilmişse o ürünün 1. adedinin işlemi tamamlanır tamamlanmaz o ürünün 1. adedi, ardıl işleme başlayabilmektedir (Paralel işleme). Ancak iş kesme yoktur. Yâni ancak “o ürünün o sipârişte talep

edilen miktarının tümü" bitirildikten sonra, ilgili makinada başka işleme geçilebilmektedir.

4. Makinalarda tam esneklik sözkonusudur. Yâni işlemler, herhangi bir makinada gerçekleştirilebilmektedir. Ancak işlem hızı, makinadan makinaya değişebilmektedir (Tip 2 esneklik).

5. Bir makinada bir işlemden başka bir işleme geçilirken hazırlık süresine gereksinim duyulmaktadır. Eğer aynı ürünün aynı işlemi, aynı makinada arka arkaya sıralanırsa hazırlık süresi gerekmemektedir. Eğer benzer özelliklere sahip işlemler aynı makinada arka arkaya sıralanırsa, hazırlık süresi düşük olacaktır (Sıraya bağlı hazırlık süresi).

4.1.2 Problemin performans ölçütleri

Bu çalışmada enküçüklenmeye çalışılacak iki önemli performans ölçütü bulunmaktadır.

1. Yayılma Süresi

Yayılma Süresi = $\underset{i=1,\ldots,N}{Enb}\ C_i$ **(4.1)**

C_i : i. sipârişin tamamlanma zamanı

N : sipâriş sayısı

2. Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi

$T_{ort} = \sum_{i=1}^{N} \frac{T_i}{N}$ **(4.2)**

$T_i = Enb\ (C_i - d_i\ ,\ 0)$ **(4.3)**

d_i : i. sipârişin teslim tarihi

T_i : i. sipârişin teslim gecikmesi süresi

T_{ort} : N adet sipârişin ortalama teslim gecikmesi süresi

4.1.3 Problemin varsayımları

1. Her sipâriş, en az bir tip üründen (iş) oluşmaktadır.
2. Her ürün (iş), en az bir işlemden oluşmaktadır.
3. Sipârişi oluşturan ürünlerden en az birer adet talep edilmektedir.
4. Problem deterministiktir.

5. Problem statiktir.
6. Ürünler birbirinden bağımsızdır.
7. Tüm makinalar, birbirinden bağımsızdır.
8. Her sipâriş için geliş zamanı (t=0) ve serbest kalma zamanı (r=0) şeklinde kabul edilmektedir.
9. Bir makina, aynı anda salt bir işlem gerçekleştirebilir.
10. Paralel yapılan işlemlere izin verilmektedir (Bir sipârişin A, B, C gibi üç farklı üründen oluştuğunu varsayalım. İlgili sipârişte A ürününden 3 adet istenmektedir. A ürününün, bir operasyondan diğer operasyona geçebilmesi için, sipârişi oluşturan 3 adet A ürününün tamamlanması beklenmemektedir. Paralel işlemede 1. A ürünü, operasyonu tamamlanır tamamlanmaz sıradaki operasyona geçebilmektedir).
11. Bir işlem başladığında bitirilmelidir (İş-kesmeye izin verilmemektedir).
12. Bir ürünün işlemi ve ilgili işlemin ardılı, farklı makinalarda aynı anda işlenirken (paralel işleme) ardıl işlem, elindeki n. adedi gerçekleştirdikten sonra ilgili işlemin (n+1). adedini bekleyebilmektedir. Bu durum, ilgili işlemin gerçekleştirildiği makinanın hızı, ardıl işlemin gerçekleştirildiği makinanın hızından düşük olduğu durumlarda görülmektedir. Ancak bu bekleme sırasında başka bir işleme geçilemez.
13. Farklı ürünlerin işlemleri arasında öncelik ilişkisi yoktur.
14. Her bir işlemin tek ve mutlaka bir öncülü vardır.
15. Transfer süreleri sıfır kabul edilmiştir.
16. Malzeme eksiği, makina arızası, operatör sorunları dikkate alınmamıştır.
17. Birbirinden farklı sipârişler, aynı ürünü içerebilmektedir.
18. İşlemler arasında sıraya bağlı hazırlık süresi dikkate alınmıştır. Hazırlık süresini etkileyen değişkenler, ilgili işlem ile aynı makinadaki bir önceki işlemdir.
19. (t=0) anında, makinaların ilk işlemini gerçekleştirmek üzere daha önceden hazırlandığı kabul edilmiştir. Bu nedenle makinalardaki ilk işlemlerin hazırlık süreleri, sıfır kabul edilmiştir.
20. İşlem süreleri, makinaya bağlıdır.

21. Her ürün, daha önceden belirlenmiş işlem sırasına uymalıdır, her işlemin birden çok makina alternatifi vardır (Tip 2 esneklik). Tüm makinalar, tüm işlemleri gerçekleştirebilmektedir (Tam esnek durum).

4.1.4 Matematiksel model

İndisler:

i, i^{-} : sipâriş $1 \le i \le N$, $1 \le i^{-} \le N$

j, j^{-} : ürün (iş) $1 \le j \le u_i$, $1 \le j^{-} \le u_{i^{-}}$

k, k^{-}: işlem $1 \le k \le o_j$, $1 \le k^{-} \le o_{j^{-}}$

m : makina $1 \le m \le a$

Parametreler:

N: sipâriş sayısı

u_i: i sipârişinin ürün sayısı

$u_{i^{-}}$: i^{-} sipârişinin ürün sayısı

o_j : j ürününün işlem sayısı

$o_{j^{-}}$: j^{-} ürününün işlem sayısı

a: makina sayısı

T_{ort}: ortalama teslim gecikmesi süresi

d_i : i. sipârişin teslim tarihi

$S_{i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işleminin başlangıç zamanı

$F_{i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işleminin tamamlanma zamanı

$r_{i,j}$: i. sipârişte j. üründen talep edilen miktar

$p_{m,j,k}$: j. ürünün k. işleminin m. makinadaki işlem süresi

$SET_{j,k,j^{-},k^{-}}$: j. ürünün k. işleminden sonra j^{-}. ürünün k^{-}. işleminin gerçekleştirilmesi durumunda hazırlık süresi

M: Çok büyük bir sayı

$w_{1,2}$: Amaç fonksiyonunda ortalama teslim gecikmesi süresinin ve yayılma süresinin ağırlık katsayıları

Karar Değişkenleri:

$B_{m,i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işleminin m. makinaya yüklenmesi durumunda 1; aksi durumda 0

C_{m,i,j,k,i^-,j^-,k^-}: m. makinada i. sipârişin j. ürününün k. işleminden sonra i^-. sipârişin j^-. ürününün k^-. işlemi gelirse 1, aksi takdirde 0

$X_{m,i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işlemi m. makinada ilk işlemse 1: aksi takdirde 0

$Y_{m,i,j,k}$: i. sipârişin j. ürününün k. işlemi m. makinada son işlemse 1: aksi takdirde 0

Amaç Fonksiyonu

Enk $w_1 \cdot T_{ort} + w_2 \cdot Enb_{i,j,k} F_{i,j,k}$ **(4.4)**

$T_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Enb\left[\left(-d_i + Enb_{j,k} F_{i,j,k}\right), 0\right]$ **(4.5)**

Kısıtlar

$$S_{i,j,k} - \left[\left(1 - B_{m,i,j,k}\right) \cdot M\right] + r_{i,j} \cdot p_{m,j,k} \le F_{i,j,k} \quad \textbf{(4.6)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j m=1,...,a

$$S_{i,j,k+1} \ge S_{i,j,k} + B_{m,i,j,k} \cdot p_{m,j,k} \quad \textbf{(4.7)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j-1 m=1,...,a

$$F_{i,j,k+1} \ge F_{i,j,k} + B_{m,i,j,k+1} \cdot p_{m,j,k+1} \quad \textbf{(4.8)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j-1 m=1,...,a

$$F_{i,j,k} + SET_{j,k,j^-k^-} \le S_{i^-j^-k^-} + \left(1 - C_{m,i,j,k,i^-,j^-,k^-}\right) \cdot M \quad \textbf{(4.9)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j i^-=1,..., N j^-=1,...u_i^- k^-=1,...,o_j^- m=1,...,a

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{u_i} \sum_{k=1}^{o_j} C_{m,i,j,k,i^-,j^-,k^-} + X_{m,i^-,j^-,k^-} - B_{m,i^-,j^-,k^-} = 0 \quad \textbf{(4.10)}$$

i^-=1,..., N j^-=1,...u_i^- k^-=1,...,o_j^- m=1,...,a

$$\sum_{i^-=1}^{N}\sum_{j^-=1}^{u_{i^-}}\sum_{k^-=1}^{o_{j^-}} C_{m,i,j,k,i^-,j^-,k^-} + Y_{m,i,j,k} - B_{m,i,j,k} = 0 \qquad \textbf{(4.11)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j m=1,...,a

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{u_i}\sum_{k=1}^{o_j} X_{m,i,j,k} = 1 \qquad \textbf{(4.12)}$$

m=1,...,a

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{u_i}\sum_{k=1}^{o_j} Y_{m,i,j,k} = 1 \qquad \textbf{(4.13)}$$

m=1,...,a

$$\sum_{m=1}^{a} B_{m,i,j,k} = 1 \qquad \textbf{(4.14)}$$

i=1,..., N j=1,...u_i k=1,...,o_j $r_{i,j}$≠0

$B_{m,i,j,k} \in \{0,1\}$ **(4.15-a)**

$C_{m,i,j,k,i^-,j^-,k^-} \in \{0,1\}$ **(4.15-b)**

$X_{m,i,j,k} \in \{0,1\}$ **(4.15-c)**

$Y_{m,i,j,k} \in \{0,1\}$ **(4.15-d)**

$S_{i,j,k} \geq 0$, $F_{i,j,k} \geq 0$, **(4.15-e)**

(4.4) ifâdesi ile amaç fonksiyonu gösterilmektedir. Yayılma süresi ile ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin ağırlıklı toplamı enküçüklenecektir. **(4.5)** ifâdesi ile, ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi hesaplanmaktadır. **(4.6)** ifâdesi ile, öncül işlemin tamamlanma zamanı dikkate alınmayarak işlemlerin işlem süreleri başlangıç zamanlarıyla toplanarak en erken tamamlanma zamanı belirlenmektedir. İfâde **(4.7)** ve **(4.8)** ile, öncül işlemlerin başlangıç ve tamamlanma zamanları dikkate alınarak "İfâde **(4.6)** ile hesaplanan ilgili işlemin başlangıç ve tamamlanma zamanlarının" alabileceği değerler kısıtlanmaktadır (Paralel işleme durumunda). İfâde **(4.9)**, aynı makinadaki bir sonraki işlemin, hazırlık süresi tamamlandıktan sonra başlamasına izin vermektedir. **(4.10)**, **(4.11)**, **(4.12)** ve **(4.13)** ifâdeleri, aynı makinada salt bir ilk işlem ve son işlem olmasını garanti altına almaktadır. Ayrıca aynı makinada işlemlerin nasıl sıralandığına karar verilmektedir. İfâde **(4.14)**, bir işlemin salt bir

makinaya yüklenmesine izin vermektedir. İfâde **(4.15)** serisiyle değişkenlerin alabileceği değer aralığı sınırlandırılmaktadır.

4.2 Önerilen Algoritma

4.2.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içeren yapıda aynı ürünün işlemlerinin paralel yapılabildiği Tip 2 ESTÇP'nin çözümü için çift katmanlı TB algoritması geliştirilmiştir. ESTÇP, bünyesinde iki alt-problemi içermektedir. Birinci problemde işlemler makinalara yüklenmektedir; ikinci problemde işlemlerin makinalardaki sıralamalarına karar verilmektedir. Bu iki problemi, aynı anda çözmek (bütünleşik yönembilimi) veya ayrı ayrı çözmek (hiyerarşik yöntembilimi), literatürde sıklıkla incelenmiştir. Ancak hangi yöntembiliminin daha iyi sonuçlar ürettiği hâlâ tartışılmaktadır. Bu çalışmada bütünleşik yöntembilimi kullanılacaktır. Yâni hem yükleme hem sıralama problemi aynı anda çözülecektir. Ancak bütünleşik yöntembilimini kullanan algoritmalarda çift katmanlı yâni çift TB kullanımına rastlanmamaktadır. Çünkü oluşturulan komşu çözüm ile hem yükleme hem sıralama yapılabildiği için tek bir metasezgisel yeterli olmaktadır. Çift katmanlı TB kullanımının nedenleri ve bütünleşik yöntembiliminin önerilen algoritmaya nasıl uyarlandığı aşağıdaki paragrafta özetlenerek anlatılmaktadır.

Önerilen algoritma, tek işlem yer değiştirme ve çift işlemin birbiriyle yer değiştirmesi (Takas) adında iki farklı komşuluk arama yöntemine ve aynı adlarla iki farklı TB algoritmasına sahiptir. Tek işlem yer değiştirmeyle seçilen bir işlem, farklı bir makinaya yüklenebileceği (yükleme) gibi aynı makinada farklı bir yerleşim noktasına (sıralama) da yerleştirilebilir. Eğer farklı bir makinaya yüklenirse aynı anda makinadaki yeni sırası (lokasyonu) da belirlenmektedir. Aynı şekilde çift işlem yer değiştirme aynı makinada yapılırsa sıralama değişikliğine; farklı makinalar arasında yapılırsa aynı anda her iki işlemin yüklemesinde ve sıralamasında değişikliğe neden olmaktadır. Böylece hem yükleme hem sıralama problemi aynı anda çözülmektedir. Gerek tek işlem gerekse iki işlem yer değiştirmede, farklı bir makinaya yüklerken veya aynı makinada başka bir yerleşim noktasına yerleştirirken, yeri değiştirilecek işlemin veya işlemlerin yerleştirilebileceği olası tüm yerleşim noktaları (lokasyonlar) için etki analizi adını verdiğimiz bir tahminî hesap yapılır. Etki analiziyle yeni oluşturulacak olası komşu çözümün, performans ölçütlerinin değerlerine olası etkisi hesaplanmaktadır. Böylece varolan uyum değerini geliştirecek yeni komşu çözümler belirlenmeye çalışılır. Tek işlem yer değiştirmeyle, bir işlem başka bir makinaya yüklenirse, bir makinadaki yük azalacak, diğer makinadaki yük ise artacaktır. Yâni

makina yüklerinin dengelenmesine yardımcı olacaktır. İki işlem yer değiştirildiğinde, makinalardaki yük dengesi çok fazla değişmeyecektir. Ancak iki işlem yer değiştirdiğinde, tek işlem yer değiştirmeye göre çözüm çok daha hızlı farklılaştığından, yerel en iyi çözümden kaçmak kolaylaşacaktır. Burada anlatılan, tek işlem yer değiştirme ve iki işlem yer değiştirme, Gao ve diğ.'nin (2008) makalesinde de kullanılmıştır. Tek bir işlem yer değiştirmeyle yerel en iyi çözümden çıkılamazsa, iki işlem yer değiştirme denenmektedir. Ancak iki işlem yer değiştirmenin GA'nın çoklu birey yapısı nedeniyle uzun işlem sürelerine gereksinim duyduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, popülasyon tabanlı metasezgisellerin yerine salt tek bir bireyden oluşan yâni tek bir çözümü geliştirmeye çalışan bir metasezgiselin kullanımı, ilgili metasezgisel algoritmanın geliştirilmesini daha kolaylaştıracaktır. Bu çalışmada sunulacak çift katmanlı TB'de, arama alanlarının daha etkin araştırılması için tüm alternatif komşu çözümleri değerlendirebilecek sezgisel eklemesi, iki işlem yer değiştirmenin her iterasyonda çoklu sayıda denenmesi ve sonuca etkisinin değerlendirilmesi, CPU işlem sürelerini popülasyon tabanlı metasezgiseller kadar arttırmayacağından, uygulamada sıkıntı yaşanmayacaktır. Halbuki GA veya PSO gibi popülasyon tabanlı metasezgisellere yerel araştırma algoritmaları eklenirse, kısa CPU işlem sürelerinde çözüm üretmek olanaklı değildir.

Bölüm 4.2.2'de, önerilen algoritmanın performans ölçütlerini enküçüklerken kullandığı mantık aktarılacaktır. Bölüm 4.2.3'de, incelenen problemin çözümünde kullanılacak TB metasezgiselinin genel çalışma ilkesi ve önerilen algoritma, ayrıntılı bir şekilde aktarılacaktır. Bölüm 4.3'de, önerilen algoritmanın performansının karşılaştırılması için kullanılacak Fattahi ve diğ.'nin (2007) önerdiği rassal TB algoritması anlatılacaktır.

4.2.2 Önerilen algoritmada uyum değerini enküçüklemek için kullanılan felsefe

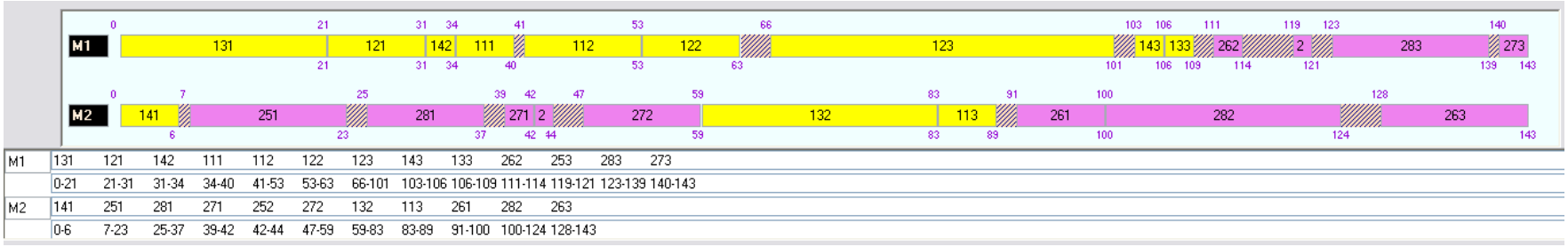
Sunulan problemi çözecek TB algoritması, hazırlık sürelerini enküçüklerken, işlemleri en hızlı makinalara yüklemeyi hedeflemektedir. Yâni bir işlem bir yerden başka bir yere atanırken, hazırlık ve işlem süreleri toplamını enküçüklemeye çalışmaktadır. Ancak performans ölçütlerinden biri olan ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresini de dikkate alarak olabildiğince "hazırlık ve işlem süreleri toplamını" enküçüklemeye çalışmaktadır. Eğer teslim tarihi sıkılığı yüksekse, teslim gecikmesi süresinin ve "işlem süresi ve hazırlık süresi toplamının" ödünleşme noktası aranmaktadır. Çünkü teslim tarihi sıkılığı yüksek durumda iken işlem süresi ve hazırlık süresi toplamı enküçüklenirken, teslim gecikmesi süresi artacaktır. Bu durumu açıklamak için Şekil 4.1 ve 4.2'de aynı problemde sipâriş 1'in farklı teslim

tarihli durumları için elde edilen en iyi Gantt diyagramları verilmiştir (Bu çalışmada kullanılan Gantt diyagramının açıklamaları için Ek A'ya bakınız). Şekil 4.1'de verilen Gantt diyagramında sipâriş 1'in teslim tarihi 109 iken Şekil 4.2'de sipâriş 1'in teslim tarihi 80'dir. Şekil 4.1'de sipâriş 1'in teslim tarihi sıkılığı gevşek olduğu için diğer sipârişin (2 numaralı sipârişin) işlemleri, "hazırlık süresi ve işlem süresi toplamının" enküçüklenmesine katkı sağlayacak yerleşim noktalarına atanmıştır. Ancak bu yüklemeler, sipâriş 1'in teslim tarihi aşılmayacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.2'de sipâriş 1'in teslim tarihi 80'e düşürüldüğü için önerilen algoritma, 2 numaralı sipârişin işlemlerini 80 birim anından öncesine yerleştirememiştir. Algoritma, öncelikle 1 no.'lu sipârişi tamamlamaya çalışmaktadır. Ancak sipâriş 1 tamamlanmadan, sipâriş 2'nin işlemlerinin yerleştirilmemesi gibi bir koşul yoktur. Örneğin 80 birim anından önceki zaman aralığına atanabilecek "sipâriş 2 işlemi", sipâriş 2'nin teslim gecikmesi süresinin azalmasına neden olduğu kabul edilsin. Bu değişikliğin, sipâriş 1'in teslim gecikmesi süresinin artmasına neden olması güçlü bir olasılıktır. Eğer sipâriş 2'nin teslim gecikmesi azalışı, sipâriş 1'in teslim gecikmesi artışından daha büyük ise, sipâriş 1'de gecikmeye neden olabilecek bu değişiklik gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 4.2'de verilen örnekte 80 birim zaman anına kadar 1 no.'lu sipârişin işlemlerinin sıralandığı görülmektedir. Ancak bu durum, hazırlık ve yayılma sürelerinin artmasına ve daha yavaş makinalara işlemlerin yüklenmesine neden olmuştur. Çünkü "işlem süresi ve hazırlık süresi toplamının" teslim gecikmesi süresiyle olan ödünleşme noktası aranmış ve bulunmuştur.

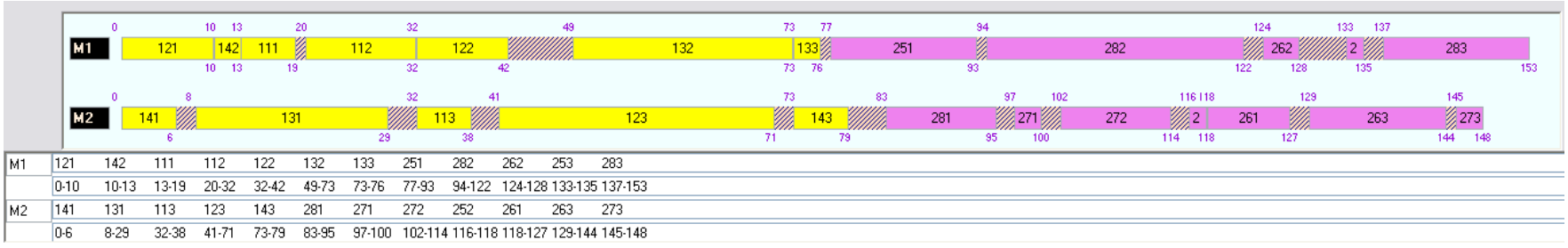
4.2.3 Çalışma ilkesi

Önerilen algoritma, son çözümü oluşturana dek çeşitli aşamalardan geçmektedir. Bu aşamaların büyük çoğunluğu, birbiriyle ilişkili olduğundan algoritmayı tek bir akış diyagramıyla anlatmak zordur. Bu nedenle aşama aşama anlatılacaktır. Şekil 4.3'de, önerilen algoritmanın anlatımında kullanılan akış diyagramları ve ilgili akış diyagramında atıfta bulunulan diğer akış diyagramlarının hiyerarşik yapısı verilmiştir. Önerilen algoritma, ön plânlama ve plânlama olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Plânlama, ön plânlama aşamasını izlediğinden ve her ikisi de Algoritma 2'yi kullandığından, Şekil 4.4'de verilen önerilen algoritmanın ana akış diyagramında birlikte anlatılmıştır.



M1	131	121	142	111	112	122	123	143	133	262	253	283	273
	0-21	21-31	31-34	34-40	41-53	53-63	66-101	103-106	106-109	111-114	119-121	123-139	140-143
M2	141	251	281	271	252	272	132	113	261	282	263		
	0-6	7-23	25-37	39-42	42-44	47-59	59-83	83-89	91-100	100-124	128-143		

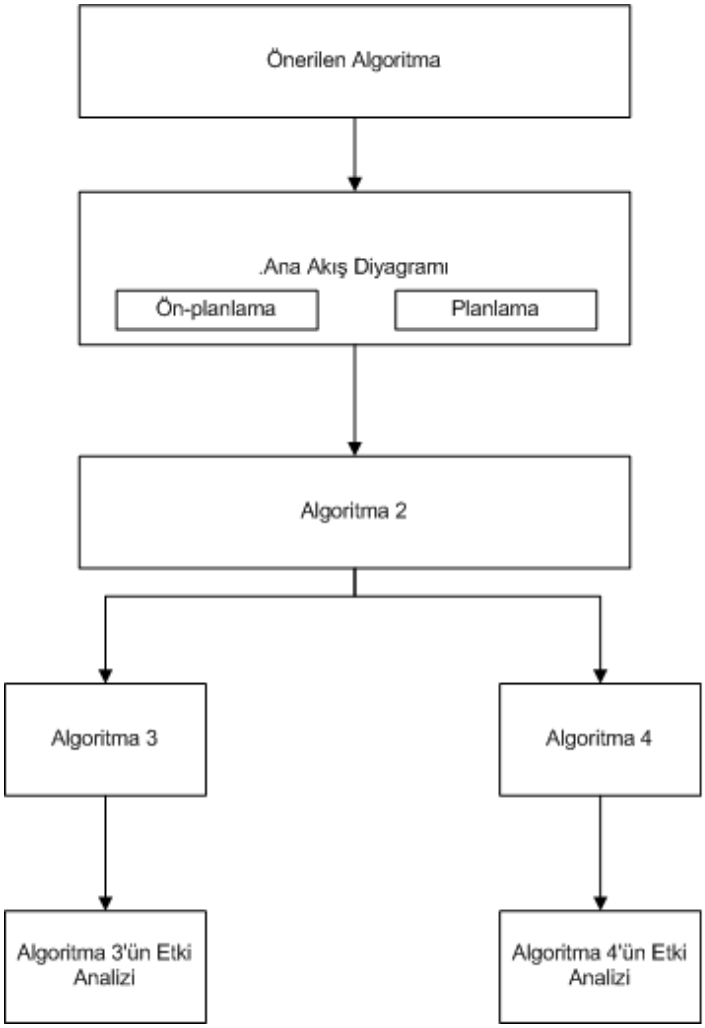
Şekil 4.1 : Sipâriş 1'in teslim tarihi 109 olduğu durumda elde edilen en iyi Gantt diyagramı.



M1	121	142	111	112	122	132	133	251	282	262	253	283
	0-10	10-13	13-19	20-32	32-42	49-73	73-76	77-93	94-122	124-128	133-135	137-153
M2	141	131	113	123	143	281	271	272	252	261	263	273
	0-6	8-29	32-38	41-71	73-79	83-95	97-100	102-114	116-118	118-127	129-144	145-148

Şekil 4.2 : Sipâriş 1'in teslim tarihi 80 olduğu durumda elde edilen en iyi Gantt diyagramı.

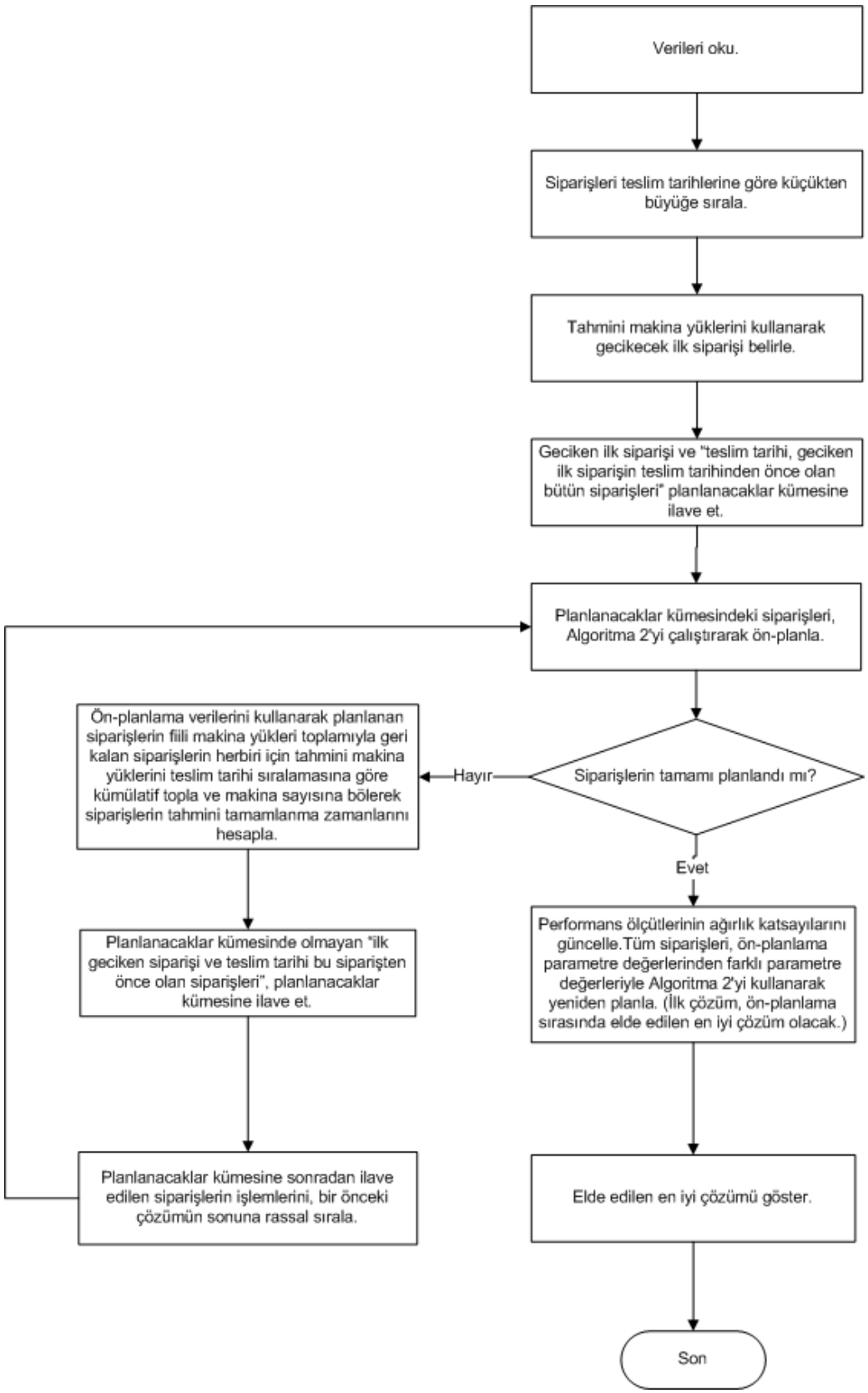
Algoritma 2 ise Algoritma 3 ve 4'e atıfta bulunmaktadır. Gerek Algoritma 3'ün, gerekse Algoritma 4'ün kendine ait etki analizi akış diyagramları bulunmaktadır. Hiyerarşik yapıya uygun olarak öncelikle ana akış diyagramı yâni ön plânlama ve plânlama aşamaları aktarılacaktır.



Şekil 4.3 : Önerilen algoritmada hangi akış diyagramının hangi algoritmayı kullandığını gösteren akış diyagramı.

4.2.3.1 Ön plânlama

Önerilen algoritma, performans ölçütlerinin ağırlık katsayılarının belirlenmesi için ön plânlama aşamasına gereksinim duymaktadır. Ön plânlamanın sonunda elde edilen en iyi çizelge verisi kullanılarak, performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları hesaplanmaktadır. Ayrıca elde edilen ön plânlama çıktısı, plânlama aşamasına ilk çözüm olarak sunulmaktadır. Genelde elde edilen ilk çözümün (ön plânlama sonucu) en iyi çözüme çok yakın uyum değerine sahip olması, plânlama aşamasının CPU işlem sürelerini azaltmaktadır.



Şekil 4.4 : Ana akış diyagramı.

Ön plânlama'da sipâriş teslim gecikmelerini kullanan ufak bir yönergeye göre, problem alt problemlere bölünmektedir. Öncelikle sipârişler, teslim tarihlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmaktadır. Hazırlık süreleri ihmâl edilerek, her bir işlemin en hızlı 2. makinaya yükleneceği varsayılarak, ilgili sipârişin veya sipârişlerin birikimli (İng. cummulative) makina yükü, teslim tarihi sıralamasına uygun bir şekilde hesaplanmaktadır. Kümülatif makina yükü, makina sayısına bölünerek, ilgili sipârişin tamamlanma zamanı tahmin edilmektedir. Tahminî makina yükü hesaplanırken, sipârişlerin olabildiğince birer birer plânlanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle sipârişlerin makina yükü, birden büyük güvenlik katsayısı ile çarpılmaktadır. Ancak ufak sipârişlerin teker teker plânlanmasını engellemek için güvenlik katsayısı 1,5 olarak seçilmiştir.

Tahminî tamamlanma zamanı hesaplanan sipârişler arasından ilk geciken sipâriş belirlenir. Bu sipâriş, "teslim tarihi bu sipârişten daha erken sipârişlerle birlikte" plânlanacak sipârişler kümesine atanır. Plânlanacak sipârişler, Algoritma 2 ile plânlanır ve plânlama çıktısından fiilî makina yükleri elde edilir. Fiilî makina yüklerine, plânlama kümesinde olmayan sipârişlerin tahminî makina yükleri eklenerek, "plânlama kümesinde olmayan" ilk geciken sipâriş ve önceki sipârişler belirlenir ve plânlanacaklar kümesine eklenerek Algoritma 2 ile plânlanır. Bu plânlamada ilk çözüm, bir önceki plânlama çıktısıdır. Yeniden fiilî makina yükleri kullanılarak, plânlanacak sipârişler belirlenecektir. İterasyonlar, sipârişlerin tümü plânlanana dek bu şekilde sürer.

Ön plânlama aşamasının kuramını bir örnek üzerinde uygulamak için, Çizelge 4.1'de bir örnek problem sunulmuştur. 4 sipârişten oluşan bu problemin ön plânlama sonucu oluşturulurken, önce sipârişler teslim tarihlerine göre sıralanmaktadır. 1-2-4-3 sıralaması elde edilmiştir. Her sipârişin tahminî makina yükleri, sipâriş sıralamasına göre toplanarak, makina sayısına bölünmektedir. Böylece ilgili sipârişin tahmini tamamlanma zamanı hesaplanmaktadır. Hesaplamalar sonucu, 1. sipârişin tamamlanma zamanı 43,75 olup teslim tarihi 75'den küçük olduğu için gecikmeyeceği tahmin edilmektedir. Ancak 2. sipâriş gecikecektir. 1. ve 2. sipâriş, plânlanacaklar kümesine eklenir. Algoritma 2 ile, 1 ve 2 numaralı sipârişler plânlanmaktadır. Şekil 4.5'de 1 ve 2 numaralı sipârişlerin plânlama sonucu görülmektedir.

Şekil 4.5'de elde edilen çizelge çıktısından, 1 ve 2 numaralı sipârişlerin fiilî makina yükleri, plânlama kümesinde yer almayan 4 numaralı sipârişin tahminî makina yüküyle toplanarak 182,25 tahminî tamamlanma zamanı hesaplanmıştır. Gecikeceği için 4 numaralı sipâriş, plânlanacaklar kümesine eklenir.

Çizelge 4.1 : Ön plânlama aşamasını açıklayan örnek problem.

Sipariş Numarası	1	2	3	4
Teslim Tarihi	75	99	129	108
Siparişler teslim tarihine göre sıralanır.				
Sipariş Numarası	1	2	4	3
Teslim Tarihi	75	99	108	129
2 numaralı sipariş geciken ilk sipariş				
Sipariş Numarası	1	**2**	4	3
Teslim Tarihi	75	**99**	108	129
Tahmini Tamamlanma Zamanı	43,75	**121**		
4 numaralı sipariş geciken ikinci sipariş				
Sipariş Numarası	1	2	4	3
Teslim Tarihi	75	99	108	129
Tahmini Tamamlanma Zamanı			**182,25**	
Fiili Tamamlanma		**84**		
3 numaralı sipariş geciken üçüncü sipariş				
Sipariş Numarası	1	2	4	3
Teslim Tarihi	75	99	108	129
Tahmini Tamamlanma Zamanı				**239**
Fiili Tamamlanma			**133**	

Şekil 4.5'de verilen çözüme, 4 numaralı sipârişin işlemleri rassal yüklenerek ve sıralanarak ilk çözüm oluşturulur (Şekil 4.5'de verilen çözümde, her bir makinada tamamlanma zamanlarının sağına rassal yükleme ve sıralama yapılmaktadır). İlk çözüm, Algoritma 2 ile geliştirilir ve Şekil 4.6'da verilen plânlama çıktısı elde edilir. Plânlanacaklar kümesinde yer almayan tek sipâriş olan "3 numaralı sipâriş", plânlanacaklar kümesine eklenerek benzer şekilde ilk çözüm oluşturulur. Algoritma 2 ile plânlanır ve Şekil 4.7'de verilen ön plânlama sonucu elde edilir.

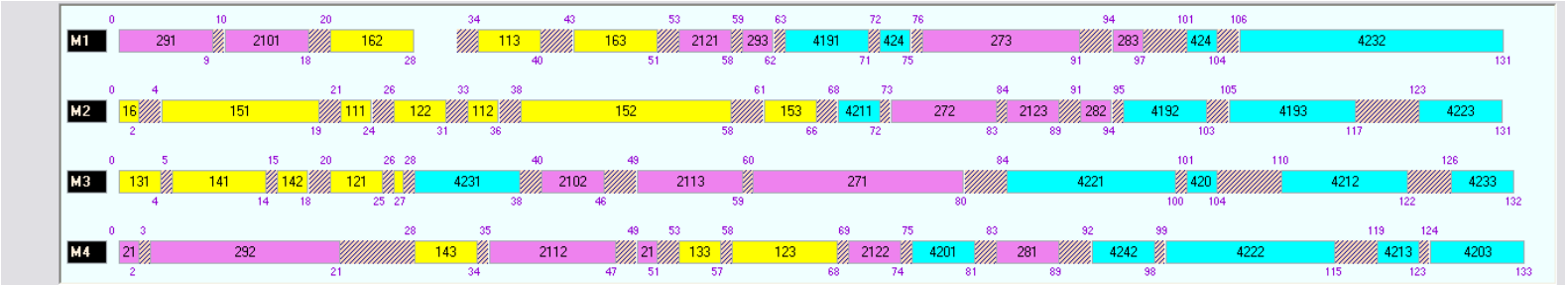
Ön plânlama sonucuna göre yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin sırasıyla 193 ve 25,75 olduğu hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları yeniden hesaplanmaktadır. Yayılma süresinin ağırlık katsayısı 1; ortalama sipâriş teslim gecikmesinin ağırlık katsayısı (193 / 25,75 =) 7,495 olarak değiştirilir.

4.2.3.2 Plânlama

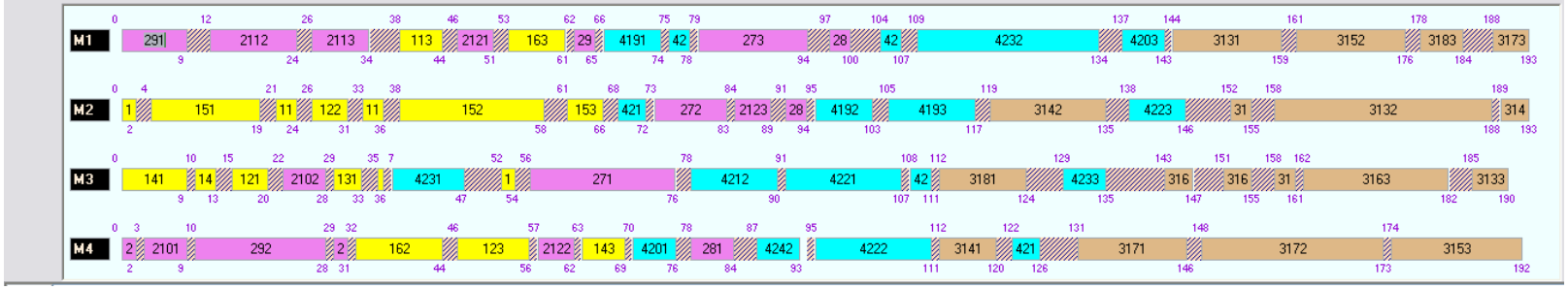
Plânlama aşamasında, ön plânlama çözümü (Şekil 4.7) ilk çözüm olarak kabul edilmektedir. Performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları ve TB parametre değerleri değiştirilerek çift katmanlı TB algoritması (Algoritma 2) yeniden çalıştırılmaktadır. Bu aşamada amaçlanan, önem dereceleri değişen performans ölçütlerine göre ön plânlamada oluşturulan Gantt diyagramının geliştirilmesidir.



Şekil 4.5 : Sipâriş 1 ve 2'nin plânlama sonucu.



Şekil 4.6 : Sipâriş 1, 2 ve 4'ün plânlama sonucu.



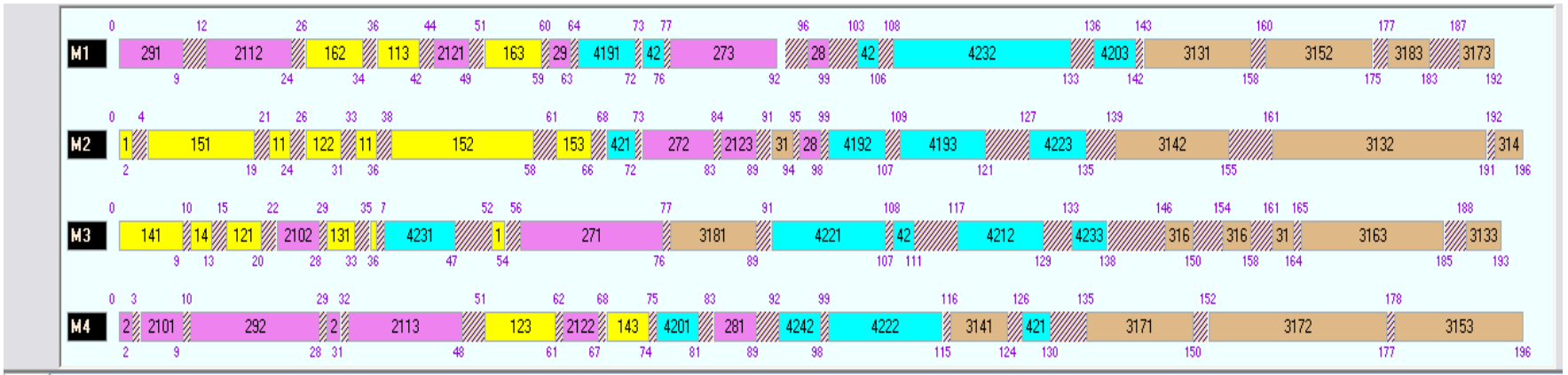
Şekil 4.7 : Ön plânlama sonucu.

Genelde, elde edilen ön plânlama çözümünde büyük boyutta değişiklik gerçekleşmemektedir. Bunun en önemli nedeni, ön plânlamada hazırlık süresi ve işlem süresi toplamının enküçüklenmesinin başarıyla tamamlanmasıdır. Plânlama aşamasında ortalama sipâriş teslim gecikmesinin değişen önemi dikkate alınarak yeni ödünleşme noktası aranmaktadır. Ön plânlama ve plânlama aşamalarının farkları aşağıda özetlenmiştir:

1. Ön plânlama aşamasında ilk çözüm rassal yükleme ve sıralama ile belirlenmektedir. Plânlama aşamasında ön plânlamanın elde ettiği en iyi sonuç, ilk çözüm kabul edilmektedir.
2. Ön plânlama aşamasında performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları 0,5 olarak kabul edilmiştir. Plânlama aşamasında ön plânlama sonucuna göre performans ölçütleri hesaplanmaktadır. Örneğin yayılma süresi 140, ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 10 ise, plânlama aşamasında yayılma süresinin katsayısı 1; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin katsayısı 14 olacaktır. Böylece yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin uyum değerine katkısı eşit olacaktır.
3. Ön plânlama adımında tek işlem yer değiştirme ve takas TB algoritmalarının parametre değerleri, deney tasarımı ile belirlenmektedir. Plânlama adımında parametre değerleri önceden belirlenmiştir, probleme özel bir parametre değer seti sözkonusu değildir.
4. Ön plânlama adımında sipârişler teslim tarihlerine göre gruplanarak plânlanmaktadır. Halbuki plânlama adımında sipârişlerin tümü aynı anda plânlanmaktadır.

Parametre değerleri değişen Algoritma 2 ile Şekil 4.7'de görülen ön plânlama sonucu geliştirilerek, Şekil 4.8 elde edilmiştir. Şekil 4.7 ile Şekil 4.8 karşılaştırıldığında aralarında ciddî bir fark olmadığı görülmektedir. Şekil 4.7'de yayılma süresi 193 iken Şekil 4.8'de 196 değeri elde edilmiştir. Buna karşın ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi azalmıştır. Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin artan önemi nedeniyle sipârişlerin teslim gecikmesi azaltılırken, yayılma süresi artmış, ödünleşme noktası bulunmuştur.

Plânlama ve ön plânlama aşamalarında Algoritma 2 (çift katmanlı TB algoritması) kullanılarak sipârişler çizelgelenmektedir. Bir sonraki bölümde Algoritma 2 ayrıntılandırılarak anlatılacaktır.



M1	291	2112	162	113	2121	163	293	4191	4241	273	283	4243	4232	4203	3131	3152	3183	3173
	0-9	12-24	26-34	36-42	44-49	51-59	60-63	64-72	73-76	77-92	96-99	103-106	108-133	136-142	143-158	160-175	177-183	187-192
M2	161	151	111	122	112	152	153	4211	272	2123	3151	282	4192	4193	4223	3142	3132	3143
	0-2	4-19	21-24	26-31	33-36	38-58	61-66	68-72	73-83	84-89	91-94	95-98	99-107	109-121	127-135	139-155	161-191	192-196
M3	141	142	121	2102	131	132	4231	133	271	3181	4221	4202	4212	4233	3161	3162	3182	3163	3133
	0-9	10-13	15-20	22-28	29-33	35-36	37-47	52-54	56-76	77-89	91-107	108-111	117-129	133-138	146-150	154-158	161-164	165-185	188-193
M4	2111	2101	292	2103	2113	123	2122	143	4201	281	4242	4222	3141	4213	3171	3172	3153		
	0-2	3-9	10-28	29-31	32-48	51-61	62-67	68-74	75-81	83-89	92-98	99-115	116-124	126-130	135-150	152-177	178-196		

Şekil 4.8 : Plânlama aşamasının sonucu.

4.2.3.3 Algoritma 2

Algoritma 2, içeriğinde iki TB algoritması barındırmaktadır. Bu nedenle ilk önce TB metasezgiseli aktarılacaktır. İkinci aşamada incelenen problemin TB metasezgiseline nasıl uyarlandığı ifâde edilecektir. Üçüncü aşamada Algoritma ayrıntılandırılacaktır.

Tavlama Benzetimi: 1983'de IBM'in üç araştırmacısının (Kirkpatrick ve diğ., 1983) zorluğu yüksek kombinatoryal problemlerin çözümü için geliştirdiği bu yöntem, metallerin ısıl işlemini temel almaktadır. Yöntemin temelini oluşturan tavlama sürecinde metal ısıtıldıktan sonra yavaşça soğutulur. Sistem, termodinamik dengeye yakın tutulursa kristallerin boyutları büyürken hataları azalmaktadır (Kristalize kafes yapı). Soğuma belirli bir düzeye yaklaştıkça atomlar düzenli duruma geçmektedir (Glover ve Kochenberger, 2003; Gendreau ve Potvin, 2010).

Metal katı duruma geçerken, bu aşamadan sonra atom yapısında bir değişiklik olmamaktadır. Bu işleme başlarken ilk sıcaklık ne kadar önemli ise soğutma sıcaklığı düşüşü de, metallerin yerel en az enerji düzeyinde takılı kalmaması için bir o kadar önemlidir. En az enerji düzeyine ulaşmak için yâni en iyi duruma ulaşmak için düzenli bir kafes yapısına gereksinim duyulmaktadır. Düzenli bir kafes yapısı da, soğumanın yavaş olmasını gerektirmektedir. Hızlı soğuma ile daha yüksek enerjili bir düzeye geçiş yasaklanacağından, bir yerel en az noktada takılıp kalınması beklenebilir (Amorf yapı). Yavaş bir soğuma ve sıcaklığın belirli bir süre korunması, çözüm alanının derinlemesine incelenmesini sağlayacaktır, yâni yerel en iyi çözümde takılıp kalınması engellenecektir (Karaboğa, 2004; Dreo ve diğ., 2006).

Tavlama benzetimi metasezgiselinde, daha kötü bir çözümün kabulüne, yâni daha yüksek enerji düzeyine geçişe, olasılık tabanlı bir ifâdeyle karar verilmektedir. Metropolis ve diğ. (1953), istatistiksel termodinamik çalışmalarında T sıcaklığında enerjide δE artış olma olasılığını, ifade **(4.16)** ile hesaplamaktadırlar. k, Boltzman sabitidir.

$$Prob (\delta E) = exp (-\delta E/kT) \quad \textbf{(4.16)}$$

$$Prob (\Delta) = exp (- \Delta/T) \quad \textbf{(4.17)}$$

Çizelgeleme problemlerinde İfade **(4.16)**'dan türetilen İfâde **(4.17)** kullanılarak varolan durum ve yeni durum arasında seçim yapmak olanaklı olmaktadır. Δ, uyum değerinin olumsuz yönde değişimini ifâde etmektedir. Eğer yeni çözüm, varolan çözümden daha iyi bir çözümü ifâde ediyorsa o çözüm kabul edilir. Aksi durumda 0-1 arasında rassal bir sayı üretilir ve üretilen rassal sayı, İfâde **(4.17)** ile

hesaplanan olasılık değerinden küçük ise yeni çözüm kabul edilir; aksi durumda reddedilir.

Çizelge 4.2'de TB algoritmasının nasıl çalıştığı bir örnek üzerinde anlatılmıştır. Bu örnekte uyum değeri enküçüklenecektir. İlk çözümde 32 değeri elde edilmiştir. 32, en iyi değer, en son kabul edilen değer ve son değer olarak kaydedilmiştir. 1. iterasyonda 34 değeri elde edilmiştir. 34, 32 değerinden kötüdür. Daha kötü bir sonuç elde edildiği için Δ (34-32=2) hesaplanır. İfâde **(4.17)** ile kabul edilme olasılığı hesaplanır. Kabul edilme olasılığı, 0 ve 1 değerleri arasından üretilen rassal sayı ile karşılaştırılır. Rassal sayıdan küçük olduğu için sonuç reddedilir ve gelişme olmayan iterasyon sayacı 1 arttırılır. Aynı zamanda aynı sıcaklıkta bir iterasyon gerçekleştiği için aynı sıcaklıktaki iterasyon sayısı da 1 arttırılır.

Çizelge 4.2 : Tek katmanlı TB metasezgiselinin çalışma örneği.

		İterasyon Numarası									
	İlk Çözüm	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**11**
En İyi Değer	**32**	32	28	28	28	28	28	28	28	28	
En Son Kabul Edilen Değer	**32**	32	28	28	29	29	29	29	29	29	
Son Deger	**32**	34	28	30	29	43	34	31	39	30	
Δ	**-**	2	-4	2	1	14	5	2	10	1	
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	**-**	0,14	-	0,14	0,37	0,00	0,01	0,11	0,00	0,33	
Rassal Sayı	**-**	0,95	-	0,31	0,29	0,59	0,78	0,48	0,12	0,42	
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	**-**	1	0	1	2	3	4	5	6	7	
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	**-**	1	2	3	4	5	6	1	2	3	
Sıcaklık (T)	**-**	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	
Durumu	**-**	**red**	**kabul**	**red**	**kabul**	**red**	**red**	**red**	**red**	**red**	
Parametre Değerleri											
Son Sıcaklık		**0,5**									
limit$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$		**6**									
limit$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$		**7**									

2. iterasyonda 28 değeri elde edilmiştir. Bu değer elde edilen en iyi değer olduğu için kabul edilme olasılığı hesaplanmadan kabul edilir. En iyi değer, en son kabul edilen değer ve son değer 28 olarak kaydedilir. Gelişme olmayan iterasyon sayacı sıfırlanır. Aynı sıcaklıkta bir iterasyon daha gerçekleştirildiği için sıcaklık sayacı 1 arttırılır. 3. iterasyonda elde edilen sonuç, en son kabul edilen değerden kötü olduğu için 1. iterasyonda gerçekleştirilen işlemler yinelenir. 4. iterasyonda daha kötü bir çözüm elde edilse de, kabul edilme olasılığı üretilen rassal sayıdan büyük olduğu için çözüm kabul edilmektedir. Çözüm kabul edilse de en iyi değerden daha kötü bir çözüm elde edildiği için gelişme olmayan iterasyon sayacı 1 arttırılır. En son kabul edilen ve son değer 29 olarak değiştirilir. 5. iterasyonda ve 6. İterasyonda, 1. iterasyondaki gibi tablodaki işlemler gerçekleştirilir. 6. iterasyonda dikkat edilmesi gereken en önemli ayrıntı, aynı sıcaklıktaki iterasyon sayısı limitine ulaşılmıştır. Bu nedenle, bir sonraki iterasyonda sıcaklık, geometrik soğuma katsayısıyla çarpılarak

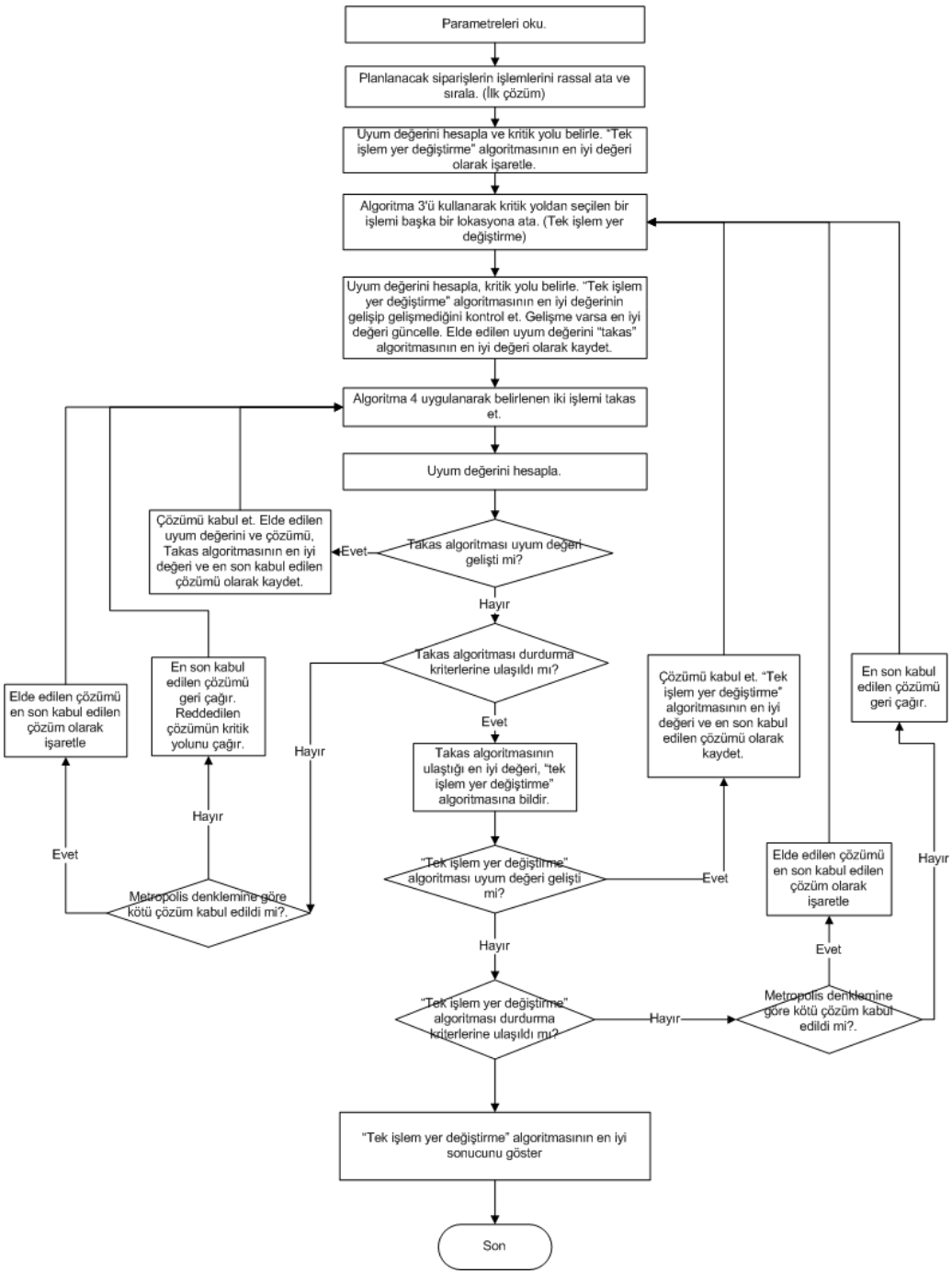
değiştirilmelidir (Bu örnekte geometrik soğuma katsayısı 0,9 kabul edilmiştir). İterasyon 7'de sıcaklık 0,9 olarak değiştirilmiştir ve aynı sıcaklıktaki iterasyon sayısı sayacı da sıfırlanmıştır. İterasyon 7, 8 ve 9'da, iterasyon 1'de anlatılan işlemler tabloda gerçekleştirilmiştir. İterasyon 9'da, gelişme olmayan iterasyon sayısı limitine ulaşılmıştır. Bu nedenle TB algoritması sonlandırılacak, en iyi sonuç kullanıcıya aktarılacaktır.

TB Metasezgiselinin İncelenen Probleme Uyarlanması: İncelenen problemin çözümünde Algoritma 2 (Şekil 4.9) , çift katmanlı TB algoritmasını (Hiyerarşik yapıda çalışan 2 farklı TB algoritması) içermektedir. Dış döngüde tek bir işlemin yeri değiştirilirken (Tek işlem yer değiştirme TB algoritması), iç döngüde iki işlem takas edilmektedir (Takas TB algoritması).

Algoritma 2'de, her iki TB algoritması da hem yükleme hem sıralama gerçekleştirebilmektedir. Bu özelliği nedeniyle önerilen algoritma, bütünleşik yöntembilimini kullanmaktadır. Ayrıca ürünlerin işlemleri arasında varolan öncelik ilişkisi, olurlu çizelgelerin oluşturulması için özel temsilleri veya oluşturulan çizelgelerin olurlu duruma getirilmesi için düzenlenmesini gerektirmektedir. Sunulan algoritmada CPU işlem sürelerinin artmasını engellemek için olursuz çözümlerin üretilmemesi, kullanılan temsille engellenmiştir.

Algoritma 2, içeriğinde birden fazla TB algoritması içermektedir. İki TB algoritması da ortak temsil, ortak amaç fonksiyonu kullanmaktadır. İki TB algoritmasının en önemli farkları, kullandıkları parametre değerleri ve komşu çözüm oluşturma yöntemleridir.

Temsil : İyi bir temsil, algoritmanın performansını doğrudan etkilemektedir. İşlemler arası öncelik ilişkisini dikkate alacak bir temsil, ESTÇP için önemlidir. Literatürde sıklıkla kullanılan iş bazlı gösterim, MSÇP'nin sipâriş–iş–işlem üçlüsüne uyumlandırılarak sipâriş-iş (sipâriş–ürün) bazlı gösterime donüştürülmüştür. Çizelge 4.3'de sipâriş-ürün ikilileri ikinci satırda görülmektedir. Örneğin 11, 1. sipârişin 1. ürününü ifâde etmektedir. 11, soldan sağa doğru tarandığından ilk kez saptanırsa 1. sipârişin 1. ürününün 1. işlemini işaret edecektir. İkinci yinelemede ise 2. işlemi işaret edecektir. 3. satırda, ilgili işlemin yüklendiği makinanın numarası görülmektedir. Örneğin 1. sipârişin 1. ürününün 1. işlemi, 2 numaralı makinaya yüklenmiştir. Bu temsille, öncelik ilişkisi yapısını dikkate alan çizelgeler oluşturulmaktadır. Her iki TB algoritması, Çizelge 4.3'de görülen ortak temsili kullanmaktadır.

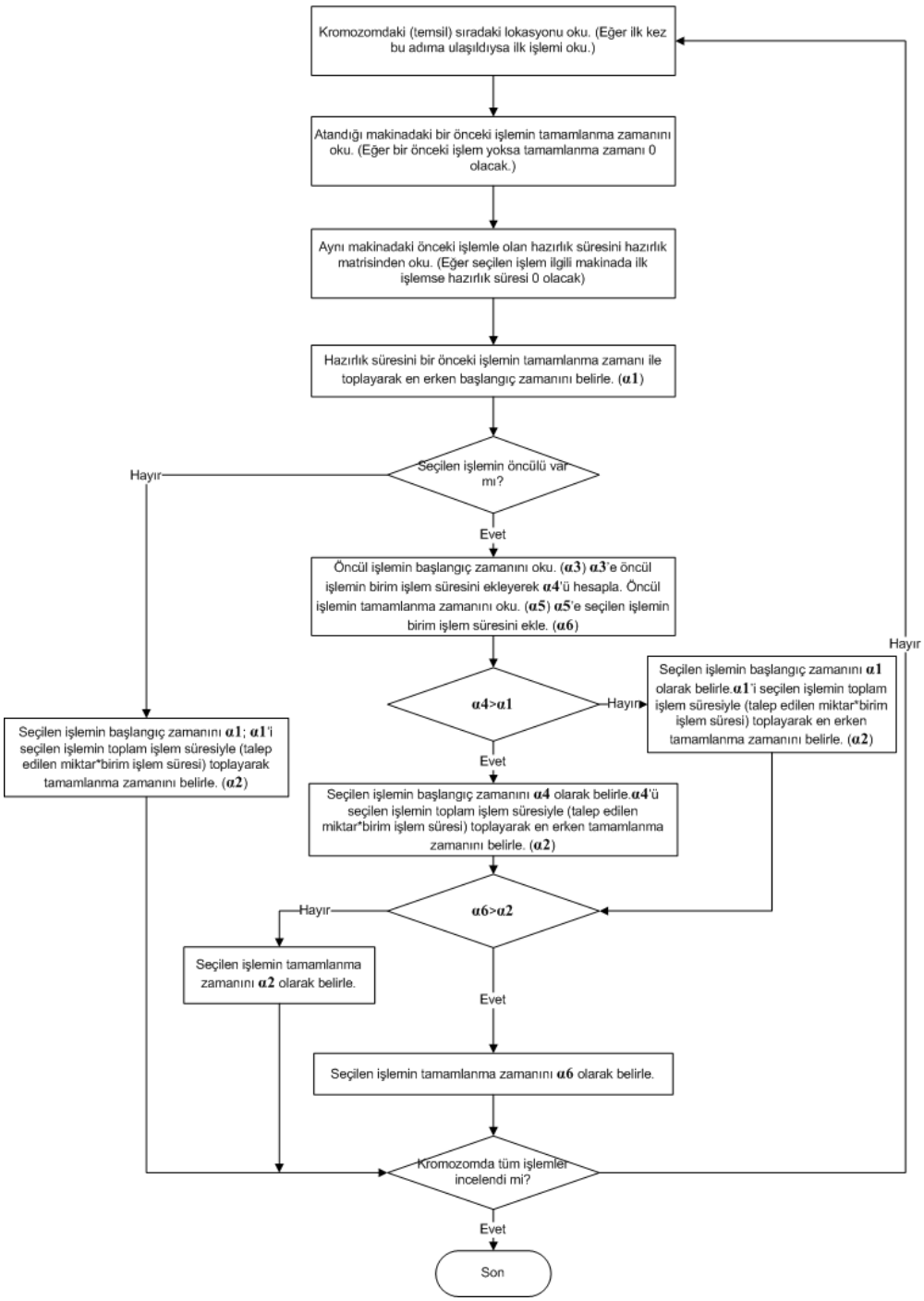


Şekil 4.9 : Algoritma 2'nin akış diyagramı.

Çizelge 4.3 : Sipâriş-iş bazlı gösterim.

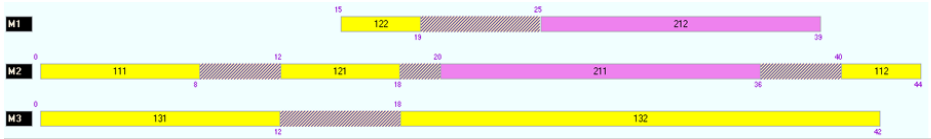
$O_{1,1,1}$	$O_{1,3,1}$	$O_{1,2,1}$	$O_{2,1,1}$	$O_{1,2,2}$	$O_{1,1,2}$	$O_{2,1,2}$	$O_{1,3,2}$
11	13	12	21	12	11	21	13
2	3	2	2	1	2	1	3

Tek işlem yer değiştirme algoritması veya takas algoritmasının ürettiği çizelgeler, Çizelge 4.3'de görülen temsil ile (kromozom) oluşturulmaktadır. Bu temsili çizelgeye dönüştürürken, Şekil 4.10'da verilen akış diyagramı kullanılmaktadır.



Şekil 4.10 : Temsili kullanarak çizelgenin nasıl oluşturulduğunu gösteren akış diyagramı.

Temsilin yapısı gereği, önerilen algoritma ileriye doğru plânlama yapmaktadır. Örneğin Çizelge 4.3'de verilen temsil kullanılarak Şekil 4.11'de görülen Gantt diyagramı oluşturulmuştur. Kromozomda ilk sırada bulunan 111, 2. makinanın ve 1. ürünün ilk işlemi olduğu için başlama zamanı 0 olacaktır. 111'den 2 adet talep edilmektedir (Sipâriş-ürün matrisinde 1. sipârişin 1. ürününe bakılacak). İlgili işlemin, 2 numaralı makinadaki birim işlem süresi 4 olduğu için, 111, 8 birim zaman sürecektir. Başlangıç zamanı, toplam işlemi süresi 8 ile toplanarak tamamlanma zamanı elde edilecektir.



Hazirlik Süresi Matrisi

	O11	O12	O21	O22	O31	O32
O11	0	4	4	7	3	1
O12	3	0	6	3	6	4
O21	2	4	0	3	1	7
O22	2	6	3	0	5	1
O31	1	5	3	2	0	6
O32	3	1	6	4	5	0

İşlem Süresi Matrisi

	O11	O12	O21	O22	O31	O32
M1	2	3	6	1	2	7
M2	4	2	3	8	7	6
M3	5	5	6	7	4	8

Sipariş - Ürün Matrisi

	P1	P2	P3
SIP1	2	2	3
SIP2	4	0	0

Şekil 4.11 : Çizelge 4.3'de verilen temsilin çizelgeye dönüştürülmesi.

Kromozomdaki ikinci işlem 131, 3. makinanın ve 3. ürünün ilk işlemi olduğu için başlangıç zamanı 0 olacaktır. Tamamlanma zamanı, talep edilen miktar 3 ile birim işlem süresi 4 çarpılarak 12 şeklinde hesaplanmaktadır. Kromozomda sıradaki işlem 121, 2. makinadaki 2. işlemdir. 2. makinadaki 1. işlem 111'in tamamlanma zamanına hazırlık süresi eklenerek 12 değeri elde edilmektedir (Akış diyagramında α1 ile gösterilmişti). 121'in öncülü olmadığı için başlangıç zamanı 12 olacaktır. Tamamlanma zamanı, başlangıç zamanına 6 birim toplam işlem süresi eklenerek 18 şeklinde hesaplanmaktadır. Kromozomda, sıradaki işlem 211'in öncülü olmadığı için aynı makinadaki bir önceki işlem 121'in tamamlanma zamanına 2 birim hazırlık süresi eklenerek başlangıç zamanı 20 olarak hesaplanmaktadır. 211'in başlangıç zamanına 16 birim toplam işlem süresi eklenerek tamamlanma zamanı 36 elde edilmektedir. Kromozomda sıradaki işlem 122, 1. makinada ilk işlem olduğu için α1 değeri 0 olacaktır. 122'nin öncülü 121'in başlangıç zamanı 12'ye (α3), öncül işlemin birim işlem süresi 3 eklenerek 15 değeri elde edilir (α4). α4, α1'den büyük olduğu için 15 değeri 122 numaralı işlemin başlangıç zamanı olacaktır. 122'nin başlangıç zamanına toplam işlem süresi 2 eklenerek en erken tamamlanma zamanı bulunur (α2=17). 122'nin öncülü 121'in tamamlanma zamanı 18'e, seçilen işlemin birim işlem süresi 1 eklenerek 19 değeri elde edilir (α6). α6, α2'den büyük olduğu için α6 değeri yâni 19, 122 numaralı işlemin tamamlanma zamanı olacaktır. Sırasıyla 112, 212 ve

132 işlemleri için Şekil 4.10'da görülen algoritma kullanılarak tüm çizelge elde edilecektir.

İlk Çözüm: Ön plânlama aşamasında plânlanacaklar kümesine eklenen sipârişler, plânlanmış sipârişleri tâkiben rassal yükleme ve sıralama kuralına göre dizilmektedir. Eğer plânlanmış sipâriş yoksa (Ön plânlamanın başlangıç aşamasında) ilk çözüm rassal yükleme ve sıralama ile oluşturulmaktadır. Plânlama aşamasında ön plânlama sonucu, ilk çözüm olarak kabul edilmektedir.

Uyum Değeri: Önerilen algoritmanın her iki TB algoritması da ortak amaç fonksiyonunu enküçüklemeye çalışmaktadır. Performans ölçütleri, ağırlık katsayılarıyla çarpılarak uyum değeri elde edilmektedir. Yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin farklı büyüklükleri nedeniyle ön plânlama aşamasına gereksinim duyulmaktadır. Ön plânlamada performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları 0,5 kabul edilmiştir. Elde edilen ön plânlama sonucuna göre, yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin, uyum değerine eşit katkı sağlayacak şekilde ağırlıkları değiştirilmektedir. Plânlama aşamasında algoritma, yeni ağırlık katsayılarına göre çalıştırılmaktadır. Örneğin ön plânlama sonucuna göre yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi için sırasıyla 193 ve 25,75 değerleri elde edilmiş olduğu kabul edilsin. Bu değerler kullanılarak, performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları yeniden hesaplanmaktadır. Plânlama aşamasına başlamadan önce yayılma süresinin ağırlık katsayısı 1; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin ağırlık katsayısı (193/25,75=) 7,495 olarak değiştirilir.

Komşu Çözüm: Algoritma 2, iki farklı TB algoritması içerdiği için iki farklı komşuluk arama yönergesi kullanmaktadır. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, Algoritma 3'ü kullanarak bir işlemi başka bir yerleşim noktasına yerleştirmektedir. Takas TB algoritması, Algoritma 4'ü kullanarak iki işlemi takas etmektedir. Algoritma 3 ve 4'ün ayrıntıları ilerleyen bölümde aktarılacaktır. Ancak bu iki algoritmanın çalışma ilkesini özetlemek gerekirse, yeri değiştirilecek işlem (Tek işlem yer değiştirme) veya işlemlerin (Takas) kaldırıldığı ve atandığı yerlerdeki kaydırma etkisi (bir sonraki işlemi nasıl etkilediği) ve sipâriş teslim gecikmelerine olan etkisi hesaplanarak, yeri değiştirilecek işlem veya işlemler ve atanacağı yerler belirlenmektedir.

Soğuma Stratejisi: Önerilen algoritmada, geometrik soğuma stratejisi yeğlenmiştir. Önceden belirlenen limit iterasyon sayısına ulaşıldığında, sıcaklık geometrik soğuma katsayısı ile çarpılarak yeni sıcaklık değeri belirlenmektedir. Algoritma 2'de her iki algoritma (Tek işlem yer değiştirme TB, takas TB algoritmaları) için geometrik soğuma katsayısı, 0,96 kabul edilmiştir.

Durdurma Ölçütleri: Test edilen algoritmalarda iki farklı durdurma ölçütü kullanılmıştır. Son sıcaklık değerine veya gelişme olmayan iterasyon sayısı limit değerine ulaşılması, ilgili TB algoritmasının sonlandırılmasını sağlamaktadır. TB algoritmalarının her ikisi de, benzer durdurma ölçütlerini kullanırken, değerleri farklılık göstermektedir.

İlk sıcaklık değeri ve her sıcaklıkta kaç iterasyon gerçekleştirileceği kullanıcı tarafından girilmektedir. Her sıcaklık değerinde belirli sayıda iterasyon gerçekleştirildikten sonra sıcaklık, geometrik soğuma katsayısı ile çarpılmaktadır. İterasyonlar bu şekilde sürerken eğer son sıcaklık değeri, limit sıcaklık değerinden küçük veya eşit olursa TB algoritması durdurulmaktadır.

En iyi çözümden daha kötü bir çözüm elde edildiğinde gelişme olmayan iterasyon sayacı bir arttırılmaktadır. Gelişme olmayan iterasyon sayısı limit değerine, ulaşılması durumunda, ilgili TB algoritması durdurulmaktadır. Böylece yerel en iyi çözüme takılan algoritmanın sürmemesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada aynı uyum değerine ulaşılması veya daha iyi bir uyum değerine ulaşılması durumunda çözümün geliştiği kabul edilmiştir.

İterasyonlar sırasında eğer tek işlem yer değiştirme algoritmasının durdurma ölçütlerine ulaşıldıysa, en iyi sonuç kullanıcıya sunulmaktadır. Aksi durumda hiyerarşide bir üstte yer alan tek işlem yer değiştirme TB algoritması, yeni bir iterasyona başlamaktadır. Eğer takas TB algoritması, durdurma ölçütlerine ulaşırsa, en iyi sonucu, tek işlem yer değiştirme TB algoritmasına bildirmektedir.

Durdurma ölçütlerinin nasıl çalıştığı, Çizelge 4.2'de verilen tek katmanlı TB algoritması örneği üzerinde anlatılmıştır.

Parametre Değerlerinin Belirlenmesi: Her bir TB algoritmasının 3'er adet olmak üzere toplamda 6 adet parametre değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ön plânlama aşamasında gerek tek işlem yer değiştirme, gerekse takas TB algoritmalarının parametre değerlerinin belirlenmesi için deney tasarımı yapılmıştır. Matlab R2008a deney tasarımı kullanılarak Çizelge 4.4'de görülen parametrelerin değerleri belirlenmiştir. Son sıcaklık ve geometrik soğuma katsayısı gibi parametreler sabitlenerek, deney tasarımı için gerekecek deneme sayısı azaltılmıştır.

Plânlama aşamasında Çizelge 4.5'de verilen parametre değerleri kullanılmaktadır. İlk sıcaklık değeri düşük tutularak, zâten gelişimini tamamlamış çözümlerin en iyi çözümden (Ön plânlama en iyi çözümünden) çok fazla uzaklaşmaması istenmektedir. Çizelge 4.5'de sunulan parametre değerleri ile birçok problemde iyi

çözümlere kısa CPU işlem sürelerinde ulaşılmaktadır. Bu nedenle plânlama aşamasında parametre değerleri, Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi sabitlenmiştir. Ayrıca ön plânlama için deney tasarımı gerçekleştirilirken, plânlama aşamasının sonunda elde edilen sonuçlara göre ön plânlama parametre değerleri eniyilenmektedir. Bu nedenle ön plânlama parametreleri deney tasarımı ile belirlenirken, tüm plânlama aşamalarını dikkate aldığı düşünülebilir.

Çizelge 4.4 : Ön plânlamada parametre değerlerinin belirlenmesi.

			Alt sınır değer	Üst sınır değer
Tek İşlem Yer Değiştirme Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**1**	**15**
	Son sıcaklık	0,7	-	-
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**5**	**100**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**100**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	-	-
Takas Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**0.5**	**15**
	Son sıcaklık	0,05	-	-
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**5**	**100**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**100**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	-	-
DOE	Deney tasarımı ile belirlenecek.			

Çizelge 4.5 : Plânlama aşamasında kullanılan parametre değerleri.

		Değeri
Tek İşlem Yer Değiştirme Algoritması	İlk sıcaklık	1,1
	Son sıcaklık	0,7
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	18
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	55
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96
Takas Algoritması	İlk sıcaklık	1,1
	Son sıcaklık	0,05
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	18
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	15
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96

Algoritma 2 Çalışma Mantığı ve Bir Örnek: Algoritma 2, bünyesinde 2 alt TB algoritması barındırmaktadır. Tek bir TB algoritmasının nasıl çalıştığı ve sonuçları nasıl değerlendirdiği önceki bölümde Çizelge 4.2'de verilen bir örnek üzerinde anlatılmıştır. Bu bölümde, hiyerarşide en üstte yer alan tek işlem yer değiştirme TB algoritması ve hiyerarşide altta yer alan takas TB algoritmasını içeren Algoritma 2'nin çalışma mantığı aktarılacak ve bir örnek üzerinde uygulaması gerçekleştirilecektir. Algoritma 2'nin içeriğinde yer alan Algoritma 3 ve 4'e ilerleyen bölümde değinilecektir.

Algoritma 2 (Şekil 4.9) ile ilk çözüm geliştirilmektedir. Öncelikle ilk çözümün uyum değeri hesaplanmaktadır. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, Algoritma 3'ü kullanarak bir işlemi başka bir yerleşim noktasına yüklemektedir. Bu değişiklik sonucu yeni bir çizelge elde edilmektedir. Bu çizelgenin uyum değeri

hesaplanmaktadır. Hiyerarşide üst düzeyde bulunan tek işlem yer değiştirme TB algoritması, takas TB algoritmasına bu çizelgeyi ilk çözüm olarak kabul etmesini ve bu ilk çözümü geliştirmesini talep etmektedir. Takas TB algoritması, durdurma ölçütlerine ulaşana dek Algoritma 4 ile takasları sürdürmektedir. Durdurma ölçütlerine ulaşıldığından, elde edilen en iyi sonuç "tek işlem yer değiştirme TB algoritmasına" bildirilmektedir. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, sonucu değerlendirerek kabul veya reddetmektedir. Reddederse eski çözümü çağırmaktadır. Yeniden bir işlemin yerini değiştirerek takas TB algoritmasına ilk çözüm olarak sunar ve geliştirmesini ister. Takas TB algoritmasının elde edeceği en iyi sonucu, tek işlem yer değiştirme algoritması yeniden değerlendirmektedir. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, durdurma ölçütlerine ulaşana dek döngü aynı şekilde sürer. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, durdurma ölçütlerine ulaştığında eğer plânlama aşamasında ise sonuç kullanıcıya aktarılmaktadır. Eğer ön plânlama aşamasında ise, sonuç ya plânlama aşamasına ya da ön plânlamadaki bir sonraki adıma ilk çözüm olarak sunulmaktadır.

Tek işlem yer değiştirme ve takas TB algoritmaları birbirleriyle veri paylaşarak sonucu geliştirmektedirler. Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, bir komşu çözüm oluşturarak bu sonucu, takas TB algoritmasından geliştirmesini talep etmektedir. Yâni tek işlem yer değiştirme TB algoritmasının oluşturduğu komşu çözüm, takas TB algoritmasının ilk çözümü olacaktır. Takas TB algoritması ise en iyi sonucunu tek işlem yer değiştirme TB algoritmasına bildirerek bu sonucu değerlendirmesini talep etmektedir. Algoritma 2'nin tamamlanması için tek işlem yer değiştirme algoritmasının durdurma ölçütlerine ulaşması gerekmektedir.

Çizelge 4.6'da, Algoritma 2'nin hiyerarşik yapısını aktarmak için bir örnek çalışma yapılmıştır. Bu küçük ölçekli çalışmada, tek işlem yer değiştirme TB algoritmasının gelişme olmayan iterasyon sayısı limit değeri, aynı sıcaklıkta izin verilen iterasyon sayısı limit değeri, ilk sıcaklık, son sıcaklık değerleri ve geometrik soğuma katsayısı sırasıyla 3; 3; 1; 0,5 ve 0,9 seçilirken, takas TB algoritmasınınkiler ise sırasıyla 3; 2; 1,4; 0,5 ve 0,8 olarak belirlenmiştir. Bu problemde, her iki TB algoritmasının birbiriyle nasıl veri paylaştığı ve çözümleri nasıl değerlendirdiği anlatılacaktır.

Öncelikle bir ilk çözüm oluşturulmaktadır. Eğer ön plânlama aşaması sürüyorsa, plânlanan sipârişlerin arkasına, plânlanacak sipârişler rassal olarak atanmaktadır. Eğer plânlama aşamasına geçildiyse, ön plânlama çıktısı ilk çözüm olacaktır. Örnek problemde ilk çözümün uyum değeri 82 kabul edilsin. 82 değerli ilk çözümde tek işlem yer değiştirme algoritması, Algoritma 3 ile bir işlemi başka bir yerleşim noktasına yerleştirerek 78 değerli bir çözüm oluşturmaktadır.

Çizelge 4.6 : Algoritma 2'nin nasıl çalıştığını gösteren örnek.

Tek İşlem Yer Değiştirme TB algoritması		**İterasyon Numarası**										
	İlk Çözüm	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
En İyi Değer	**82**	60	58	58	58	56						
En Son Kabul Edilen Değer	**82**	60	58	59	59	56						
Son Deger	**82**	60	58	59	65	56						
Δ	-	-22	-2	1	6	-3						
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	-	-	0,368	0,001	-						
Rassal Sayı	-	-	-	0,352	0,734	-						
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	0	0	1	2	0						
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	3	1	2						
Sıcaklık (T)	-	1	1	1	0,9	0,9						
Durumu	-	**kabul**	**kabul**	**kabul**	**red**	**kabul**						
Parametre Değerleri												
Son Sıcaklık		**0,5**										
limit$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$		**3**										
limit$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$		**3**										
Takas TB algoritması		**İterasyon Numarası**										
	İlk Çözüm	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
En İyi Değer	**78**	72	64	64	64	60	60	60	60			
En Son Kabul Edilen Değer	**78**	72	64	64	66	60	60	62	62			
Son Deger	**78**	72	64	68	66	60	72	62	81			
Δ	-	-6	-8	4	2	-6	12	2	19			
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	-	-	0,028	0,168	-	0,000	0,061	0,000			
Rassal Sayı	-	-	-	0,253	0,084	-	0,269	0,003	0,951			
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	0	0	1	2	0	1	2	3			
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,9	0,9	0,72	0,72			
Durumu	-	**kabul**	**kabul**	**red**	**kabul**	**kabul**	**red**	**kabul**	**red**			
En İyi Değer	**64**	64	62	62	62	62	62	60	60	60	58	58
En Son Kabul Edilen Değer	**64**	68	62	62	62	62	63	60	60	60	58	58
Son Deger	**64**	68	62	68	66	62	63	60	65	68	58	69
Δ	-	4	-6	6	4	0	1	-3	5	8	-2	11
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,057	-	0,005	0,028	-	0,328	-	0,001	0,000	-	0,000
Rassal Sayı	-	0,030	-	0,740	0,120	-	0,195	-	0.725	0,214	-	0,531
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	1	0	1	2	0	1	0	1	2	0	1
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,9	0,9	0,72	0,72	0,57	0,57	0,46
Durumu	-	**kabul**	**kabul**	**red**	**red**	**kabul**	**kabul**	**kabul**	**red**	**red**	**kabul**	**red**
En İyi Değer	**60**	60	59	59	59	59						
En Son Kabul Edilen Değer	**60**	61	59	59	59	59						
Son Deger	**60**	61	59	69	72	65						
Δ	-	1	-2	10	13	6						
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,490	-	0,000	0,000	0,001						
Rassal Sayı	-	0,570	-	0,491	0,820	0,184						
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	1	0	1	2	3						
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	1	2	1						
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,9						
Durumu	-	**red**	**kabul**	**red**	**red**	**red**						
En İyi Değer	**65**	65	65	65								
En Son Kabul Edilen Değer	**65**	65	65	65								
Son Deger	**65**	67	73	67								
Δ	-	2	8	2								
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,240	0,003	0,168								
Rassal Sayı	-	0,472	0,195	0,182								
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	1	2	3								
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	1								
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12								
Durumu	-	**red**	**red**	**red**								
En İyi Değer	**64**	64	60	56	56	56	56					
En Son Kabul Edilen Değer	**64**	66	60	56	56	56	61					
Son Deger	**64**	66	60	56	73	62	61					
Δ	-	2	-6	-4	17	6	5					
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,240	-	-	0,000	0,001	0,004					
Rassal Sayı	-	0,187	-	-	0,581	0,162	0,003					
Sayaç$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$	-	1	0	0	1	2	3					
Sayaç$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$	-	1	2	1	2	1	2					
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,9	0,9					
Durumu	-	**kabul**	**kabul**	**kabul**	**red**	**red**	**kabul**					
Parametre Değerleri												
Son Sıcaklık		**0,5**										
limit$_{\text{aynı sıcaklıkta iterasyon sayısı}}$		**2**										
limit$_{\text{gelisme olmayan iterasyon sayısı}}$		**3**										

Çizelge 4.6 : (devam) Algoritma 2'nin nasıl çalıştığını gösteren örnek.

Tek İşlem Yer Değiştirme TB algoritması	İterasyon Numarası											
	İlk Çözüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
En İyi Değer	82	60	58	58	58	56	56	56	56			
En Son Kabul Edilen Değer	82	60	58	59	59	56	56	59	59			
Son Deger	82	60	58	59	65	56	67	59	60			
Δ	-	-22	-2	1	6	-3	11	3	1			
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	-	-	0,3679	0,0013	-	0,0000	0,0246	0,2910			
Rassal Sayı	-	-	-	0,3520	0,7340	-	0.963	0,0211	0.54			
$Sayaç_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$	-	0	0	1	2	0	1	2	3			
$Sayaç_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	3	1	2	3	1	2			
Sıcaklık (T)	-	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,81	0,81			
Durumu	-	kabul	kabul	kabul	red	kabul	red	kabul	red			
Parametre Değerleri												
Son Sıcaklık		0,5										
$limit_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$		3										
$limit_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$		3										
Takas TB algoritması	**İterasyon Numarası**											
	İlk Çözüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
En İyi Değer	72	72	72	69	69	67	67	67	67			
En Son Kabul Edilen Değer	72	72	72	69	69	67	67	67	67			
Son Deger	72	90	77	69	70	67	70	89	73			
Δ	-	18	5	-3	1	-2	3	22	6			
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,000	0,028	-	0,409	-	0,035	0,000	0,000			
Rassal Sayı	-	0,392	0,831	-	0.75	-	0.84	0,160	0.36			
$Sayaç_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	0	1	0	1	2	3			
$Sayaç_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,896	0,896	0,7168	0,717			
Durumu	-	red	red	kabul	red	kabul	red	red	red			
En İyi Değer	59	59	59	59								
En Son Kabul Edilen Değer	59	59	59	59								
Son Deger	59	69	65	78								
Δ	-	10	6	19								
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	0,001	0,014	0,000								
Rassal Sayı	-	0.286	0,582	0,195								
$Sayaç_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	3								
$Sayaç_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	1								
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12								
Durumu	-	red	red	red								
En İyi Değer	72	69	69	62	62	61	61	60	60	60	60	
En Son Kabul Edilen Değer	72	69	70	62	62	61	61	60	60	60	60	
Son Deger	72	69	70	62	63	61	84	60	64	65	68	
Δ	-	-	1	-	1	-	23	-	4	5	8	
Kabul Edilme Olasılığı; p(Δ)=exp(- Δ/T)	-	-	0,490	-	0,409	-	0,000	-	0,004	0,000	0,000	
Rassal Sayı	-	-	0,410	-	0,820	-	0,710	-	0,318	0.85	0,284	
$Sayaç_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$	-	0	1	0	1	0	1	0	1	2	3	
$Sayaç_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$	-	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Sıcaklık (T)	-	1,4	1,4	1,12	1,12	0,896	0,896	0,7168	0,717	0,573	0,573	
Durumu	-	kabul	kabul	kabul	red	kabul	red	kabul	red	red	red	
Parametre Değerleri												
Son Sıcaklık		0,5										
$limit_{aynı\ sıcaklıkta\ iterasyon\ sayısı}$		2										
$limit_{gelisme\ olmayan\ iterasyon\ sayısı}$		3										

Bu çözüm, takas TB algoritmasının ilk çözümüdür (Çizelge 4.6'da tek işlem yer değiştirme TB algoritmasında 1 numaralı iterasyon, gri renkle işaretlenmiştir. 1 numaralı iterasyonun ilgili takas TB algoritması iterasyonları da, kolay incelenebilmesi için aynı renkle işaretlenmiştir). Takas TB algoritması, toplam 8 iterasyonun sonunda gelişme olmayan iterasyon limitine ulaşıldığı için sonlandırılmıştır. Takas TB algoritması, 60 en iyi değerini elde etmiştir. 60 değerli çözüm, bir önceki 82 değerli çözümden daha iyi olduğu için sonucu, tek işlem yer değiştirmesi algoritması kabul etmektedir. Tek işlem yer değiştirme algoritması, 60 değerli çözümde bir işlemin yerini Algoritma 3 ile değiştirmektedir ve uyum değerini 64 hesaplamıştır. Takas TB algoritması 64 değerli ilk çözümü geliştirmiş, 58 değerli çözüm elde etmiştir (Koyu krem rengiyle işaretlenmiştir). Takas TB algoritması, sıcaklık limit değerini aştığı için sonlandırılmıştır. Takas TB algoritmasının elde ettiği

bu çözüm, tek işlem yer değiştirme algoritmasının bir önceki kabul edilen çözümünden daha iyi olduğu için kabul edilecektir. Tek işlem yer değiştirme algoritması, 58 değerli çözümde, bir işlemin yerini Algoritma 3 ile değiştirerek 60 değerli bir çözüm elde etmiştir (Açık sarı rengiyle işaretlenmiştir). Takas TB algoritması, 60 değerli ilk çözümü, iterasyonlarla geliştirerek en iyi 59 değerini elde etmiştir. Bu çözüm, tek işlem yer değiştirme algoritmasının bir önceki kabul edilen çözümü 58'den kötü olduğu için Metropolis ifâdesi ile değerlendirilerek kabul edilmiştir. Tek işlem yer değiştirme algoritması, 59 değerli çözümde Algoritma 3 ile bir işlemin yerini değiştirerek 65 değerli çözüm elde etmiştir. Takas TB algoritması, 65 değerli bu ilk çözümü geliştirmeye çalışacaktır. Ancak takas TB algoritmasının en iyi değeri, tek işlem yer değiştirme algoritmasının kabul edilen bir önceki değerinden göreceli olarak çok kötü olduğu için, Metropolis ifâdesi değerlendirmesine göre reddedilmiştir. İterasyonlar, tek işlem yer değiştirme algoritması, sonlandırma ölçütlerine ulaşana dek bu şekilde sürecektir. Çizelge 4.6'da tek işlem yer değiştirme TB algoritmasının, 8. iterasyonda sonlandırıldığı görülmektedir. 8 iterasyonda elde edilen en iyi değerin, 56 olduğu görülmektedir. 56 değeri, eğer plânlama aşamasında elde edildiyse kullanıcıya gösterilmektedir. Aksi durumda (ön plânlama aşamasında) ya ön plânlamada bir sonraki aşamaya veya plânlama aşamasına ilk çözüm olarak sunulacaktır.

Kritik Yolun Tanımlanması: Algoritma 2 komşu çözüm oluştururken, kritik yol kavramından yararlanmaktadır. Gerek tek işlem yer değiştirmede, gerekse takas algoritmalarında işlem seçiminde kritik yol kullanılmaktadır. Literatürde yayılma süresinin enküçüklendiği ESTÇP'lerde kullanılan kritik yol kavramının, sipâriş teslim gecikmesi süresinin enküçüklenmesinin sözkonusu olduğu problemimizde değiştirilmeden kullanılması uygun olmayacaktır. Bu nedenle kritik yol tanımında değişiklik yapılmıştır. Geciken sipârişlerin kritik yolunu belirlemek için aşağıdaki basit yönerge uygulanırken, yayılma süresi için geleneksel kritik yol tanımı kullanılmaktadır. Yayılma süresinin ve geciken sipârişlerin kritik işlemleri birleştirilerek kritik işlemler kümesi oluşturulmaktadır.

- Eğer sipâriş gecikiyorsa o sipârişin en son tamamlanan işlemini belirle.
- O işlemi, atölyenin en son tamamlanan işlemi gibi düşünerek, klasik yayılma süresi problemindeki kritik yol tanımını kullanıp, o sipârişin kritik yolunu tanımla.
- Tüm sipârişler için bu adımları gerçekleştir.

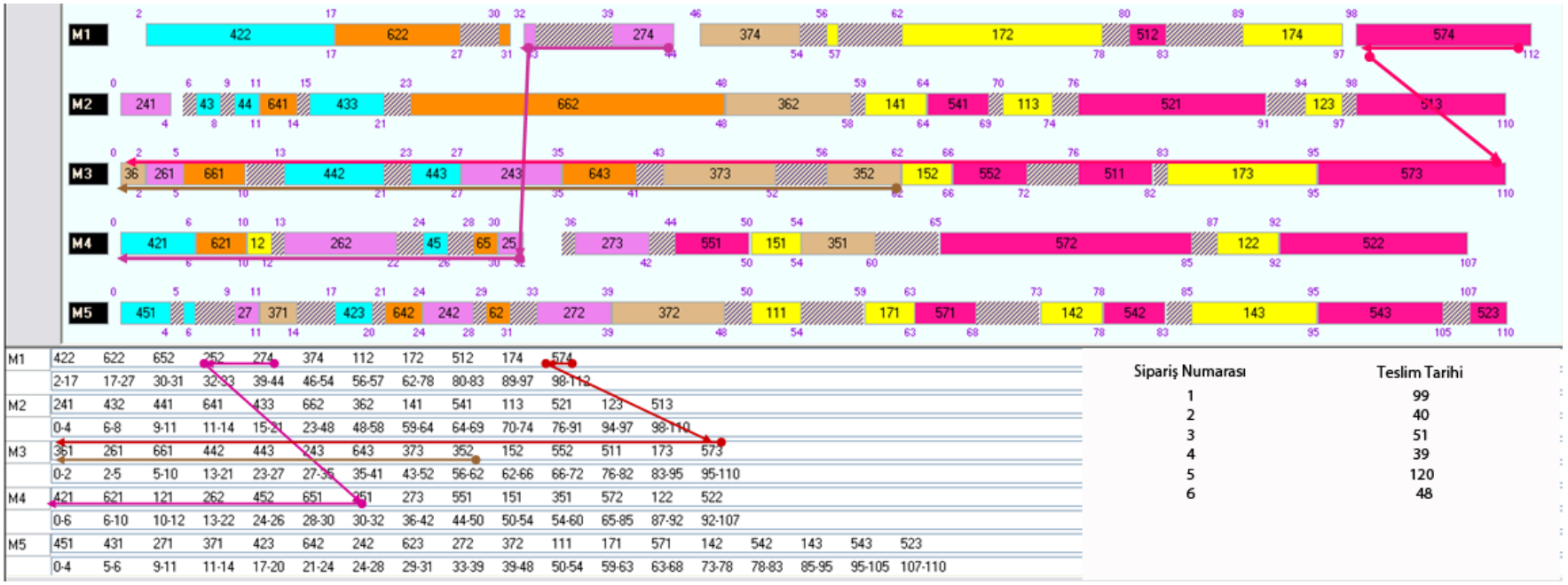
Şekil 4.12'de kritik yolun nasıl belirlendiğini açıklayan bir örnek problem görülmektedir. Öncelikle geciken sipârişler belirlenmektedir. Sipâriş 2 ve 3'ün

tamamlanma zamanlarının teslim tarihlerini aştığı görülmektedir. Sipâriş 2'nin tamamlanma zamanı 44'dür. Sipâriş 2'nin en son tamamlanan işlemi 274'dür. 274 ile aynı makinadaki bir önceki işlem 252 arasında boşluk olmadığı için 252 de kritik işlemdir. 252'nin aynı makinadaki bir önceki işlemi 652'dir. Ancak 652 ile 252 arasında boşluk vardır. Bu nedenle 652 kritik işlem değildir; 252'nin öncülü 251 kritik işlemdir. 4. makinada aralarında boşluk olmadığı için 651, 452, 262, 121, 621 ve 421 kritik işlemlerdir. 2. sipâriş için uygulanan yöntem, 3. sipâriş için de uygulanırsa 352, 373, 643, 243, 443, 442, 661, 261 ve 361 kritik işlemlerinden 3. sipârişin kritik yolu elde edilir. Geciken sipârişlerin kritik yolu belirlendikten sonra, yayılma süresinin kritik yolu belirlenecektir. Atölyede en son tamamlanan işlem 574'dür. 574 numaralı işlemden başlanarak geleneksel kritik yol belirleme yönergesi uygulanırsa 574, 573, 173, 511, 552, 152, 352, 373, 643, 243, 443, 442, 661, 261 ve 361 kritik işlemlerinin, yayılma süresinin kritik yolunu oluşturduğu görülecektir. Şekil 4.12'de ilgili sipârişlerin ve yayılma süresinin kritik yolu, gerek Gantt diyagramında gerekse makina işlem sıralaması listesinde (Gantt diyagramının altında) işaretlenmiştir. Çizelge 4.7'de kritik işlemler, arka arkaya sıralanarak kritik işlemler kümesi oluşturulmuştur.

Bâzı işlemlerin, kritik işlem kümesinde tekrarlandığı görülmektedir. Aynı kritik işlemin tekrarlanması o işlemin diğer kritik işlemlerden daha önemli olduğunu ifâde etmektedir. Eğer ilgili kritik işlem, kritik işlem kümesinde 2 veya daha fazla tekrarlanır ve bu kritik işlemi içeren bir komşu çözüm oluşturulursa uyum değerinin daha fazla gelişme ihtimali vardır.

4.2.3.4 Algoritma 3

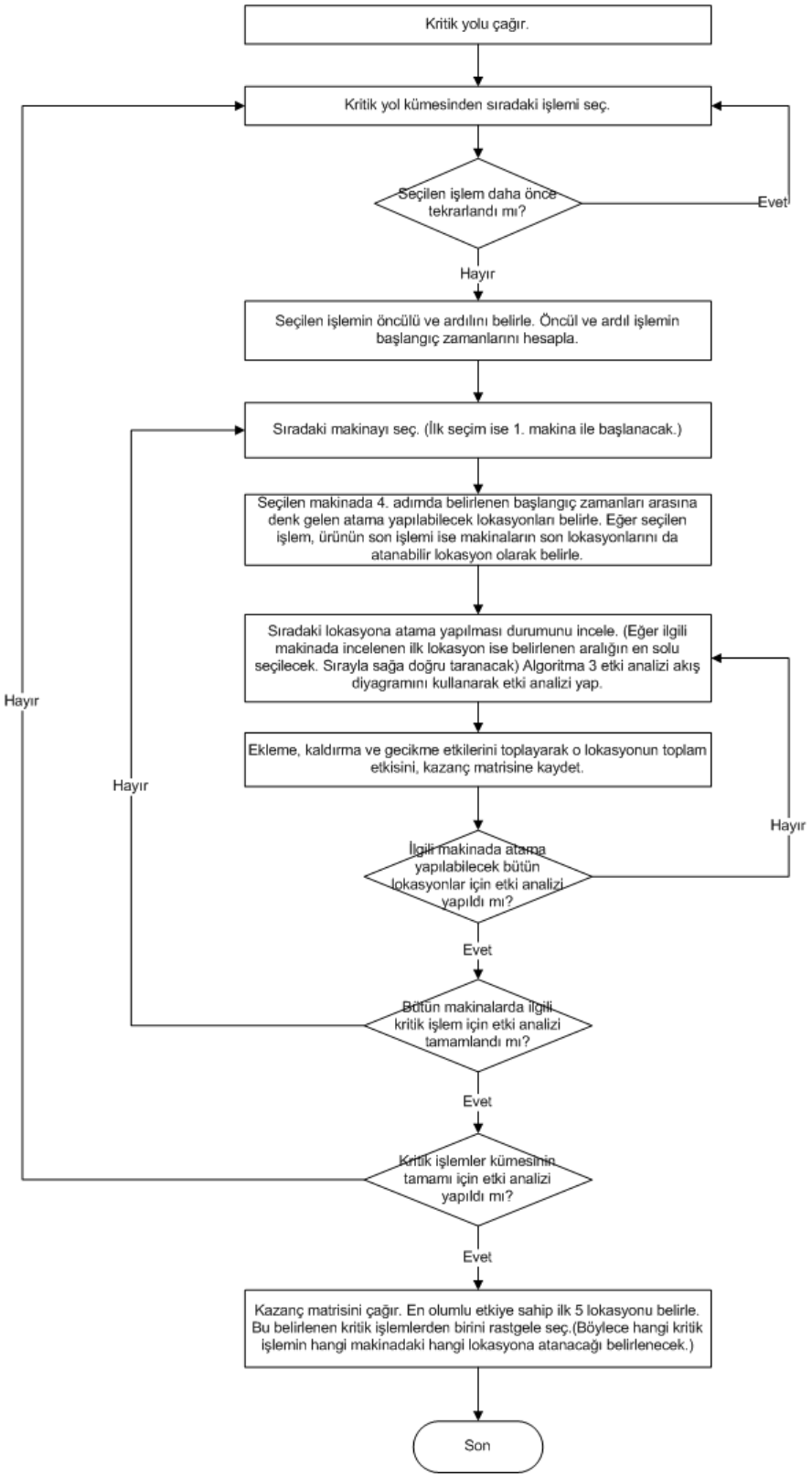
Tek işlem yer değiştirme TB algoritması, Algoritma 3 ile kritik yoldan hangi işlemin seçileceğini, seçilen işlemin hangi makinada hangi yerleşim noktasına atanacağını belirlemektedir (Şekil 4.13). Öncelikle Algoritma 3, komşu çözüm oluşturacağı Gantt diyagramında kritik yol kümesini belirlemektedir. Kritik yol kümesindeki tüm işlemler için etki analizi adı verilen bir inceleme yapılmaktadır. Bu analiz için öncelikle seçilen kritik işlemin atanabileceği yerleşim noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Atanabilecek yerleşim noktalarının belirlenmesi için kritik işlemin öncülü ve ardılının başlangıç zamanları kullanılmaktadır. Tüm makinalarda bu aralığın dışında kalan yerleşim noktaları, bir istisnaî durum haricinde atanamaz kabul edilmektedir. Eğer işlem bir ürünün son işlemi ise (istisnaî durum) ilgili işlem, her makinanın en son yerine atanabilmektedir.



Şekil 4.12 : Kritik yolun belirlenmesi.

Çizelge 4.7 : Şekil 4.12'de verilen Gantt diyagramı için kritik yol kümesi.

kritik işlem no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
sip/ürün/işlem	274	252	251	651	452	262	121	621	421	352	373	643	243	443	442	661	261	361	574	573	173	511	552	152	352	373	643	243	443	442	661	261	361



Şekil 4.13 : Algoritma 3'ün akış diyagramı.

Kritik işlemin her atanabilir yere (lokasyona) olan ataması için etki analizi gerçekleştirilmektedir. En pozitif değere sahip yer (lokasyon), o kritik işlemin atanabileceği yer olarak belirlenmektedir. Tüm bu etki analizleri, her bir kritik işlemin atanabilir olduğu lokasyonlar için gerçekleştirilmektedir. Böylece her bir kritik işlem için en iyi atama yapılabilecek lokasyon belirlenmektedir. En pozitif değerli 5 kritik işlemden biri rassal seçilerek o işlem, en pozitif etkili lokasyona atanmaktadır. Tek işlem yer değiştirme algoritması, komşu çözüm oluştururken etki analizi hesabında aşağıdaki değerlerin toplamını arttırmayı hedeflemektedir (Şekil 4.14).

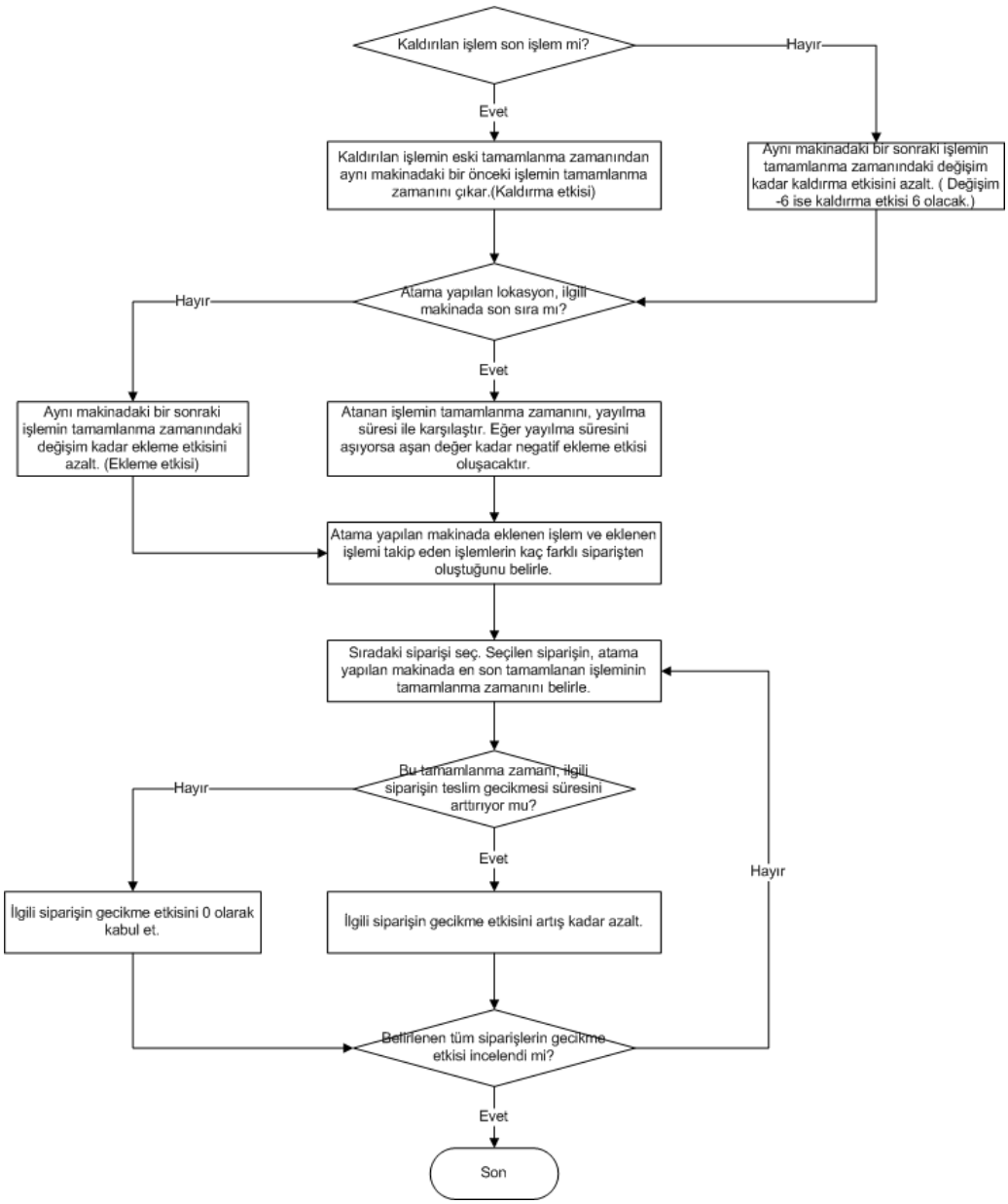
- Yeri değiştirilecek işlemin, yer değiştirmesi sonucunda, aynı makinadaki izleyicisi olan işlemin tamamlanma zamanındaki azalma veya eğer yeri değiştirilecek işlem, ilgili makinada son işlemse ilgili makinanın tamamlanma zamanındaki azalma (Negatif ve pozitif değer alabilir.)

- Yeri değiştirilecek işlemin atandığı lokasyonu izleyen işlemin, tamamlanma zamanındaki azalma (Negatif ve pozitif değer alabilir.) veya eğer yüklendiği makinada son işlemse yayılma süresini azaltma miktarı (Salt negatif değer ve sıfır alabilir)

- Salt yeri değiştirilen işlem nedeniyle yeri değiştirilen işlemin tamamlanma zamanı ve yüklendiği makinada ilgili işlemi izleyen işlemlerin sağa kayma değerleri göz önüne alınarak gecikme değerlerindeki azalma (Salt negatif değer ve sıfır alabilir.)

Tek işlem yer değiştirme algoritmasının komşuluk arama yordamları, Çizelge 4.8'de verileri verilen bir örnek üzerinde uygulanacaktır. İlk çözüm üzerinde tek işlem yer değiştirme ve takas TB algoritmalarının iterasyonları gerçekleştirilerek, Şekil 4.15 elde edilmiştir. Takas algoritması, Şekil 4.15'de verilen Gantt diyagramını elde ederek, bu sonucu tek işlem yer değiştirme algoritmasına sunmuş, tek işlem yer değiştirme algoritması da sunulan sonucu kabul etmiştir. Artık tek işlem yer değiştirme algoritması, Şekil 4.15'de verilen çözümde bir komşu çözüm arayacaktır. Algoritma 3'ün komşu çözümü nasıl belirlediği, bu Gantt diyagramı üzerinde anlatılacaktır.

Algoritma 3, öncelikle kritik yolu belirlemektedir. 1 ve 3 numaralı sipârişler gecikmektedir. 1 numaralı sipârişin kritik yolu 112-231; 3 numaralı sipârişin kritik yolu ise 352-362-361-112-231 işlemlerinden oluşmaktadır. Yayılma süresinin kritik yolu ise 3 numaralı sipârişle aynıdır. Geciken sipârişlerin ve yayılma süresinin kritik işlemleri toplanarak 352-362-361-112-231 kritik kümesi elde edilir. Algoritma 3'de yinelenen sipâriş-ürün-işlem üçlüleri, kritik kümeye eklenmemektedir.



Şekil 4.14 : Algoritma 3'ün etki analizi hesabı.

"Kritik kümedeki ilk işlem 352" seçilerek 352'nin oluşturabileceği alternatif komşu çözümler incelenmeye başlanacaktır. Öncelikle 352 numaralı işlemin atanabileceği lokasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Algoritma 3'de 352 numaralı işlemin öncülünün ve ardılının başlangıç zamanları arasına denk gelen lokasyonların atanabilir olduğu kabul edilmektedir. Tek istisnai durum, her makinadaki son lokasyonlardır. Eğer yeri değiştirilecek işlem, bir ürünün son işlemi ise, makinanın son sırasına atanabildiği kabul edilmektedir. Yâni 352 için 1. makinanın 3., 2. makinanın 6. ve 3. makinanın 6. sıraları, öncülü ve ardılına bakılmaksızın atanabilir lokasyonlardır. Öncelikle makina 1'de 352 numaralı işlemin atanabileceği

lokasyonlar belirlenmektedir. 352'nin öncülü 351'in başlangıç zamanı 26'dır. Makina 1'de bu değerden büyük atanabilecek lokasyon yoktur. Ancak istisnaî duruma göre 352, 1. makinada 3. sıraya atanabilir.

Çizelge 4.8 : Algoritma 3 ve 4'ün anlatımında kullanılan problemin verileri.

Hazırlık Süreleri Matrisi

	O11	O12	O21	O22	O31	O32	O41	O42	O51	O52	O61	O62
O11	0	1	6	1	3	4	3	1	1	4	5	8
O12	6	0	1	6	1	7	1	3	1	6	1	5
O21	7	5	0	7	3	7	5	4	4	4	4	5
O22	1	1	3	0	6	5	1	2	6	8	1	2
O31	4	5	4	3	0	6	6	3	2	8	2	7
O32	1	4	7	2	6	0	5	1	7	6	1	3
O41	6	8	4	5	3	7	0	5	5	6	7	4
O42	6	4	5	5	8	7	7	0	1	5	8	3
O51	2	4	1	1	3	2	3	2	0	4	1	6
O52	2	4	6	4	1	3	1	1	1	0	2	2
O61	3	8	1	1	4	3	3	8	3	5	0	8
O62	3	4	1	8	5	1	8	3	4	1	5	0

Teslim Tarihleri

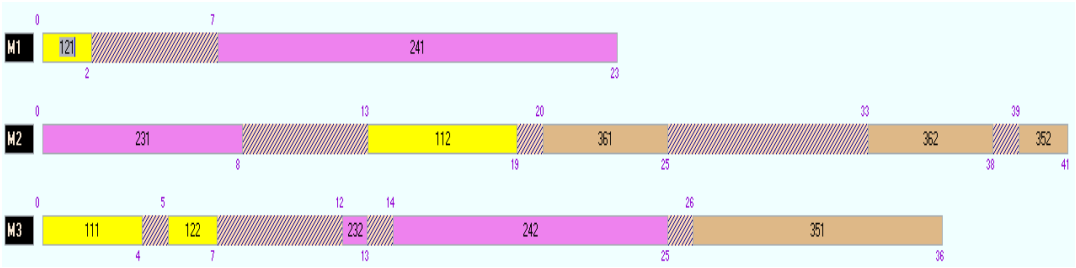
	Teslim
SIP1	17
SIP2	30
SIP3	21

Sipariş - Ürün Matrisi

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
SİP1	2	2	0	0	0	0
SİP2	0	0	1	4	0	0
SİP3	0	0	0	0	2	1

İşlem Süreleri Matrisi

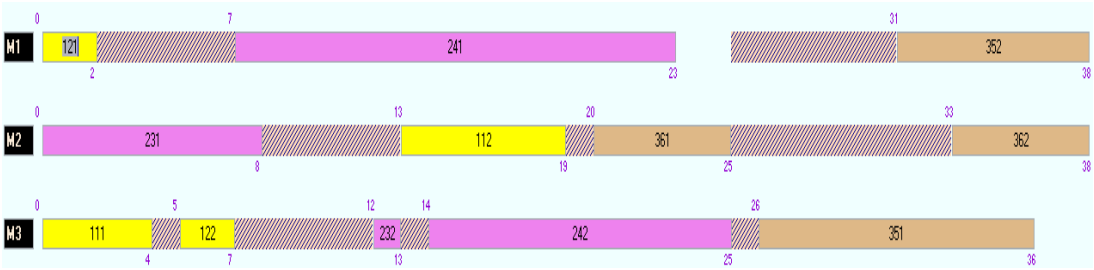
	O11	O12	O21	O22	O31	O32	O41	O42	O51	O52	O61	O62
M1	6	1	1	8	3	7	4	4	8	2	5	6
M2	7	3	4	4	8	6	5	3	6	1	5	5
M3	2	5	5	1	7	1	4	2	5	4	1	7



Şekil 4.15 : Tek işlem yer değiştirme algoritması Algoritma 3'ü çalıştırmadan önceki çözümü.

Etki analizi yapılırken, öncelikle 352 numaralı işlemin, bulunduğu lokasyondan kaldırılmasının bir sonraki işlemin tamamlanma zamanını nasıl etkilediği hesaplanmaktadır. Eğer makinada son işlem ise makina 2'nin tamamlanma zamanındaki değişim hesaplanmaktadır (41 – 38 = 3). Kaldırma etkisi, 3 olacaktır. 352 numaralı işlem, makina 1'e yüklendiğinde bir sonraki işlemin tamamlanma zamanındaki değişim, 352 son işlem olduğu için hesaplanamayacaktır. Bu nedenle 352'nin tamamlanma zamanı, yayılma süresi ile karşılaştırılarak, ekleme etkisi hesaplanacaktır. Şekil 4.15'de verilen Gantt diyagramında, yayılma süresinin 41 olduğu görülmektedir. Eğer 352'nin tamamlanma zamanı 41'i aşsaydı aşan değer hesaplanacaktı. Ancak Şekil 4.16'da 352'nin tamamlanma zamanının 38 olduğu

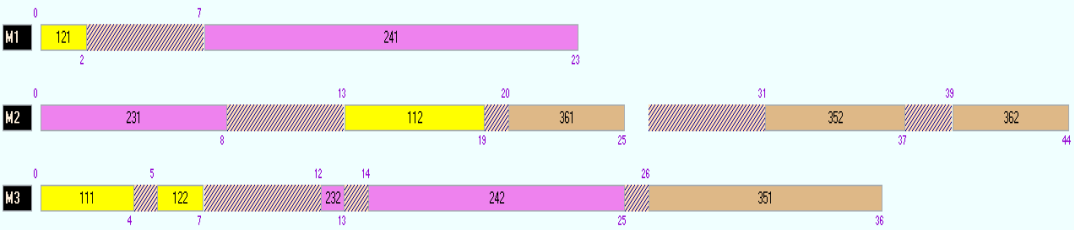
görülmüştür. 38, 41'den küçük olduğu için ekleme etkisi 0 kabul edilmiştir. 352 numaralı işlemin makina 1'de neden olduğu kaydırma etkisi dikkate alınarak, sipâriş teslim gecikmesi süresini arttırıcı etkinin oluşup oluşmadığının incelenmesi gerekmektedir. Ancak 352, 1. makinada en son işlem olduğu için salt 3. sipâriş incelenecektir. 352'nin yeni tamamlanma zamanı 38'dir. Bir önceki çözümde, 3. sipârişin teslim gecikmesi süresi ve tamamlanma zamanı sırasıyla 20 ve 41'dir. 352'nin yeni tamamlanma zamanı, teslim gecikmesi süresini arttırmadığı için gecikme etkisi, 0 kabul edilecektir.



Şekil 4.16 : 352 numaralı işlem 1. makinada 3. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

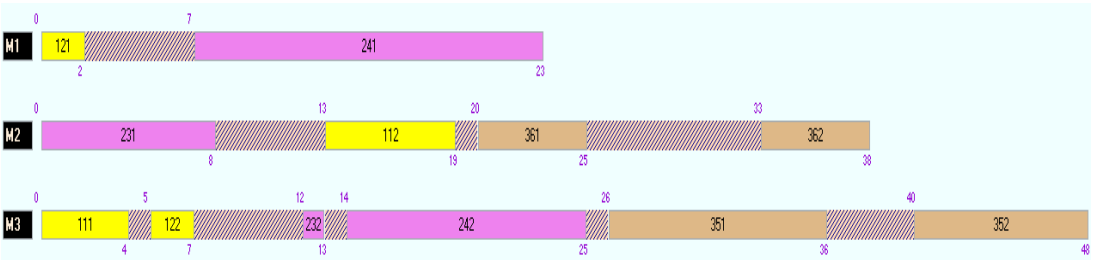
352 numaralı işlemin 1. makinada atanabileceği başka lokasyon kalmadığı için 2. makinaya geçilecektir. 352'nin öncülü 351'in başlangıç zamanı 26, 352'nin 2. makinada 1., 2. ve 3. lokasyonlara atanmasını engellemektedir (Aslında atama yapılabilir ancak bu lokasyonlara atanması, 2. makinadaki birçok işlemi sağa doğru kaydıracağı için uyum değerini olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle hesaplanması mantıklı değildir.) 2. makinada 4. sıra, atama yapılabilecek lokasyonlardandır. 5. ve 6. lokasyonlar ise 352 numaralı işlemin varolan konumunu değiştirmeyeceğinden incelenmeyecektir. 352 numaralı işlem, 2. makinada 4. sıraya yerleştirilirse Şekil 4.17'de görülen Gantt diyagramı elde edilecektir. Öncelikle 352 numaralı işlemin kaldırma etkisi incelenmektedir. Kaldırma etkisinin 3 olduğu 352 numaralı işlem, 1. makinada 3. sıraya atanırken hesaplanmıştı. 352 numaralı işlem, 2. makinada 4. sıraya yerleştirilirse 362, 352 numaralı işlemi izleyecektir. 362 numaralı işlem, daha önce 38. zaman biriminde tamamlanırken yer değişikliği sonucunda 44. zaman biriminde tamamlanacaktır. Ekleme etkisi (38-44 =) -6 olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da, gerek Algoritma 3'ün gerekse Algoritma 4'ün, örneğin 352 numaralı işlemin başlangıç zamanını tahmin ederken, 351 numaralı işlemin bir önceki çözümde olduğu gibi kalacağını düşünmekte olmasıdır. Bu örnekte 352'yi 351 ile paralel işlenecek gibi yerleştirerek, 362'nin tamamlanma zamanını hesaplamaktadır ve 44 değerini elde etmektedir. Ancak birinci makinadaki bir işlemin 3. makinadaki bir işlemi itmesi ve o işlemin de 2. makinadaki bir işlemi itmesi gibi karmaşık bir durumu hesaplamamaktadır. Salt Algoritma 3 veya 4'de,

seçilen işlemin, ardılını ne kadar kaydırdığı, seçilen işlemin öncülü nedeniyle ilgili makinada hangi birim zamanda başlayabileceği ve kaldırılan bir işlemin neden olacağı boşluğun kaç biriminin aynı makinada kaldırılan işlemi izleyen işlemlerce sola kayarak kapatılabileceği hesaplanabilmektedir. Bu şekilde kısa menzilli hesaplama yöntemi yeğlenmezse CPU işlem süreleri çok artacaktır. Ekleme etkisi hesaplandıktan sonra 2. makinaya yerleştirilen 352 numaralı işlemin ve aynı makinada sonraki işlemlerin kayma değerlerine bakılarak, sipâriş teslim gecikmelerindeki artış kontrol edilecektir. 352 ve sonrasında salt 3 numaralı sipâriş olduğu için 3 numaralı sipâriş incelenecektir. Makina 2'de tamamlanan 3. sipârişin en son işleminin tamamlanma zamanı 44 hesaplanmıştır. Bir önceki çözümde 3 numaralı sipârişin teslim gecikmesi süresi ve tamamlanma zamanı, sırasıyla 20 ve 41 idi. Teslim gecikmesi süresindeki artış (44-41 =) 3 birim hesaplanmaktadır. Eğer 2. makinada 352 numaralı işlemden sonra başka bir sipârişe ait işlem olsaydı, benzer hesaplama o sipâriş için de yapılacaktı.



Şekil 4.17 : 352 numaralı işlem 2. makinada 4. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

352 numaralı işlemin öncülü 3. makinada son sırada bulunduğu için, atanabileceği yer 3. makinada 6. sıradır yâni 351 numaralı işlemden sonradır. 352 numaralı işlemin kaldırma etkisi 3 olarak hesaplanmıştı. 352 numaralı işlem, 3. makinada 6. sıraya yerleştirildiğinde, yayılma süresi 41'den 48'e yükseleceği için -7 birim ekleme etkisi olacaktır. Aynı zamanda gecikme etkisi de -7 birim olacaktır (Şekil 4.18).

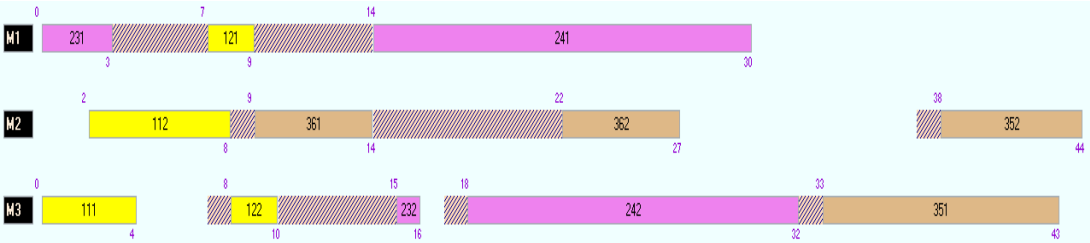


Şekil 4.18 : 352 numaralı işlem 3. makinada 6. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

352 numaralı kritik işlemin atanabileceği lokasyonlar için etki analizi tamamlandıktan sonra sıradaki kritik işleme geçilmektedir. 362, 361 ve 112 numaralı kritik işlemlerin etki analizleri, 352 numaralı kritik işlemde yapılan hesaplamalara benzemektedir. Bu

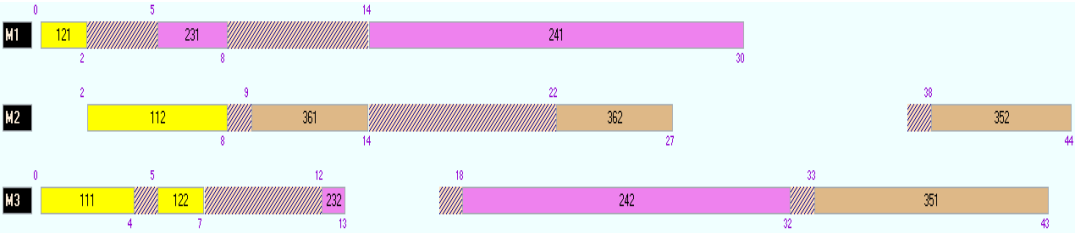
kritik işlemlerin ve tüm kritik işlemlerin etki değerleri, Çizelge 4.9'da ayrıntılı bir şekilde aktarılmaktadır. 231 numaralı kritik işlem için etki analizinin ayrıntılı bir şekilde anlatılması, Algoritma 3'ün anlaşılması için gereklidir. Çünkü 352 numaralı işlemin makinadaki en son iş olması nedeniyle bâzı kavramlar tam anlatılamamıştır.

231 numaralı kritik işlem, 1. makinada 1. ve 2. sıralara atanabilmektedir. 231 numaralı işlemin ardılı 232'nin başlangıç zamanı 12, makina 1'deki en son işlemin tamamlanma zamanı 23'den küçük olduğu için 231, 1. makinada 3. sıraya atanamaz (Eğer atanırsa 232 numaralı işlem sağa kayacaktır, uyum değerini olumsuz etkileyecektir). 231, 1. makinada 1. sıraya atanırsa Şekil 4.19'da görülen Gantt diyagramı elde edilmektedir. 231'i kaldırma etkisi, 112 numaralı işlemin tamamlanma zamanındaki değişime eşittir (19-8=11). 231'i ekleme etkisi, 121 numaralı işlemin tamamlanma zamanındaki değişime eşittir (2-9= -7). 1. makinada 231 numaralı işlem ve bu işlemi izleyen işlemler incelendiğinde, salt 1. ve 2. sipârişleri içeren işlemlerin bulunduğu görülmektedir. 1. sipârişin teslim gecikmesi süresi ve tamamlanma zamanı, bu değişiklik öncesinde 2 ve 19'dur. Değişiklik sonrası 121'in tamamlanma zamanı 9 olduğu için, 1 numaralı sipârişin gecikme artışı bulunmamaktadır. Bu nedenle 1. sipârişin gecikme etkisi 0 olacaktır. 2 numaralı sipârişin 1. makinada en geç tamamlanan işlemi 241'in tamamlanma zamanı 30'dur. Bu sipârişin teslim tarihi 30 olduğundan, teslim gecikmesi süresi artmamaktadır (241 numaralı işlemin, 242 numaralı işlemi ittirmesi kontrol edilmemektedir).



Şekil 4.19 : 231 numaralı işlem 1. makinada 1. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

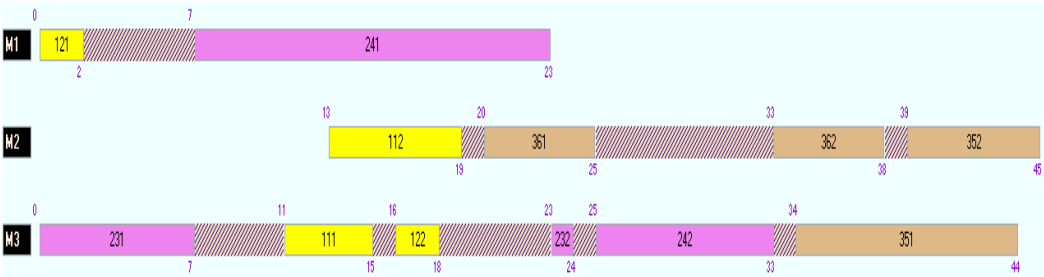
231 numaralı kritik işlemin 1. makinada 2. sıraya atanması durumunda kaldırma etkisi 11 olacaktır. Ekleme etkisi ise 1. makinada 231'den sonraki işlem 241'in tamamlanma zamanındaki değişime eşit olacaktır (23-30= -7). Gecikme etkisi hesabında salt 2 numaralı sipâriş incelenecektir. 1. makinada yer alan 231 ve 241 numaralı işlemlerin tamamlanma zamanı teslim tarihini aşmadığı için gecikme etkisi 0 olacaktır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : 231 numaralı işlem 1. makinada 2. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

231 numaralı kritik işlemin ardılı 232'nin başlangıç zamanı 12, 112 numaralı işlemin başlangıç zamanından küçük olduğu için, 2 numaralı makinada yükleme yapılabilecek yerleşim (lokasyon) yoktur.

231 numaralı kritik işlem, 3. makinada 1, 2 ve 3. sıralara atanabilmektedir (232 numaralı işlemden önceki yerler). Eğer 231 numaralı işlem, 3. makinada 1. sıraya atanırsa, kaldırma etkisi 11 olacaktır (Şekil 4.21). 3. makinaya yüklenen 231 numaralı işlemi izleyen 111 numaralı işlemin tamamlanma zamanı 11 birim arttığı için ekleme etkisi (4-15=) -11 olacaktır. Gecikme etkisi hesabına konu olacak 3 sipâriş vardır. Makina 3'de en son tamamlanan 1. sipârişin işlemi 122'dir ve tamamlanma zamanı 18'dir. 1. sipârişin bu değişiklik öncesi tamamlanma zamanı 19 olduğu için, teslim gecikmesi süresi artmamıştır. 1. sipârişin gecikme etkisi sıfırdır. 2. sipârişin 3. makinada en son tamamlanan işlemi 242'nin tamamlanma zamanı 33'dür ve 2. sipârişin teslim gecikmesi süresi, bir önceki çözüme göre 3 birim artmıştır. Bu nedenle 2. sipârişin gecikme etkisi -3'dür. 3. sipârişin 3. makinada en son tamamlanan işlemi 351'in tamamlanma zamanı 44'dür. Bir önceki çözüme göre 3. sipârişin teslim gecikmesi süresi 3 birim arttığından 3. sipârişin gecikme etkisi -3 olacaktır. 231 numaralı işlemin 3. makinada 2. ve 3. sıralara atanması durumunda etki analizleri, yukarıda anlatılan örneklerde olduğu gibi gerçekleştirilerek, toplam etki değerleri hesaplanmıştır. Etki değerlerinin özeti, Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.21 : 231 numaralı işlem 3. makinada 1. sıraya atandığında Gantt diyagramı.

Çizelge 4.9 : Tek işlem yer değiştirme algoritmasının komşu çözümleri değerlendirme sonuçları.

Sipariş-Ürün-İşlem	Atandığı Makina	Sıra No	Kaldırma Etkisi	Ekleme Etkisi	Teslim Gecikmesi Etkisi	Toplam Etki
352	1	3	3	0	(0;0;0)	3
352	2	4	3	-6	(0;0;-3)	-6
352	3	6	3	-7	(0;0;-7)	-11
362	1	3	4	0	(0;0;0)	4
362	2	6	4	-3	(0;0;-3)	-2
362	3	5	4	-13	(0;0;-8)	-17
362	3	6	4	-8	(0;0;-8)	-12
361	1	1	9	-6	(0;0;0)	3
361	1	2	9	-7	(0;0;0)	2
361	1	3	9	0	(0;0;0)	9
361	2	1	9	-9	(-9;0;0)	-9
361	2	2	9	-10	(-10;0;-1)	-12
361	3	1	9	-4	(0;0;0)	5
361	3	2	9	-6	(0;0;0)	3
361	3	3	9	0	(0;0;0)	9
361	3	4	9	-6	(0;-1;-1)	1
361	3	5	9	-11	(0;0;-6)	-8
112	1	2	10	-3	(0;0;0)	7
112	1	3	10	0	(-14;0;0)	-4
112	2	4	10	-11	(-10;0;-1)	-12
112	2	5	10	-15	(-19;0;-5)	-29
112	2	6	10	-6	(-28;0;0)	-24
112	3	2	10	-16	(-4;-8;-8)	-26
112	3	3	10	-13	(0;-5;-5)	-13
112	3	4	10	-13	(-8;-8;-8)	-27
112	3	5	10	-14	(-20;0;-9)	-33
112	3	6	10	-9	(-31;0;0)	-30
231	1	1	11	-7	(0;0;0)	4
231	1	2	11	-7	(0;0;0)	4
231	3	1	11	-11	(0;-3;-3)	-6
231	3	2	11	-12	(0;-4;-4)	-9
231	3	3	11	-14	(0;-6;-6)	-15

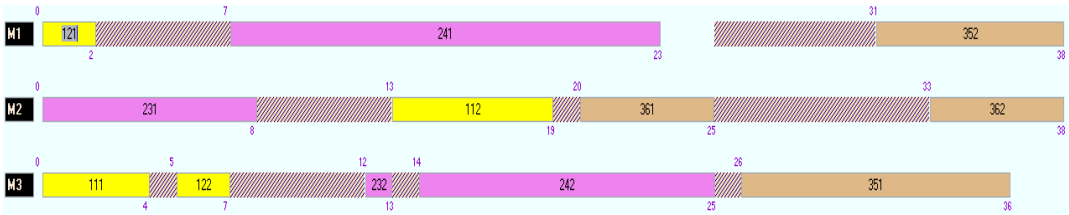
Her bir kritik işlemin atanacağı lokasyonun neden olacağı toplam etki; kaldırma etkisi, ekleme etkisi ve toplam teslim gecikmesi etkisi toplanarak elde edilmektedir. Örneğin 361 numaralı kritik işlemin 3. makinada 4. sıraya atanması halinde 9, -6, 0, -1 ve -1 toplanarak toplam etki değeri olarak 1 elde edilmektedir.

Algoritma 3, her bir kritik işlem için en iyi etki değerli atanabilecek lokasyonun belirlenmesini talep etmektedir. Çizelge 4.10'da her bir kritik işlem için en iyi etki değerli lokasyonlar listelenmiştir. Problemin boyutu küçük olduğu için 5 kritik işlem vardır. Büyük problemlerde 100'ü bulan kritik işlemlerle çalışılabilmektedir. Algoritma 3, en iyi 5 kritik işlemden birini rassal seçmektedir ve seçilen işlemi, en olumlu etki değerli lokasyona atamaktadır. Burada toplam 5 işlem olduğu için herhangi birini seçecektir. Rassal seçim sonucunda 352 numaralı kritik işlem seçilmiştir. 352 numaralı kritik işlem, 1. makinada 3. sıraya atanacaktır.

Çizelge 4.10 : Çizelge 4.9'da verilen tablonun kritik işlemlere göre gruplanmış hali.

Sipariş-Ürün-İşlem	Atandığı Makina	Sıra No	Kaldırma Etkisi	Ekleme Etkisi	Teslim Gecikmesi Etkisi	
361	1	3	9	0	(0;0;0)	9
112	1	2	10	-3	(0;0;0)	7
231	1	1	11	-7	(0;0;0)	4
362	1	3	4	0	(0;0;0)	4
352	1	3	3	0	(0;0;0)	3

Yapılan atama sonucunda uyum değeri 31,5'dan 28,5'a düşürülmüştür. Çizelge 4.10 dikkatle incelendiğinde tek işlem yer değiştirme TB algoritması, tüm kritik işlemlerde 1 numaralı makinaya yükleme yapılmasını yeğlemektedir. Bu sonuç, tek işlem yer değiştirme algoritmasının makina yüklerini dengelemeye çalıştığını doğrulamaktadır. Aynı zamanda hazırlık süreleri ve işlem süreleri toplamını da azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak tek işlem yer değiştirme algoritmasını tamamlayacak olan, iki işlemin yer değiştirmesidir. Yâni Şekil 4.22'de elde edilen Gantt diyagramında, birbiriyle benzer hazırlık süreleri ve işlem sürelerine sahip işlemlerin takas edilerek çözümün yavaş ancak sürekli geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla takas TB algoritması kullanılmaktadır. Bir sonraki kısımda, takas TB algoritmasının komşu çözüm belirlemede kullandığı Algoritma 4 aktarılacaktır.



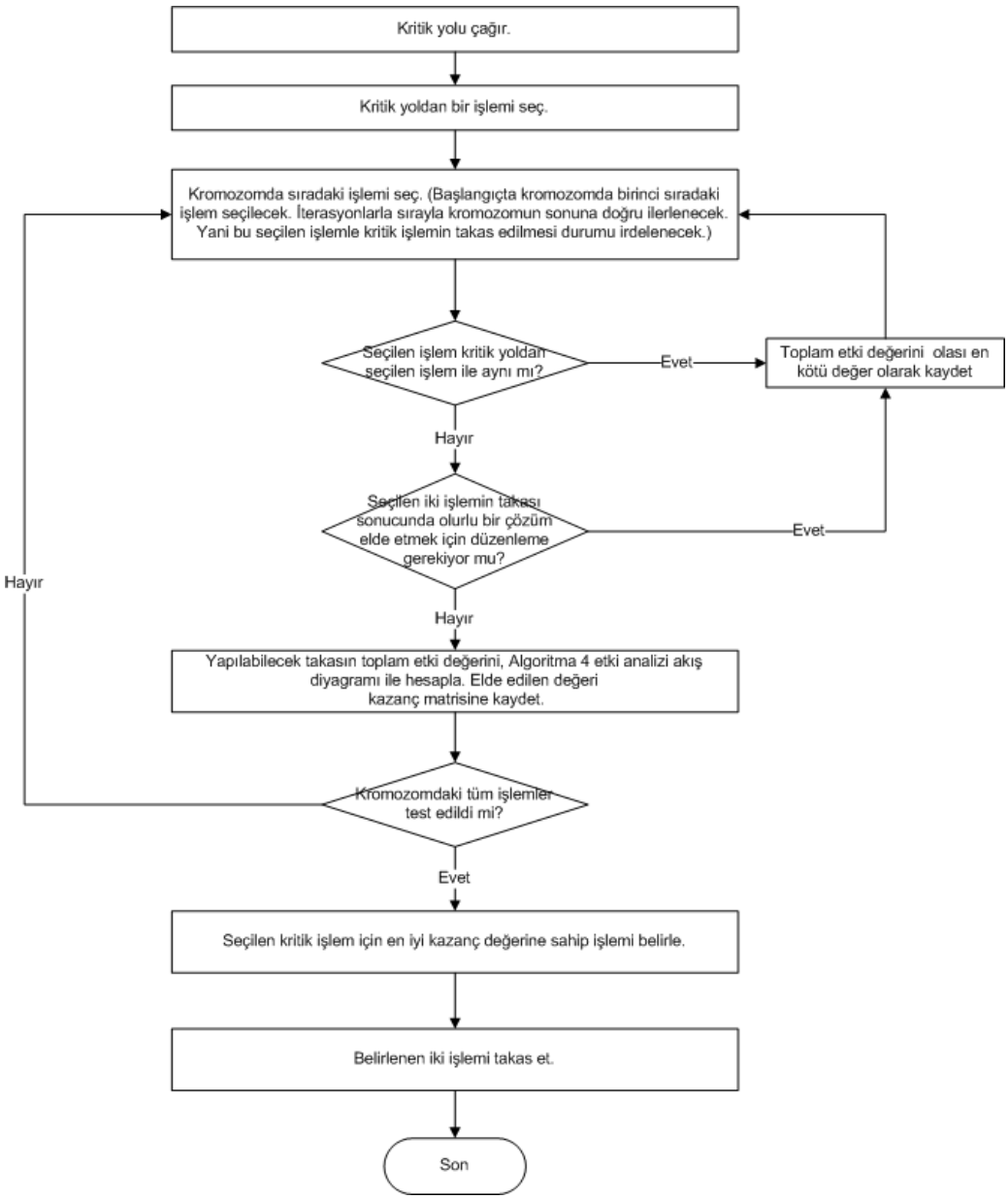
Şekil 4.22 : Algoritma 3'ün belirlediği komşu çözüm.

4.2.3.5 Algoritma 4

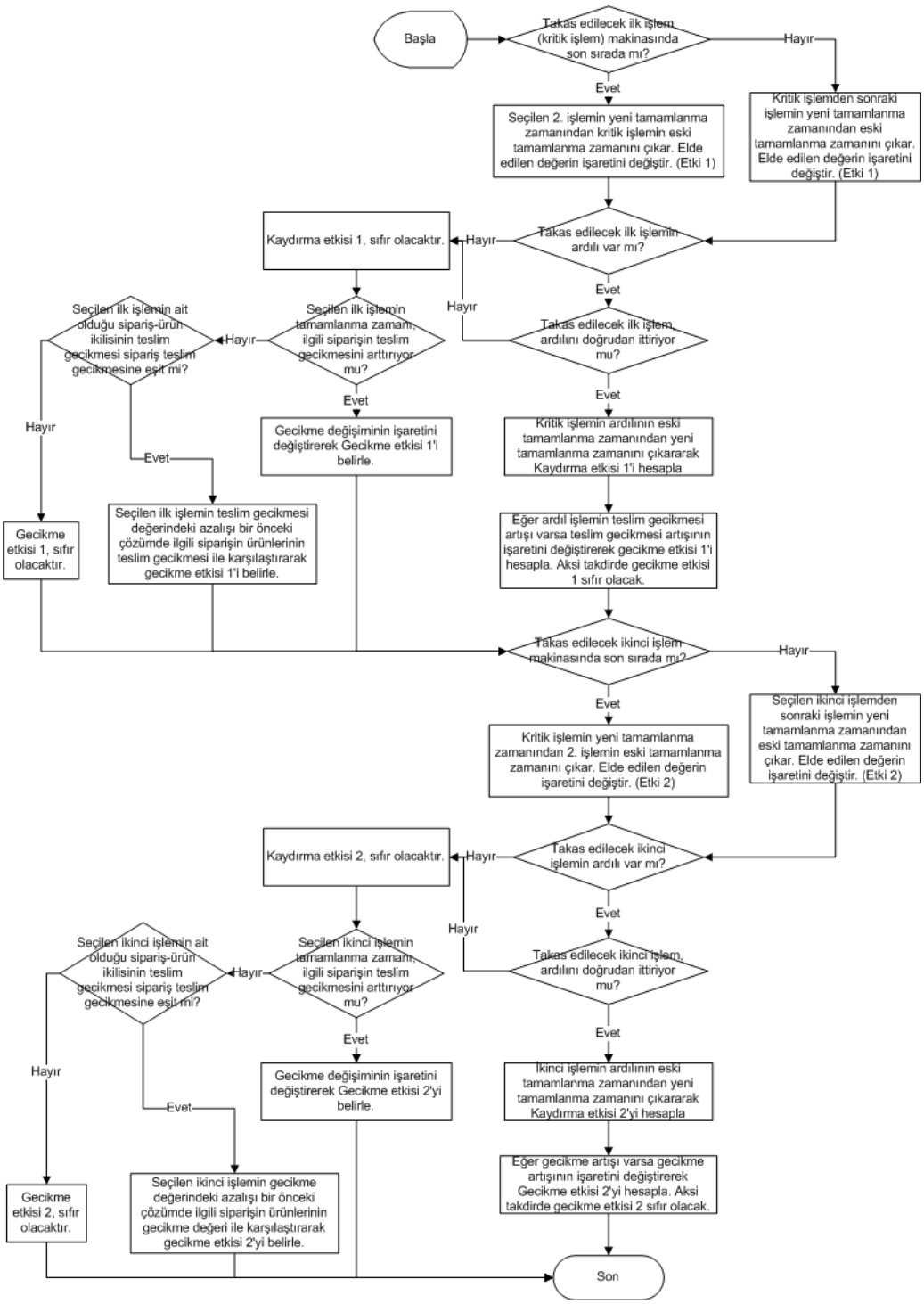
Takas algoritması, Algoritma 4 ile komşu çözümleri değerlendirerek en iyi alternatifi belirlemektedir ve takası gerçekleştirmektedir. Takas algoritmasında Algoritma 4, (Şekil 4.23) öncelikle kritik yolu belirlemektedir. Kritik yoldan bir işlem rassal seçilmektedir. Kritik yol kümesinde aynı işlemin yinelenmesi, o işlemin seçilme olasılığını arttırmaktadır. Seçilen kritik işlemin, temsilde (kromozom) yer alan diğer işlemlerle yapabileceği takaslar, Şekil 4.24'de akış diyagramı verilen etki analizi ile değerlendirilmektedir. Algoritma 4 ile komşu çözüm oluşturulurken, takas edilen her iki işlem için aşağıdaki değerlerin toplamının arttırılması amaçlanmaktadır:

- Takas edilen işlemlerin aynı makinadaki bir sonraki işlemlerinin tamamlanma zamanındaki azalma.

- Yeri değiştirilen işlem nedeniyle o işlemin ait olduğu sipârişin teslim gecikmesi süresinin azalması.
- Salt takas edilen işlemi dikkate alarak takas edilen işlemin ardılının Gantt diyagramında sağa kayma miktarının azalması.



Şekil 4.23 : Algoritma 4'ün akış diyagramı.



Şekil 4.24 : Algoritma 4'ün etki analizinin akış diyagramı.

Algoritma 4, etki analizini gerçekleştirirken bir önceki çözümün verilerini kullanmaktadır. Bu veriler içerisinde bir işlemin, seçilecek bir makinada en erken başlayabileceği zaman ve en geç başlayabileceği zaman en önemlileridir. Örneğin Şekil 4.15'de verilen çözümde 231 numaralı işlem 1. makinaya yüklenerek Şekil

4.19 elde edilmiştir. 231'in ardılının ve 231'in başlangıç zamanlarının ne olacağı, Gantt diyagramındaki diğer işlemlerin sabit kaldığı kabul edilerek hesaplanmaktadır. Ayrıca 231 numaralı işlemin 1. makinaya yüklenmesi, aynı makinadaki sonraki işlemleri (örneğin 241 numaralı işlem) ne kadar sağa kaydıracağı da hesaplanabilmektedir. Ancak 231 numaralı işlemin 242'yi; 242'nin 351'i; 351'in de 352'yi ne kadar kaydıracağı (ittireceği) dikkate alınmamaktadır. Domino etkisini tümüyle dikkate alabilecek bir algoritma yerine bu tür kısa menzilli hesaplamalar yapılması, CPU işlem sürelerini kabul edilebilir düzeylere çekmektedir. Zâten esas amaçlanan da, takas edilen işlemlerin olabildiğince aynı makinadaki bir önceki işlem ve sonraki işlemle olan hazırlık sürelerini ve boşluklarını düşürmek, işlemleri en hızlı makinalara yüklemek ve rassallığı korumaktır.

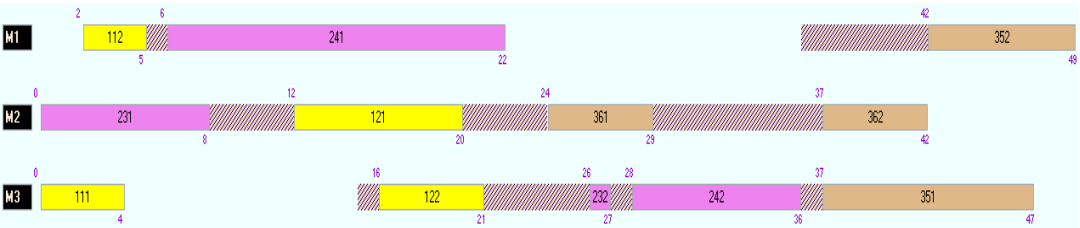
Algoritma 4'ün nasıl çalıştığını anlatmak için, Şekil 4.22'de tek işlem yer değiştirme algoritmasının ürettiği çözüm kullanılacaktır. Öncelikle Şekil 4.22'de görülen Gantt diyagramında kritik yol belirlenecektir. 1. sipârişin kritik yolu 112-231; 3. sipârişin kritik yolu 352, 351, 242, 232, 122 ve 111; yayılma süresini veren kritik yol ise 362, 361, 112 ve 231'dir. Gerek yayılma süresinin gerekse 3. sipârişin 2 farklı kritik yol alternatifi sözkonusudur. Ancak algoritma, hangi kritik yolu seçeceğine rassal karar vermektedir. 1. ve 3. sipâriş ile yayılma süresinin kritik yolları birleştirilerek 112, 231, 352, 351, 242, 232, 122, 111, 362, 361, 112 ve 231 kritik işlemler kümesi oluşturulmaktadır. 112 ve 231, kritik kümede 2 kez yinelenmektedir. Tek işlem yer değiştirme algoritmasında kritik kümede iki kez yinelemeye izin verilmez iken takas algoritmasında birden fazla yinelenebilmektedir. Tek işlem yer değiştirme algoritması, her bir kritik işlemin etki analizini yaptığı için bir işlemin 2 kez yinelenmesinin bir anlamı yoktur. Ancak takas algoritmasında varolan kritik yol kümesinden bir işlem rassal seçilmektedir ve o seçilen kritik işlemin diğer işlemlerle olan takaslarının etkisi hesaplanmaktadır. Kritik yol kümesinde bir işlemin yinelenmesi, o işlemin seçilme olasılığını arttırmaktadır. Böylece uyum değerini daha çabuk azaltabilecek kritik işlemlerin seçilme olasılığı güçlenmektedir. Takas TB algoritması, kritik işlemler kümesindeki 12 seçenek arasında 112 işlemini rassal seçmiştir (112, 2 kez yinelenmiştir). 112 kritik işleminin, diğer işlemlerle olan takaslarının etki analizi gerçekleştirilecektir.

112 numaralı kritik işlemin, 121 numaralı işlemle (Çizelge 4.11'de verilen kromozomda ilk sıradaki işlem) olan takasının etki analizinde ilk olarak 112'nin yerine 121 yerleştirildiğinde, 361 numaralı işlemin tamamlanma zamanının nasıl değiştiği hesaplanacaktır (Şekil 4.25). 361'in yeni tamamlanma zamanı 29 olacaktır. Bir önceki çözümde tamamlanma zamanı 25 olduğu için etki 1, (25 – 29 =) -4

şeklinde hesaplanmaktadır. 121'in yerine 112 geldiğinde 241'in tamamlanma zamanı 1 azalacağından etki 2, 1 olacaktır. Kaydırma etkisi 1'de ise kritik işlemde oluşan kayma nedeniyle kritik işlemin ardılının kaç birim kayacağı hesaplanmaktadır. İncelenen örnekte, 112 numaralı kritik işlemin ardılı olmadığı için kaydırma etkisi 1, 0 olacaktır. Kaydırma etkisi 2'de ise seçilen 2. işlemin hareketi nedeniyle ardılının kaç birim kayacağı hesaplanmaktadır. 121 numaralı işlem nedeniyle 122, 7. yerine 21. birim zamanda tamamlanacaktır. Bu nedenle kaydırma etkisi 2, (7-21=) -14 olacaktır.

Çizelge 4.11 : Şekil 4.22'de elde edilen çözümün temsili (kromozomu).

Sipariş-Ürün-İşlem	121	111	122	231	112	232	241	242	351	352	361	362
Sipariş-Ürün	**12**	**11**	**12**	**23**	**11**	**23**	**24**	**24**	**35**	**35**	**36**	**36**
Makina Numarası	**1**	**3**	**3**	**2**	**2**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2**	**2**

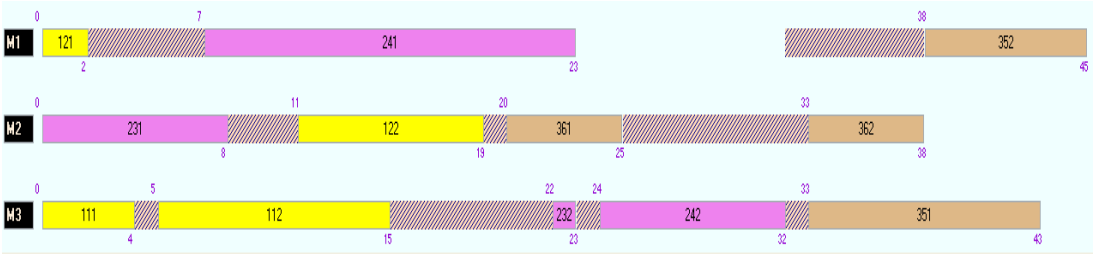


Şekil 4.25 : 112-121 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

Gecikme etkisi 1 ve 2, seçilen işlemlerin ait olduğu "sipârişin ürününün" tamamlanma zamanındaki değişim dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Eğer son işlem ise, yâni ardılı yoksa salt ilgili işlemin tamamlanma zamanı dikkate alınarak teslim gecikmesi süresinin nasıl değiştiği irdelenir. Aksi durumda salt seçilen işlemin, ardılını itmesi nedeniyle, son işlemin tamamlanma zamanındaki artış hesaplanarak teslim gecikmesi süresindeki artış belirlenmektedir. Gecikme etkisi 1 hesaplanır iken, kritik işlem 112'nin son işlem olup olmadığı kontrol edilmektedir. Son işlem olduğu için 112'nin yeni tamamlanma zamanı hesaplanmaktadır. Eski tamamlanma zamanı 19 iken yeni tamamlanma zamanı 5 olduğu için gecikme değeri 2 azalmıştır. Gecikme etkisi 1, 2 olacaktır. Eğer 1. sipârişte farklı bir ürün de gecikseydi gecikme etkisi 1, 2 olmayacaktı. Aynı sipârişte geciken diğer ürünün gecikme değerinin altına inilemeyeceği kabul edilecekti. Örneğin 1. sipârişin 2. ürünü 1 birim gecikseydi, gecikme etkisi 1, 2 yerine 1 olacaktı. Gecikme etkisi 2 hesaplanırken, 2. seçilen işlemin yani 121'in en son işlem olup olmadığı kontrol edilmektedir. 121 son işlem olmadığı için, ardılı 122'yi doğrudan ittirip ittirmediği kontrol edilmektedir. İttirdiği için 122'nin yeni tamamlanma zamanı 21 olarak hesaplanmaktadır. Gecikme değeri, 2 artacaktır. Bu nedenle gecikme etkisi 2, -2 olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken

en önemli nokta, gecikme etkisi 1 ve 2 aynı sipârişin gecikme değerlerini ayrı ayrı hesaplamıştır. İlk durumda azalma, ikinci durumda artma sözkonusudur. Aslında 2. durumda yaşanan artma ilk durumu gölgeleyeceğinden, ilk durumun ihmâl edilmesi gerekmektedir. Ancak bu tür bir hesaplama, artan CPU işlem sürelerine neden olduğundan, iki yer değişikliği ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Ayrıca sipârişin diğer ürününün teslim gecikmesi süresinin azaltılması, ilerleyen yinelemelerde yeni fırsatlar yaratabileceğinden, bu tür bir hesaplamanın zararı olmayacaktır.

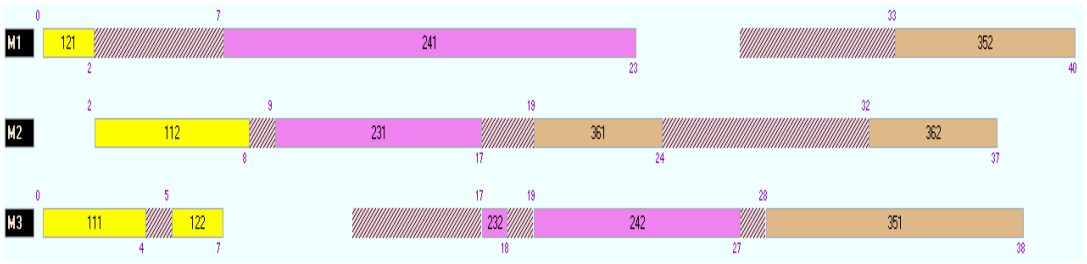
112 numaralı işlem, ardılı olan 111 ile bir takas gerçekleştiremeyeceğinden, toplam etki, olası en olumsuz değer olan -10.000 girilerek, seçilmemesi garanti altına alınmaktadır. 112, kromozomda sıradaki işlem 122 ile takas gerçekleştirirse 2. makinada 112'den sonraki işlem 361'in tamamlanma zamanı değişmeyeceğinden etki 1, 0'a eşittir (Şekil 4.26). Etki 2 ise 3. makinada 122'den sonraki işlem 232'nin tamamlanma zamanı, 13'den 23'e yükseldiği için -10 olacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 1, 0 olacaktır. 122, 2. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 2, 0 olacaktır. Gecikme etkisi 1, 112 işleminin tamamlanma zamanı 19'dan 15'e düştüğü için 2 olacaktır. Gecikme etkisi 2, 122 numaralı işlemin tamamlanma zamanı, 1. sipârişin eski tamamlanma zamanını aşmadığı için 0 olacaktır.



Şekil 4.26 : 112-122 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

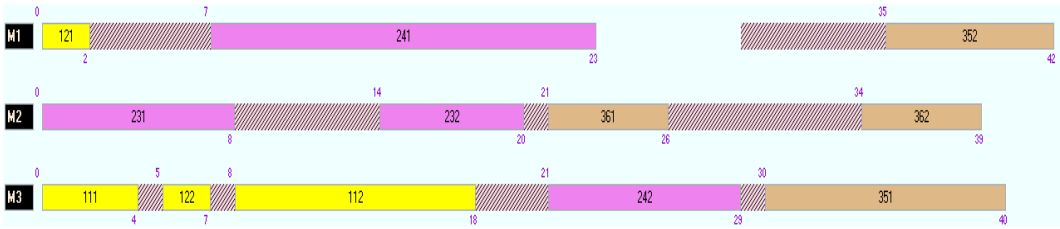
112 numaralı işlemin, kromozomda sıradaki işlem 231 ile takası, yukarıda anlatılan örneklerden biraz daha farklıdır. Bu iki işlem aynı makinada ardışık dizildikleri için, etki 1 ve etki 2 ayrı ayrı hesaplanamayacaktır (2. makinada 231 ve onu izleyen 112 takas edilmektedir. 231'i referans kabul eden bir etki analizi yapılamayacağından, etki 1 ve 2 yerine etki 1+2 hesaplanacaktır). Bunun yerine bu iki işlemin takası sonucu 112 ve 231'i izleyen 361'in kaç birim kaydığı hesaplanacaktır (Şekil 4.27). 361'in tamamlanma zamanı, 25'den 24'e düştüğü için etki 1+2, 1 olacaktır. Kaydırma etkisi 1, sıfır olacaktır. 231'in ardılı 232'nin tamamlanma zamanı 13'den 18'e yükseldiği için kaydırma etkisi 2, -5 olarak hesaplanacaktır. 112'nin tamamlanma zamanı 19'dan 8'e düştüğü gecikme etkisi 1, 2 hesaplanacaktır. 231'in

ardılı 232'yi ittirmektedir. 232'nin tamamlanma zamanı teslim tarihini aşmadığı için gecikme etkisi 2, 0 olacaktır.



Şekil 4.27 : 112-231 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

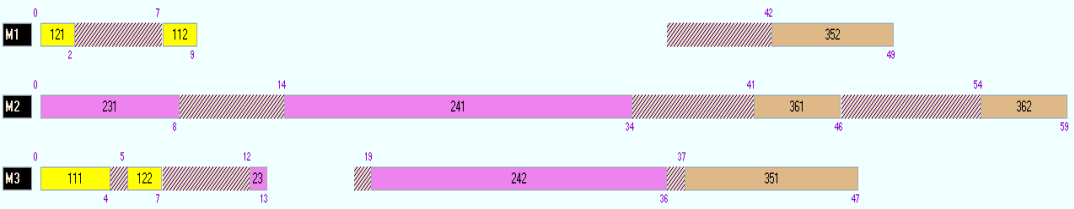
112, kromozomda sıradaki işlem 232 ile takas gerçekleştirirse 2. makinada 112'den sonraki işlem 361'in tamamlanma zamanı 1 birim artacağından etki 1, -1'e eşittir (Şekil 4.28). Etki 2 ise 3. makinada 232'den sonraki işlem 242'nin tamamlanma zamanı 25'den 29'a yükseldiği için -4 olacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 1, 0 olacaktır. 232, 3. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 2, 0 olacaktır. Gecikme etkisi 1, 112 işleminin tamamlanma zamanı 19'dan 18'e düştüğü için 1 olacaktır. Gecikme etkisi 2, 232 numaralı işlemin tamamlanma zamanı, 2. sipârişin teslim tarihini aşmadığı için 0 olacaktır.



Şekil 4.28 : 112-232 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

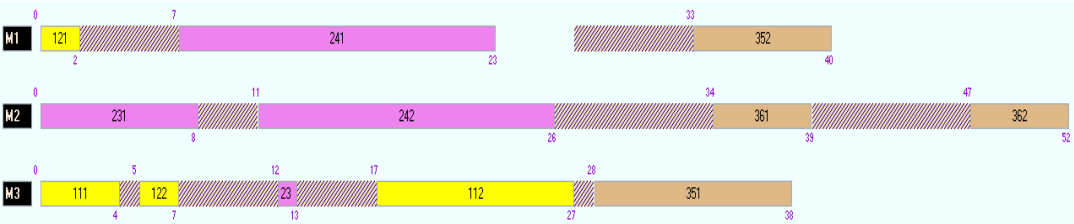
112, kromozomda sıradaki işlem 241 ile takas gerçekleştirirse, 2. makinada 112'den sonraki işlem 361'in tamamlanma zamanı (46-25=) 21 birim artacağından etki 1, -21 olacaktır (Şekil 4.29). Etki 2 ise, 1. makinada 241'den sonraki işlem 352'nin tamamlanma zamanı değişmeyeceğinden 0 olacaktır. Şekil 4.29'da 112 ve 241 numaralı işlemlerin yer değişikliği sonucunda 352 numaralı işlemin, 351 numaralı işlemin sağa kayması nedeniyle sağa ötelendiği görülmektedir. 241 242'yi, 242 351'i ve 351'de 352'yi ötelemektedir. Yâni domino etkisine benzer bir etkileşme sözkonusudur. Ancak Algoritma 4, bu zincirleme ötelemeleri, artan hesap yükü nedeniyle hesaplamamaktadır. Tek başına 112 numaralı işlemin takası, 351 ve 352 numaralı işlemlerin tamamlanma zamanını sağa öteleyemeyeceğinden, Algoritma 4, 352'nin tamamlanma zamanının değişmediğini düşünecektir. Bu nedenle etki 2, 0 olarak hesaplanacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için, kaydırma etkisi 1 0'a

eşit olacaktır. 241, ardılı 242 işlemini 11 birim kaydırdığı için kaydırma etkisi 2, -11 olacaktır. Gecikme etkisi 1, 112 işleminin tamamlanma zamanı 19'dan 9'a düştüğü için 2 olacaktır. 241 numaralı işlemin neden olduğu kaydırma etkisi, 2. sipârişi 6 birim geciktirmiştir. Gecikme etkisi 2, -6 olacaktır.



Şekil 4.29 : 112-241 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

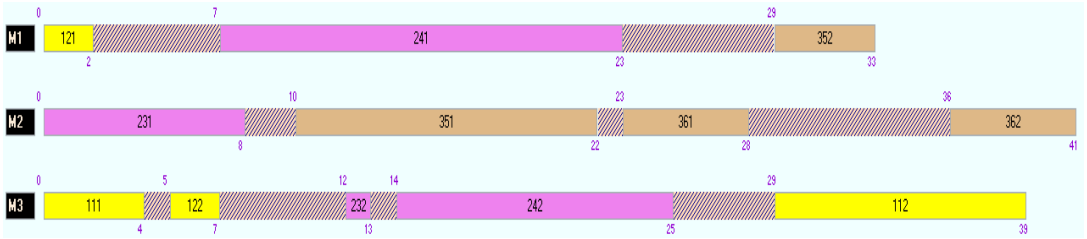
112, kromozomda sıradaki işlem 242 ile takas gerçekleştirirse 2. makinadaki 112'den sonraki işlem 361'in tamamlanma zamanı 14 birim artacağından etki 1, -14'e eşittir (Şekil 4.30). Etki 2 ise 3. makinada 242'den sonraki işlem 351'in tamamlanma zamanı 36'dan 38'e yükseldiği için -2 olacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 1, 0'a eşit olacaktır. 242, 4. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 2, 0 olacaktır. 112'nin tamamlanma zamanı, 19'dan 27'ye yükseldiği için gecikme etkisi 1, -8 olacaktır. Gecikme etkisi 2, 242 numaralı işlemin tamamlanma zamanı 2. sipârişin teslim tarihini aşmadığı için 0 olacaktır.



Şekil 4.30 : 112-242 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

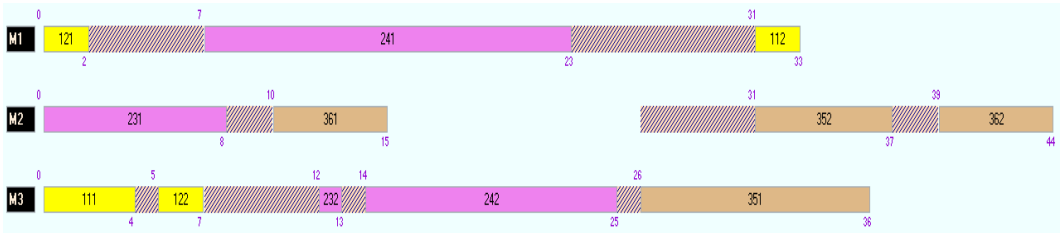
112, kromozomda sıradaki işlem 351 ile takas gerçekleştirirse 2. makinadaki 112'den sonraki işlem 361'in tamamlanma zamanı 3 birim artacağından etki 1, -3'e eşittir (Şekil 4.31). Etki 2 ise 351'in arkasında başka işlem olmadığı için önceki durumlardan farklı bir şekilde hesaplanacaktır. Takas sonrası 112'nin tamamlanma zamanı 39 olacaktır. Takas öncesi 351'in tamamlanma zamanı 36 olduğu için etki 2, (36-39=) -3 olacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için, kaydırma etkisi 1, 0'a eşit olacaktır. 351, ardılı 352'yi kaydırmadığı için kaydırma etkisi 2, 0 olacaktır. 112'nin tamamlanma zamanı 19'dan 39'a yükseldiği için gecikme etkisi 1, -20 olacaktır. Gecikme etkisi 2, 351 352'yi doğrudan ittirmediği ve 3. sipârişin 6.

ürününün teslim gecikmesi süreside 3. sipârişin 5. ürünü ile aynı olduğu için 0 olacaktır.



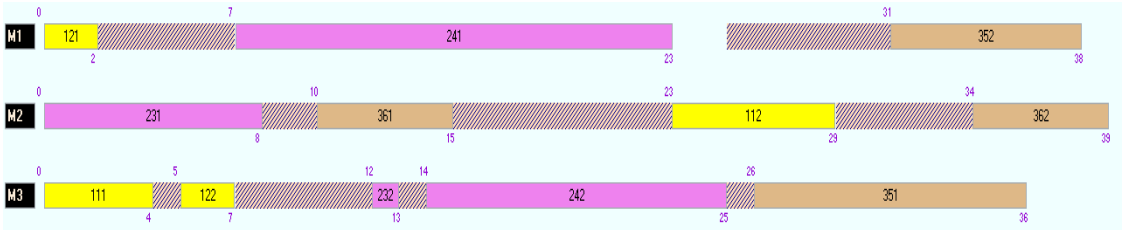
Şekil 4.31 : 112-351 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

112-352 takasının gerçekleştirilmesi durumunda, 352 numaralı işlem, kromozom gösterimi nedeniyle 112'nin lokasyonuna taşınamayacaktır. 361, 112 numaralı işlemin yerine geçecektir. 352, öncülü 351 ile paralel işlenecek şekilde sola kaydırılacaktır. Bu yapıda birden fazla takas sözkonusu olduğu için, etki değeri toplamı, olası en olumsuz değer olan -10.000 olarak belirlenmektedir (Şekil 4.32). Böylece bu takas engellenmektedir.



Şekil 4.32 : 112-352 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

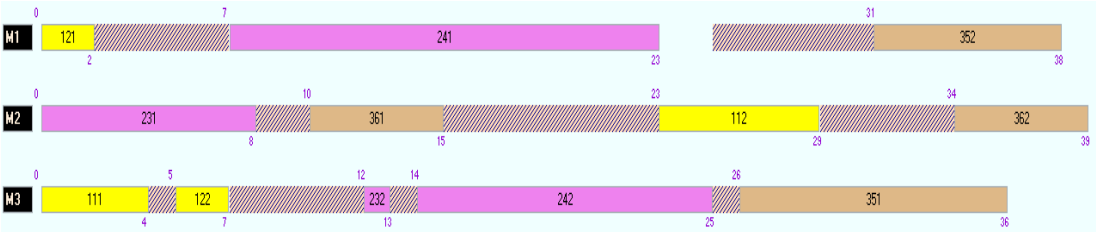
Aynı şekilde 112-362 takası da 362 numaralı işlemin, 362'nin öncülü 361'in önüne getirilemeyeceği için gerçekleştirilemeyecektir (Şekil 4.33). Bu takasın etki değeri toplamına -10.000 girilecektir.



Şekil 4.33 : 112-362 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

112 ve 361, aynı makinada ardışık iki işlem olduğu için 112-231 takasındaki gibi etki 1 ve 2 yerine etki1+2 hesaplanacaktır (Şekil 4.34). 362'nin tamamlanma zamanı 1 birim arttığı için etki 1+2, -1 olacaktır. 112, 1. ürünün son işlemi olduğu için kaydırma etkisi 1, 0 olacaktır. Kaydırma etkisi 2, 361 ve 362 aynı makinada yer aldığı için 0

olacaktır. 112 numaralı işlemin tamamlanma zamanı 19'dan 29'a yükseldiği için gecikme etkisi 1, -10 olacaktır. Gecikme etkisi 2 ise 3. sipârişin 6 ürünü, 3. sipârişin gecikme değerinin doğrudan artmasına neden olmadığından 0 olacaktır.



Şekil 4.34 : 112-361 işlemlerinin takası sonucunda elde edilen Gantt diyagramı.

Tek işlem yer değiştirme algoritmasının oluşturduğu çözümde Algoritma 4 kullanılarak komşu çözümlerin, uyum değerine etkileri belirlenmiştir (Çizelge 4.12). En yüksek toplam etki değerine sahip takas gerçekleştirilmektedir. Toplam etki değeri -2 olan 112-231 takası gerçekleştirilecektir (Şekil 4.27). 112-231 takasıyla elde edilen çözümün uyum değeri kabul edilen en son çözümle kıyaslanarak ya kabul edilecek ya da reddedilecektir. Kabul edilirse, Şekil 4.27'de verilen çözüm kullanılarak Algoritma 4 ile yeni bir komşu çözüm aranacaktır. Aksi durumda, Şekil 4.22'de verilen bir önceki çözümde Algoritma 4 ile yeni bir komşu çözüm aranacaktır.

Çizelge 4.12 : Algoritma 4 ile sınanan komşu çözümlerin etki değerleri raporu.

Takas Edilen İşlemler	Etki 1	Etki 2	Kaydırma Etkisi 1	Kaydırma Etkisi 2	Gecikmesi Etkisi 1	Gecikmesi Etkisi 2	Toplam Etki
112-121	-4	1	0	-14	2	-2	-17
112-122	0	-10	0	0	2	0	-8
112-231	1		0	-5	2	0	-2
112-232	-1	-4	0	0	1	0	-4
112-241	-21	0	0	-11	2	-6	-36
112-242	-14	-2	0	0	-8	0	-24
112-351	-3	-3	0	0	-20	0	-26
112-352	-	-	-	-	-	-	-10000
112-361	-1		0	0	-10	0	-11
112-362	-	-	-	-	-	-	-10000
112-111	-	-	-	-	-	-	-10000

Takas Algoritmasında Reddedilen Çözümün Kritik Yolunun Kullanılması

Takas algoritmasında yerel en iyi çözümden kaçmak için, Metropolis kriterine göre bir önceki çözüme geri dönüldüğünde, o çözümün yerine reddedilen çözümün kritik yolu kullanılmaktadır. Çizelge 4.6'da Algoritma 2'nin nasıl çalıştığı örnek problem üzerinde anlatılmıştı. Örneğin Çizelge 4.6'da tek işlem yer değiştirme algoritmasının 1. iterasyonunda tek işlem yer değiştirme TB algoritması, takas TB algoritmasına ilk çözümü sunmuş ve geliştirmesini talep etmişti (Gri renkle gösterilmektedir). Takas

TB algoritması 1 ve 2 numaralı iterasyonlarda çözümleri kabul etmiştir. 3 numaralı iterasyonda elde edilen çözüm ise Metropolis ifâdesi kullanılarak reddedilmişti. Sonuç reddedildiği için 2 numaralı çözüme geri dönülmektedir. Ancak reddedilen 3 numaralı çözümün kritik yolu kullanılacaktır. Bu şekilde reddedilen çözümün kritik yolunun çağrılması, gerçekte kritik işlem olmayan ancak kritik işlem olmaya yakın işlemlerin de araştırma alanına eklenmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.13'de 5. bölümde aktarılacak test problemlerinin çözüm verilerine göre "reddedilen çözümlerdeki kritik işlemlerin %70'inden fazlası" son kabul edilen çözümün kritik işlemi olduğu görülmektedir. Geriye kalan işlemler (%30) ise kritik olmayan işlemlerdir. Kritik olmayan işlemlerin seçilmesi ve bu işlemlerin kritik olmayan diğer işlemlerle yapacağı takasların kabulü sonucunda, kritik işlemlerin atanabileceği yeni fırsat lokasyonları üretilecektir. Yâni kritik işlemlerin atanabileceği uyum değerini azaltabilecek lokasyonlar azaldığında, kritik olmayan bölgelerde bulunan işlemlerin gerçekleştireceği takaslarla yeni fırsat lokasyonları yaratılarak, yerel en iyi çözümde takılıp kalınmasının önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Genelde reddedilen çözümün kritik yolunun kullanılması, makina sayısı ve işlem sayısı arttığı durumlarda daha olumlu sonuçlar üretmektedir. Bunun en önemli nedeni, makina sayısı ve işlem sayısı az olan problemlerde reddedilen çözümün kritik işlemleriyle, geri çağrılan çözümün kritik işlemlerinin büyük bir kısmı aynıdır.

Yaratılan fırsat lokasyonlarıyla ne ifâde edilmek istendiği, farklı bir problemin Gantt diyagramında anlatılacaktır. Şekil 4.35'de 3 farklı Gantt diyagramı verilmiştir (Bölüm 5'de sunulacak 3bx kodlu problemin Gantt diyagramıdır). İlk Gantt diyagramında geri çağrılan çözüm görülmektedir. İkinci Gantt diyagramında, reddedilen çözümden seçilen kritik işlem, (112 numaralı işlem) 373 ile takas gerçekleştirmektedir ve elde edilen çözümü, takas TB algoritması kabul etmektedir. Üçüncü Gantt diyagramında 382 ile 4101 takas edilmektedir. Şekil 4.35'de sunulan problemde 1., 2., 3. ve 4. sipârişlerin teslim tarihleri sırasıyla 20, 47, 27 ve 42'dir.

Şekil 4.35'de ilk Gantt diyagramına bakıldığında 112 ve 373 numaralı işlemlerin kritik işlem olmadığı görülmektedir. İlk Gantt diyagramı iterasyonlar sırasında kabul edilmiştir. Bir sonraki adımda kabul edilen çözümde, bir kritik işlemde takas gerçekleşmiş ancak uyum değeri kötü olduğu için Metropolis İfâdesi'nin değerlendirmesi sonucunda çözüm reddedilmiştir. Bir önceki çözüme geri dönülmüştür ve reddedilen kritik yoldan bir kritik işlem rassal seçilmiştir. 112 numaralı işlem, reddedilen çözümün kritik işlemidir. Etki analizi sonucunda 112 ile 373 takas edilmiş, 2. Gantt diyagramında görülen çözüm elde edilmiştir. Bu çözümün kritik yolu belirlenerek, geciken 3 numaralı sipârişin kritik yolundan 382 için

etki analizi yapılmıştır ve 4101 ile takasına karar verilmiştir. Bu takaslar gerçekleştirilmeden önce, makina 1'de 112, 373, 382 ve 383 işlemleri sıralanmaktaydı. Bu takaslar gerçekleştirilmeden 382 ile 4101 takas edilseydi, 373 ile 4101 arka arkaya dizilecekti ve 8 birim hazırlık süresine gereksinim duyulacaktı. Böyle bir takas, etki analizinde kabul edilmeyecekti. 112 ve 373 gibi kritik yolda olmayan iki işlem takas edilerek 382'nin önüne 112 gelmiştir ve bu yeni oluşan ikili yapının (112-383) arasına başka bir işlemin gelmesi durumunda, daha önce ulaşılamayacak bir hazırlık süresi değeri toplamının elde edilme olanağı sağlanmıştır. 4101 numaralı kritik işlemin, 2 birim önde; 2 birim arkada olmak üzere toplam 4 birim hazırlık süresi toplamıyla gerçekleştirilme olanağı sağlanmıştır.

Çizelge 4.13 : Geri çağrılan çözümde reddedilen kritik yolun kullanımının neden olduğu performans artışı.

Problem	Toplam işlem sayısı	Kritik İşlem Oranı	Performans Farkı$_{\text{Reddedilen Kritik-Kritik}}$
1ha	24	88%	0%
1hx	24	84%	2%
1ba	24	80%	1%
1bx	24	91%	2%
2ha	48	73%	1%
2hx	48	87%	4%
2ba	48	82%	2%
2bx	48	84%	1%
3ha	36	53%	5%
3hx	36	62%	9%
3ba	36	79%	7%
3bx	36	83%	3%
4ha	72	58%	4%
4hx	72	63%	3%
4ba	72	82%	6%
4bx	72	69%	8%
5ha	96	59%	7%
5hx	96	60%	4%
5ba	96	64%	6%
5bx	96	69%	9%
6ha	96	65%	14%
6hx	96	61%	16%
6ba	96	72%	12%
6bx	96	74%	9%
7ha	144	64%	8%
7hx	144	69%	7%
7ba	144	73%	2%
7bx	144	68%	11%
8ha	216	49%	7%
8hx	216	63%	3%
8ba	216	68%	4%
8bx	216	75%	4%
9hx	70	89%	-1%
10hx	60	76%	9%
11hx	50	71%	6%
12hx	40	83%	2%
	Ortalama	72%	5%



Şekil 4.35 : En son kabul edilen çözümde reddedilen çözümün kritik yolunun kullanılması

Yapılan takas sonucunda yerleri değiştirilen işlemlerin de, yeni lokasyonları yeni fırsatlar oluşturacak ve çözümün gelişme olasılığı artacaktır. Çizelge 4.13'de ileride anlatılacak olan 36 problemde reddedilen kritik yolun kullanılması ve geri çağrılan çözümün kritik yolun kullanılması durumunda çözümde elde edilen gelişmeler görülmektedir. Her problem için 2 deneme yapılarak elde edilen bu tabloda, ortalamada %5 performans artışı sağlandığı görülmektedir.

4.3 Rassal Tavlama Benzetimi Algoritması

Önerilen algoritmanın performansının karşılaştırılabilmesi için Fattahi'nin çeşitli makalelerinde önerdiği rassal TB algoritması kullanılacaktır. Fattahi ve diğ. (2007 ve 2009), makalelerinde ürün-işlem ikilisi kullanan Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde çift katmanlı TB algoritması önermiştir. Fattahi ve diğ., 2007 yılında yayınladıkları makalede, ESTÇP'de hiyerarşik ve bütünleşik yöntembiliminin sonuçları nasıl etkilediğini araştırmış, hiyerarşik çözüm yöntembiliminin daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır. Çalışmalarında TA ve TB algoritmalarını değişik şekillerde kullanan dört farklı algoritmanın (TA/TB, TA/TA, TB/TB ve TB/TA) performansı, birbirleriyle ve dal sınır algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. TB/TB algoritması, en iyi çözümleri küçük ve orta boy problemlerde üretmesine rağmen büyük boy problemlerde TA/TA ve TA/TB algoritmalarına göre ortalamada %4'e varan kötü performans sergilemektedir. Bu algoritmalarda ilk çözüm rassal oluşturulmaktadır.

Yazarların algoritmaların testinde kullandıkları Fdata adlı problemler, Bagheri ve diğ.'nin (2010) yapay bağışıklık sistemi algoritmasıyla çözülmüş; TB/TB algoritmasına göre ortalama sonuçları % 6 geliştirmiştir. Fattahi ve arkadaşları, 2009 yılında paralel işlenebilme özelliğine sahip Tip 2 ESTÇP'nin çözümünde hiyerarşik yöntembilimi içeren TB algoritmasını kullanmıştır. Yazarlar, oluşturdukları problemleri 2007 yılında önerdikleri TB/TB algoritmasıyla çözmüştür. Yeni TB/TB algoritmasının 2007 yılında önerdikleri algoritmadan tek farkı, ilk çözümü oluştururken en hızlı makinalara yükleme yapmaktadır. Elde ettikleri sonuçları, dal-sınır algoritması sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Dal-sınır algoritmasının elde ettiği en iyi değerlere ulaşılmıştır.

Literatürde yayılma süresini enküçüklemek için kullanılan rassal TB algoritması, orta ve küçük boy problemlerde en iyi çözüme rahatlıkla ulaşırken büyük boy problemlerde de Bagheri ve diğ.'nin (2010) önerdiği yapay bağışıklık sistemi algoritmasından ortalamada %6 daha kötü çözüm elde etmiştir. Bagheri ve diğ.'nin (2010) önerdiği algoritmanın, birçok veri kümesinde literatürdeki en iyi sonuçlara çok

yakın sonuçlar elde ettiğini düşünecek olursak, rassal çift katmanlı TB algoritmasının performansının da iyi olduğu kabul edilebilir.

Önerilen algoritmanın performansının karşılaştırılması için Fattahi'nin iki makalesinde de ortak kullandığı çift katmanlı TB algoritması kullanılacaktır. Bu algoritmanın seçilmesinin en önemli nedeni, sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne uyumlandırılmasının kolay olması, 200 işlemi bulabilecek problemleri popülasyon tabanlı algoritmalara göre çok daha kısa CPU işlem sürelerinde çözebilmesi ve Fattahi ve diğ.'nin gerek hazırlık süresi, gerekse paralel işlemenin sözkonusu olduğu problemlerde rassal TB algoritmasını kullanmasıdır. Önerilen algoritmanın ana çatısı (Algoritma 2) yâni çift katmanlı TB algoritması, Fattahi ve diğ.'nin (2007) algoritmasını temel almaktadır. Algoritma 2, komşu çözüm oluşturmada Algoritma 3 ve 4'ü kullanırken, rassal TB algoritması rassal yükleme ve sıralama yapmaktadır.

Burada performans karşılaştırması için sunulacak rassal TB algoritması, diğer yazarların önerdiği rassal TB algoritmasından temelde bâzı farklılıklar içermektedir. Bunun en önemli nedeni, literatürdeki birçok algoritmanın, problem boyutu büyüdüğünde sonuçlarının hızla kötüleşmekte olmasıdır. Bu sorunu olabildiğince azaltmak için, Fattahi'nin önerdiği çift katmanlı rassal TB algoritmasında bâzı iyileştirmeler yapılmıştır. Bu iyileştirmeler, dört deneme probleminde sınanarak büyük boyutlu problemlerde ortalama %15'lere varan iyileştirme sağlanmıştır (Tekbaş ve Baskak, 2010). İlk çözüm oluşturulurken, sipârişlerin teslim tarihlerine göre sıralanması ve sıralamada farklı makinalar arası takas gibi iki değişiklik yapılmıştır. Fattahi'nin önerdiği algoritmada bu değişiklikler yapılarak, Şekil 4.36'da görülen akış diyagramı elde edilmiştir.

4.3.1 Rassal tavlama benzetimi algoritmasının önemli parçaları

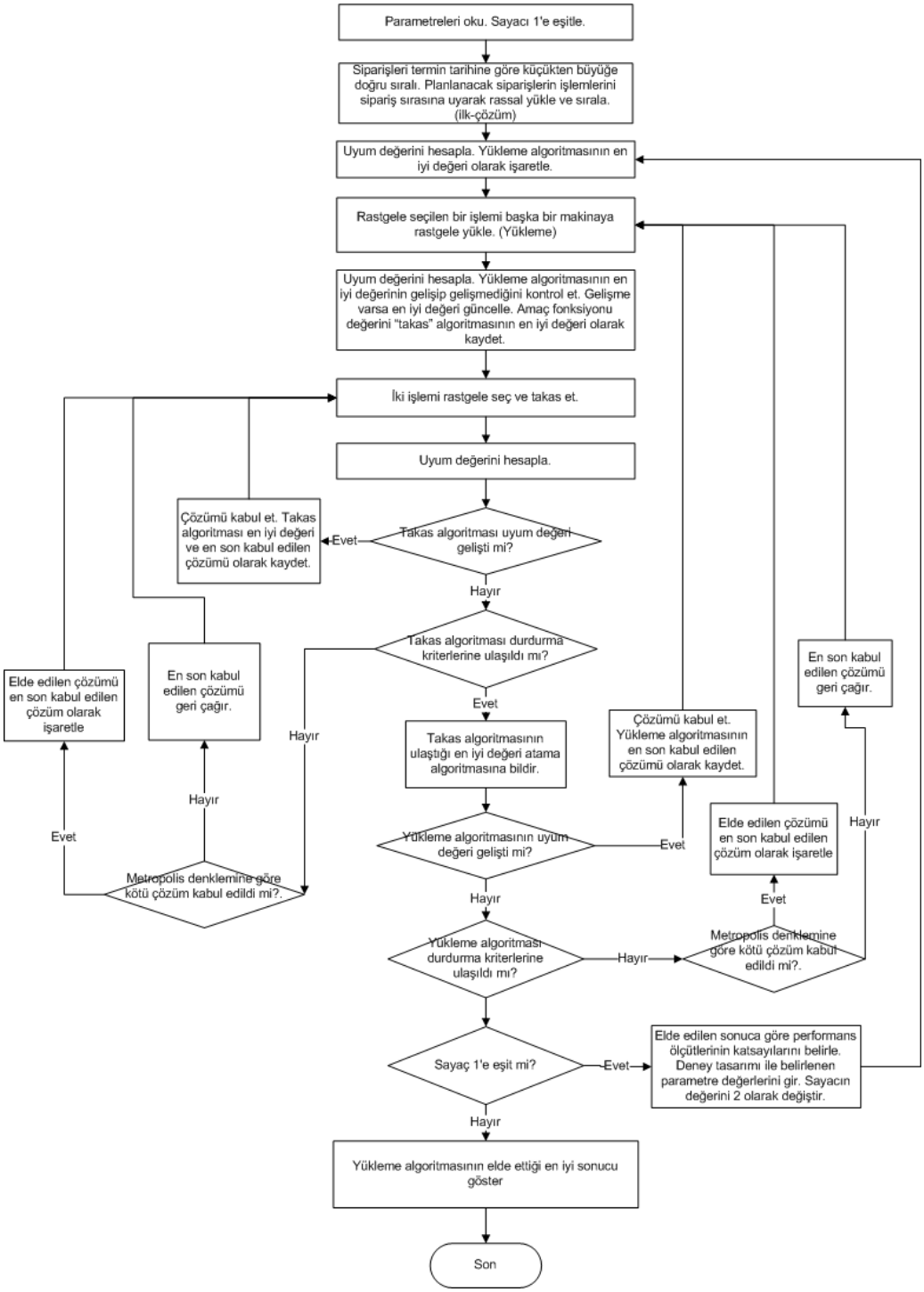
4.3.1.1 Temsil

Rassal TB algoritmasında, incelenen problemin gereksinimlerini karşılayacak sipâriş-ürün gösterimi kullanılmıştır. Bu gösterim, önerilen algoritmada da kullanılmaktadır (Çizelge 4.3).

4.3.1.2 İlk çözüm

İlk çözüm oluşturulurken, sipârişler teslim tarihlerine göre sıralanmaktadır. Her sipârişin işlemleri için rassal yükleme ve sıralama gerçekleştirilmektedir. Örneğin Çizelge 4.8'de verilen örnek problemde sipârişleri teslim tarihlerine göre sıralarsak 1, 3, 2 sıralaması elde edilmektedir. Önce 1 numaralı sipârişin işlemleri için rassal

yükleme ve sıralama gerçekleştirilmektedir. Arkasından 3 ve sonrasında 2 numaralı sipârişler benzer şekilde rassal çizelgelenmektedir.



Şekil 4.36 : Rassal TB algoritmasının akış diyagramı.

4.3.1.3 Uyum değeri

Performans ölçütleri, ağırlık katsayılarıyla çarpılarak uyum değeri elde edilmektedir. Algoritma öncelikle düşük parametre değerleriyle çalıştırılarak, performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları belirlenmektedir. Bu ön plânlama aşamasında performans ölçütlerinin ağırlık katsayıları 0,5 olarak kabul edilmektedir.

4.3.1.4 Komşu çözüm

Yükleme algoritması, bir işlemi rassal seçerek farklı bir makinaya rassal yüklemektedir. Bu yüklemeyi yaparken temsilde ilgili işlemin makina sayısı değiştirilmektedir. Örneğin Çizelge 4.14'de $O_{1,3,1}$ işleminin yüklendiği makinanın numarası 3'den 1'e değiştirilmiştir.

Sıralama (Takas) algoritması ise, iki işlemin yerlerini değiştirirken salt temsilin ilk satırında iki işlemi rassal seçerek takas etmektedir. Makina numaralarını gösteren ikinci satır değiştirilmemektedir. Örneğin Çizelge 4.15'de 12 ve 21 yer değiştirerek sıralama algoritması için gerekli takas gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.14 : Yüklemede komşu çözüm oluşturma.

$O_{1,1,1}$	$O_{1,3,1}$	$O_{1,2,1}$	$O_{2,1,1}$	$O_{1,2,2}$	$O_{1,1,2}$	$O_{2,1,2}$	$O_{1,3,2}$
11	13	12	21	12	11	21	13
2	**3**	2	2	1	2	1	3
$O_{1,1,1}$	$O_{1,3,1}$	$O_{1,2,1}$	$O_{2,1,1}$	$O_{1,2,2}$	$O_{1,1,2}$	$O_{2,1,2}$	$O_{1,3,2}$
11	13	12	21	12	11	21	13
2	**1**	2	2	1	2	1	3

Çizelge 4.15 : Sıralamada komşu çözüm oluşturma.

$O_{1,1,1}$	$O_{1,3,1}$	$O_{1,2,1}$	$O_{2,1,1}$	$O_{1,2,2}$	$O_{1,1,2}$	$O_{2,1,2}$	$O_{1,3,2}$
11	13	**12**	**21**	12	11	21	13
2	3	**2**	**2**	1	3	1	3
$O_{1,1,1}$	$O_{1,3,1}$	$O_{2,1,1}$	$O_{1,2,1}$	$O_{1,2,2}$	$O_{1,1,2}$	$O_{2,1,2}$	$O_{1,3,2}$
11	13	**21**	**12**	12	11	21	13
2	3	**2**	**2**	1	3	1	3

4.3.1.5 Soğuma stratejisi

Rassal TB algoritmasında geometrik soğuma stratejisi yeğlenmiştir. Sıcaklık, geometrik soğuma katsayısı ile çarpılarak yeni sıcaklık değeri belirlenmektedir. Her iki TB algoritması (yükleme ve sıralama) için geometrik soğuma katsayısı 0,96 olarak kabul edilmiştir.

4.3.1.6 Durdurma ölçütü

Test edilen algoritmalarda iki farklı durdurma ölçütü kullanılmıştır. Son sıcaklık değerine veya gelişme olmayan iterasyon sayısı limitine ulaşılması, algoritmanın sonlandırılmasını sağlamaktadır.

İlk sıcaklık değeri ve her sıcaklıkta kaç iterasyon gerçekleştirileceği, kullanıcı tarafından girilmektedir. Her sıcaklık değerinde belirli sayıda iterasyon gerçekleştirildikten sonra sıcaklık, geometrik soğuma katsayısıyla çarpılmaktadır. İterasyonlar bu şekilde sürerken son sıcaklık değeri, sıcaklık limit değerinden küçük veya eşit olursa, TB algoritması durdurulmaktadır.

En iyi çözümden daha kötü bir çözüm elde edildiğinde gelişme olmayan iterasyon sayacı bir artmaktadır. Gelişme olmayan iterasyon sayısı limitine ulaşılması durumunda, ilgili TB algoritması durdurulmaktadır. Böylece yerel en iyi çözüme takılan algoritmanın sürmemesi amaçlanmaktadır. Eğer yükleme algoritmasının durdurma ölçütlerine ulaşıldıysa en iyi sonuç kullanıcıya sunulmaktadır.

Durdurma ölçütlerinin nasıl çalıştığı, önerilen algoritmanın anlatımında sunulan Çizelge 4.6'da verilen çift katmanlı TB algoritması örneği üzerinde daha önce anlatılmıştır.

4.3.1.7 Parametre değerlerinin belirlenmesi

Algoritma öncelikle sabitlenmiş paremetre değerleriyle çalıştırılarak performans ölçütlerinin katsayıları belirlenmektedir. İkinci aşama için her bir TB algoritmasının 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet parametre değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Gerek yükleme gerekse sıralama (Takas) TB'nin parametre değerlerinin belirlenmesi için deney tasarımı yapılmıştır. Matlab R2008a deney tasarımı modülü kullanılarak, Çizelge 4.16'da görülen parametrelerin değerleri belirlenmiştir. Son sıcaklık ve geometrik soğuma katsayısı gibi parametreler sabitlenerek deney tasarımı için gerekecek deneme sayısı azaltılmıştır.

4.3.2 Rassal tavlama benzetimi algoritmasının çalışma mantığı

Rassal TB algoritmasının akış diyagramı, Algoritma 2 ile temelde aynıdır. Algoritma 2 ilk çözümü rassal oluştururken, rassal TB algoritması tüm sipârişleri teslim tarihlerine göre sıralayarak sipârişin işlemlerini rassal yüklemek ve sıralamaktadır. Rassal TB algoritması, öncelikle bir işlemi rassal seçip rastgele bir makinaya yüklemektedir. Bu çözümü sıralama algoritmasına bildirip çözümü geliştirmesini talep etmektedir. Sıralama TB algoritması, durdurma ölçütlerine ulaşana dek çeşitli takaslar gerçekleştirmektedir ve en iyi çözümü yükleme algoritmasına bildirmektedir.

Yükleme algoritması sonucu değerlendirip ya kabul ederek o çözümün üzerine yeni bir yükleme yapmaktadır ya da reddedip, bir önceki çözümü geri çağırıp, geri çağrılan çözümü kullanarak yeni bir yükleme yapmaktadır. Sıralama algoritması, yükleme algoritmasının yeni çözümünü durdurma ölçütlerine ulaşana dek takaslarla geliştirmektedir. Yükleme algoritması, durdurma ölçütlerine ulaşana dek çift katmanlı TB algoritması çalışmasını sürdürmektedir. Durdurma ölçütlerinin, yükleme ve sıralama TB algoritmalarının nasıl çalıştığı, Çizelge 4.6'da ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştı. Çizelge incelenirken tek işlem yer değiştirme algoritması, yükleme algoritması olarak kabul edilmelidir.

Çizelge 4.16 : Rassal TB algoritmasının belirlenecek parametreleri ve aralıkları

			Alt sınır değer	**Üst sınır değer**
Yükleme Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**0,5**	**25**
	Son Sıcaklık	0,5	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**10**	**60 - 80***
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**10**	**60 - 80***
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
Sıralama (Takas) Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**0,5**	**25**
	Son Sıcaklık	0,05	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**5**	**60 - 80***
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**60 - 80***
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
DOE	Deney tasarımı ile belirlenecek.			
60-80*	Problem 8 haricinde 60 kabul edilecektir. Problem 8'de 80 kullanılacak			

5. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN PERFORMANSININ SINANMASI

5.1 Giriş

Önerilen algoritmanın performansının sınanması için iki farklı çalışma yapılmıştır. Öncelikle literatürde, sunulan problemin özelliklerine sahip veri kümeleri olmadığı için yeni bir veri kümesi oluşturulup bu problemler, önerilen algoritma ve rassal TB algoritması ile çözülmüştür. İkinci aşamada ise gerçek bir uygulamada önerilen algoritmanın performansı, fabrika üretim plânlama programı ve rassal TB algoritması ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde öncelikle önerilen algoritmayı içeren plânlama programının, kullanılan paket programlar arası veri alışveriş sistematiği aktarılacaktır. Ardından oluşturulan problemlerin özellikleri sunulacaktır. Problemler, önerilen algoritma ve rassal TB algoritması ile çözülerek, elde edilen sonuçlar irdelenecektir. Son bölümde ambalaj sektöründe gerçekleştirilen uygulama ile önerilen algoritmanın performansı sınanacaktır.

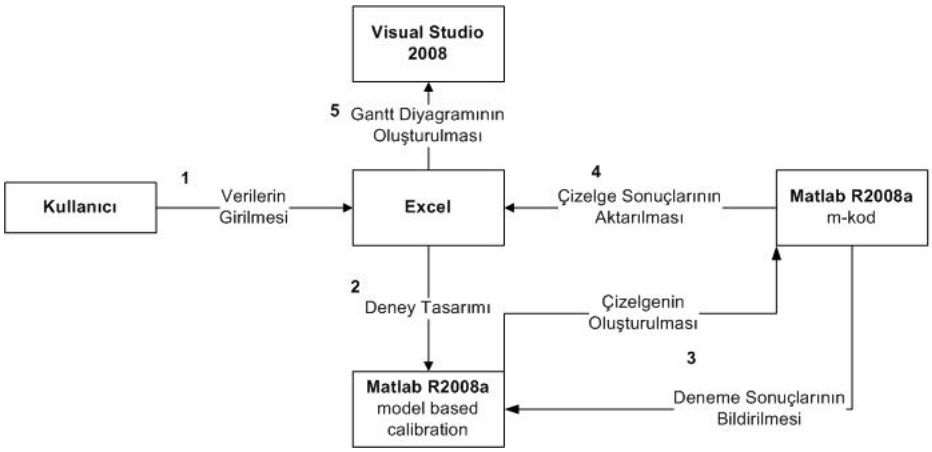
5.2 Geliştirilen Plânlama Programının Veri Alışveriş Sistematiği

Geliştirilen plânlama programı, Excel, Matlab R2008a ve Visual Studio 2008 programlarını kullanarak çözüm üretmektedir (Şekil 5.1). Excel-Matlab geçişleri otomatik olsa da Matlab-Visual Studio geçişleri elle kontrol edilmektedir. Visual Studio 2008 yazılımı üzerinde Matlab R2008a programının çalıştırılması denenmiş, ancak CPU işlem süreleri daha yüksek olduğu için vazgeçilmiştir.

Öncelikle kullanıcının, oluşturulan problemin verilerini, Excel'de "HAZIRLIK, VADE, MIKTAR, ISLEMSUR ve ISLEMSAY" adlı 5 ana sayfaya girmesi gerekmektedir (Şekil 5.2). Bu sayfaların adlarının değiştirilmemesi, programın düzgün çalışması açısından önemlidir. Hattâ büyük harfle yazılması gerekmektedir.

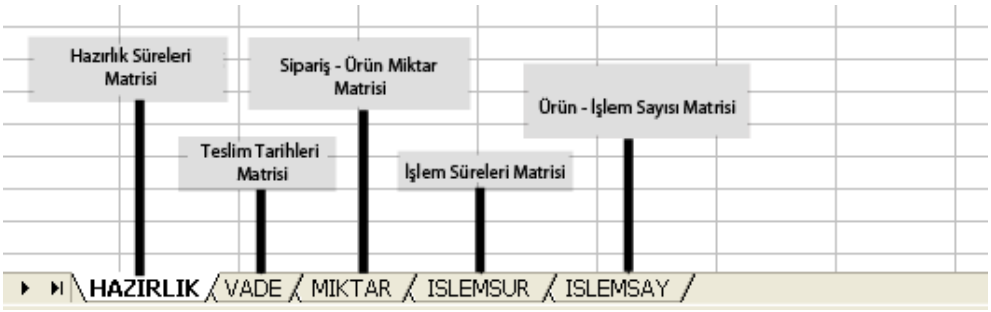
HAZIRLIK sayfasında, aynı makinadaki işlemlerin birbirini izlemesi durumunda, işleme başlamadan önce yapılması zorunlu olan faaliyetler nedeniyle geçmesi gereken süreler girilmektedir (Sıraya bağlı hazırlık süreleri). Çizelge 5.1'de hazırlık sürelerinin girildiği matris görülmektedir. O21, 2. ürünün 1. işlemini ifâde etmektedir. Tüm ürün-işlem çiftleri, gerek en üst satıra gerekse en soldaki sütuna yazılarak

matris oluşturulmaktadır ve içleri rakamlarla doldurulmalıdır. Örneğin Çizelge 5.1'de O22'den O32'ye geçilmesi durumunda 8 birim hazırlık süresinin gerekeceği görülmektedir (Gri ile renklendirilmiştir. Çizelge 5.1'de hazırlık matrisinin salt bir bölümü görülmektedir). Programın sorunsuz çalışması için 10.000'den büyük hazırlık süresinin girilmemesi gerekmektedir.



Şekil 5.1 : Plânlama programının veri alışveriş yapısı.

VADE sayfasına, sipârişlerin müşteriye teslim tarihleri girilmektedir. En sol sütunda sipârişler numaralarına göre sıralanırken, ikinci sütunda teslim tarihleri girilmektedir (Çizelge 5.2). Örneğin 2. sipârişin teslim tarihi 125'dir. Teslim tarihi için bir üst sınır değer yoktur.



Şekil 5.2 : Excel'de veri giriş ekranının sayfaları.

MIKTAR sayfasına her bir sipârişin hangi ürünlerden oluştuğu ve sipârişte ilgili üründen talep edilen miktarlar girilmektedir. En sol sütunda sipârişler numara sırasına göre sıralanırken, ürünler en üst satırda soldan sağa doğru numara sırasına göre sıralanmalıdır. Çizelge 5.3'de 2 numaralı sipârişin, 5 adet 5. ürün, 3 adet 6. ürün, 1 adet 7. ürün ve 5 adet 8. üründen oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 5.1 : HAZIRLIK sayfasının yapısı.

	O11	O12	O13	O21	O22	O23	O31	O32	O33	O41	O42	O43
O11	0	5	4	5	4	7	4	8	3	2	6	7
O12	7	0	8	2	5	2	4	4	2	7	2	4
O13	8	4	0	2	1	2	6	1	7	8	5	7
O21	8	5	6	0	8	1	3	5	7	5	2	4
O22	2	5	2	8	0	4	4	8	8	4	3	3
O23	7	2	6	8	5	0	8	7	4	8	7	4
O31	3	1	8	1	4	8	0	5	3	7	1	3
O32	3	3	6	4	5	8	4	0	8	1	2	3
O33	5	1	3	3	2	4	6	3	0	5	6	4
O41	5	1	2	7	3	8	2	8	2	0	7	3
O42	3	4	8	3	6	8	5	4	7	2	0	1
O43	6	3	5	5	2	1	2	7	2	7	5	0

Çizelge 5.2 : VADE sayfasının yapısı.

	VADE
SIP1	136
SIP2	125
SIP3	184
SIP4	114

ISLEMSUR sayfasına, her bir işlemin her bir makinadaki işlem süreleri girilmektedir. En sol sütunda makina numaraları küçükten büyüğe doğru sıralanırken, en üst satıra ürün-işlem ikilileri sırayla soldan sağa doğru yazılmalıdır (En üst satıra HAZIRLIK sayfasındaki en üst satırın kopyalanması daha kolay ve daha güvenli olacaktır). Çizelge 5.4'de O23 (2. ürünün 3. işlemi) M2'de (2. makina) gerçekleştirilirse, 7 birim işlem süresinin gerektiği görülmektedir (Çizelge 5.4'de işlem süreleri matrisinin salt bir bölümü görülmektedir).

Çizelge 5.3 : MIKTAR sayfasının yapısı.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
SİP1	5	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SİP2	0	0	0	0	5	3	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0
SİP3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	3	5	0	0	0	0
SİP4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3

Çizelge 5.4 : ISLEMSUR sayfasının yapısı.

	O11	O12	O13	O21	O22	O23	O31	O32	O33	O41	O42	O43
M1	6	5	6	7	2	8	2	5	4	8	5	7
M2	6	2	2	2	7	7	4	5	3	5	6	4

ISLEMSAY sayfasına, her ürünün kaç işlemden oluştuğu girilmektedir. Aslında ilk bakışta bu veriye gereksinim yok gibi görünse de geliştirilen programda Matlab Excel'den verileri okurken, satır ve sütun başlıklarını dikkate almamaktadır. Örneğin Çizelge 5.3'de verilen matriste P1, SİP2 gibi başlıkları okuyamamaktadır. Bu

verilerin satır ve sütunda küçükten büyüğe doğru sıralandığı kabul edilmektedir. Yâni birinci sırada P1, ikinci sırada P2, üçüncü sırada P3 olduğunu kabul etmektedir. Ancak hazırlık matrisinde O11, O12 gibi verileri okurken hangi işlemin 1. ürünün son işlemi olduğunu bilmesi gerekmektedir. ISLEMSAY sayfasına bu nedenle gereksinim duyulmaktadır. Çizelge 5.5'de her bir ürünün kaç işlemden oluştuğu görülmektedir. Tüm ürünler, 3 işlemden oluşmaktadır.

Çizelge 5.5 : ISLEMSAY sayfasının yapısı.

	islemsayisi
ürün1	3
ürün2	3
ürün3	3
ürün4	3
ürün5	3
ürün6	3
ürün7	3
ürün8	3

Excel'de gerekli problem bilgileri girildikten sonra Matlab R2008a'da "model based calibration" aracı çalıştırılarak deney tasarımı gerçekleştirilmektedir. Deney tasarımında "optimal design" seçilerek, test edilecek parametre değerleri kümesi belirlenmektedir. Belirlenen parametre değerleri girdi olarak plânlama programına girilerek kod çalıştırılmaktadır. Denemeler tamamlandıktan sonra elde edilen değerler, "model based calibration" aracına girilerek en uygun eğri uydurulmaktadır ve uyum değerini taklit eden eğride ideal parametre değer kümesi belirlenmektedir. Önerilen algoritmanın parametre değerleri, bu şekilde deney tasarımı ile belirlendikten sonra Matlab R2008a'da yazılan program çalıştırılarak çizelge oluşturulmaktadır (Deneysel çalışmada sunulacak problemlerin önerilen algoritma ve rassal TB algoritması ile çözümünde, parametre değerleri deney tasarımı ile belirlenmiştir. Şekil B.1 ve Şekil B.2'de deney tasarımı ile belirlenen parametre değerleri verilmiştir.). Çizelge sonucu, yeni bir Excel dosyasına yazılmaktadır. İstenildiği takdirde Visual Studio 2008'de yazılan program ile Gantt diyagramı oluşturulmaktadır (Şekil A.1'de Gantt diyagramının özellikleri şekil üzerinde anlatılmaktadır).

5.3 Deneysel Çalışma

5.3.1 Problemler

Önerilen algoritmanın, rassal TB algoritması ile performansını karşılaştırmak üzere toplam 36 problem oluşturulmuştur. İlk 32 problemde sipârişlerde ortak ürün

bulunmamaktadır. Son 4 problemde ise ortak ürün bulunmaktadır. İlk 32 problem, 8 ana problemin hazırlık süresi ve geciken sipâriş oranı farklı 4 kombinasyonu oluşturularak elde edilmiştir. Çizelge 5.6'da Problem sütununda 1ha, 1hx, 1ba ve 1bx olmak üzere 1. problemin 4 farklı kombinasyonu görülmektedir. 1ha'da, geciken sipâriş oranı 0,3 kabul edilmiştir. Hazırlık süresi matrisi, 0-8 aralığından düzgün dağılımla seçilmektedir. 1hx'de hazırlık süresi matrisi 1-8 aralığından düzgün dağılımla belirlenmektedir. Yâni 1ha ile 1hx arasındaki tek fark, hazırlık matrisini belirlemede kullanılan aralıktır. Hazırlık süresi matrisinin bu şekilde değiştirilmesi sonucu, bir önceki problem (1ha) ile ciddî çözüm farklılıklarına neden olması beklenmektedir. 1hx'de işlemlerin, 1ha'da elde edilen çözümdeki aynı makinalara yüklenmesi şaşırtıcı olmayacaktır. Ancak hazırlık matrisindeki farklılık nedeniyle aynı makinadaki işlemlerin sıralaması değişecektir. Ayrıca hazırlık süreleri arttığı için teslim tarihi sıkılığı da artacaktır. 1ba'da ise 1ha'ya göre geciken sipâriş oranı arttırılmaktadır. Aynı şekilde 1bx'de de 1hx'e göre geciken sipâriş oranı arttırılmaktadır. Böylece geciken sipâriş oranı ve hazırlık süresi değişim aralığı değiştirilerek, 1 problemden 4 farklı problem oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan problemlerle algoritmanın performansı karşılaştırılırken, değişimlere nasıl tepki verdiği de irdelenebilecektir. Çizelge 5.6'da Problem sütununda ilk karakter ana problem numarasını gösterirken; ikinci karakter geciken sipâriş oranının değerini; üçüncü karakter ise hazırlık süresi matrisinin hangi aralıktan seçildiğini temsil etmektedir.

Çizelge 5.6'da problem gösteriminde w/x/y/z gösterimi kullanılmaktadır. w, problemin kaç sipârişten; x, her bir sipârişin kaç üründen; y, her bir ürünün kaç işlemden oluştuğunu belirtmektedir. z ise her bir işlemin yüklenebileceği makina sayısını ifâde etmektedir. Örneğin 33. problemde (9hx) 6 sipârişin plânlanacağı, her sipârişin 3 ila 5 üründen; her ürünün 2 ila 4 işlemden oluştuğu görülmektedir. Her işlemi gerçekleştirebilecek 5 makinanın bulunduğu bilgisi, bu gösterimle aktarılmaktadır. Toplam işlem sayısının da 70 olduğu, "toplam işlem sayısı" sütunundan okunabilmektedir.

Oluşturulan problemlerde hazırlık süreleri 0-8 ve 1-8 aralığından düzgün dağılım kullanılarak belirlenmektedir. İşlem süreleri matrisi 1-8 aralığını kullanan düzgün dağılımla belirlenmektedir. Sipâriş-Ürün matrisi (MIKTAR sayfası) de 1-5 aralığından düzgün dağılımla belirlenmektedir. Teslim tarihlerini belirlemek için literatür araştırması yapılmış ve Demirkol ve diğ.'nin (1998) önerdikleri İfade **(5.1)** ve **(5.2)**, ESTÇP'ye uyarlanarak kullanılmıştır.

Çizelge 5.6 : Oluşturulan problemlerin özellikleri.

Problem	Gösterimi	Toplam işlem sayısı	Geciken Sipariş Oranı	Hazırlık Süresi
1ha	2/4/3/2	24	0,3	U(0,8)
1hx	2/4/3/2	24	0,3	U(1,8)
1ba	2/4/3/2	24	0,5	U(0,8)
1bx	2/4/3/2	24	0,5	U(1,8)
2ha	4/4/3/2	48	0,3	U(0,8)
2hx	4/4/3/2	48	0,3	U(1,8)
2ba	4/4/3/2	48	0,5	U(0,8)
2bx	4/4/3/2	48	0,5	U(1,8)
3ha	4/3/3/4	36	0,3	U(0,8)
3hx	4/3/3/4	36	0,3	U(1,8)
3ba	4/3/3/4	36	0,5	U(0,8)
3bx	4/3/3/4	36	0,5	U(1,8)
4ha	4/6/3/4	72	0,3	U(0,8)
4hx	4/6/3/4	72	0,3	U(1,8)
4ba	4/6/3/4	72	0,5	U(0,8)
4bx	4/6/3/4	72	0,5	U(1,8)
5ha	6/4/4/4	96	0,3	U(0,8)
5hx	6/4/4/4	96	0,3	U(1,8)
5ba	6/4/4/4	96	0,5	U(0,8)
5bx	6/4/4/4	96	0,5	U(1,8)
6ha	4/6/4/8	96	0,3	U(0,8)
6hx	4/6/4/8	96	0,3	U(1,8)
6ba	4/6/4/8	96	0,5	U(0,8)
6bx	4/6/4/8	96	0,5	U(1,8)
7ha	4/6/6/8	144	0,3	U(0,8)
7hx	4/6/6/8	144	0,3	U(1,8)
7ba	4/6/6/8	144	0,5	U(0,8)
7bx	4/6/6/8	144	0,5	U(1,8)
8ha	6/6/6/8	216	0,3	U(0,8)
8hx	6/6/6/8	216	0,3	U(1,8)
8ba	6/6/6/8	216	0,5	U(0,8)
8bx	6/6/6/8	216	0,5	U(1,8)
9hx	6/3-5/2-4/5	70	0,3	U(1,8)
10hx	5/3-5/2-5/5	60	0,3	U(1,8)
11hx	6/2-4/2-4/4	50	0,3	U(1,8)
12hx	9/1-3/2-3/4	40	0,3	U(1,8)
U	düzgün dağılım			

$$d_j = U\left(\mu - \frac{\mu * R}{2}, \mu + \frac{\mu * R}{2}\right) \quad \textbf{(5.1)}$$

$$\mu = (1 - T_{oran}) * is_sayisi * E(P) \quad \textbf{(5.2)}$$

T_{oran}: Geciken iş oranı (veya geciken sipâriş oranı)

R: Teslim tarihi aralığı katsayısı

E(P): İşin beklenen işlem süresi (Tüm makinalardan eşit yararlanıldığı ve Gantt diyagramında boşlukların olmadığı kabulü ile hesaplanmaktadır.)

Yazarlar, esnekliğin sözkonusu olmadığı problemleri dikkate alarak beklenen işlem süresini hesaplamaktadır. Vilcot ve Billaut'un (2008) makalesinde Demirkol ve diğ.'nin (1998) ifâdeleri makina esnekliğini dikkate alacak şekilde değiştirilmiştir. İşi oluşturan işlemlerin ortalama işlem sürelerinin toplanarak makina sayısına

bölümünden, işin beklenen işlem süresini hesaplanmaktadır. Halbuki önerilen algoritma, olabildiğince en hızlı makinalara yükleme yapmaktadır. Bu nedenle "hazırlık sürelerinin yüksek olabileceği ve yükleme yapılabilecek en hızlı makinaya yüklemenin zor olabileceği çok makinalı ama her bir makinada az sayıda işlemin olacağı" üç kötümser senaryolu problem üzerinde bir test yapılarak en hızlı kaçıncı makinaya yükleme yapıldığı ve hazırlık sürelerinin ortalamasının ne olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.7'de verilen sonuçlara göre işlemler, ortalama en hızlı 1,56. makinaya yüklenirken ortalama hazırlık süresi de 2,59 olmaktadır. Bu veriler ışığında işlemlerin %40'nın en hızlı makinalara, %60'ın en hızlı 2. makinaya yüklendiği kabul edilmektedir. 2,59 ortalama hazırlık süresi de 3'e yuvarlanarak İfâde **(5.3)** oluşturulmaktadır.

Çizelge 5.7 : İfade (5.3)'ü belirlemek için oluşturulan deneme problemleri ve sonuçları.

	Toplam İşlem Sayısı	Makina Sayısı	Hazırlık Süresi	Ortalama Hazırlık Süresi	Ortalama En Hızlı Kaçıncı Makina
Deneme 1	20	6	U(1,8)	2,81	1,69
Deneme 2	30	7	U(1,8)	2,68	1,42
Deneme 3	14	4	U(1,8)	2,29	1,58
			Ortalama	2,59	1,56

Oluşturulan bu ifâdelerle, Vilcot ve Billaut'un önerdiği ifâdelere göre çok daha sıkı teslim tarihlerinin üretilmesi beklenebilir. İfâde **(5.1)** ve **(5.2)** salt sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne uyumlandırılarak İfâde **(5.4)** ve **(5.5)** elde edilmiştir. R katsayısı, Demirkol ve diğ.'nin (1998) önerdiği şekilde 0,5 seçilmiştir.

$$p_{j,k} = (0{,}4 * p_{\text{en hızlı 1. makina},j,k} + 0{,}6 * p_{\text{en hızlı 2.makina},j,k}) + 3 \qquad \textbf{(5.3)}$$

$$\mu_i = (1 - T_{oran}) \times N \times \sum_{j=1}^{u_i} r_{i,j} \times \sum_{k=1}^{o_j} \frac{p_{j,k}}{m} \qquad \textbf{(5.4)}$$

$$d_j = U\left(\mu - \frac{\mu * 0{,}5}{2}, \mu + \frac{\mu * 0{,}5}{2}\right) \qquad \textbf{(5.5)}$$

$r_{i,j}$: i. sipârişte j. üründen talep edilen miktar

$p_{j,k}$: j. ürünün k. işleminin tahminî işlem süresi

m: makina sayısı

5.3.2 Sonuçlar ve değerlendirmeler

Intel Core 2 Duo 2.66 Ghz işlemcili 2 GB Ram'e sahip dizüstü bilgisayarda oluşturulan 36 problem, Matlab R2008a ile çözülmüştür. Kullanılan bilgisayar çift işlemcili olsa da tek işlemci çalıştırılarak sonuçlar üretilmiştir. Çizelge 5.8'de önerilen algoritmanın ve rassal TB algoritmasının ortalama sonuçları görülmektedir. Her bir problem, ilgili algoritma tarafından 6 kez çözülerek ortalama sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar dikkatle incelendiğinde, neredeyse tüm problemlerde önerilen algoritmanın, daha iyi sonuçları, daha kısa CPU işlem sürelerinde ürettiği görülmektedir. Özellikle problem boyutu büyüdüğünde her iki algoritmanın performans farkı hızla artmaktadır. Problem 8 serisinde rassal TB algoritmasının performans farkının, problem 7 serisine göre daha azaldığı görülmektedir. Ancak Çizelge 4.16'da, rassal TB algoritmasında, deney tasarımında izin verilen parametre değerlerinin alt ve üst sınırları dikkatle incelenecek olursa problem 8 serisi için aynı sıcaklıktaki iterasyon sayısı ve sonucun gelişmediği iterasyon sayısı parametre değerlerinin üst sınır değerlerinin 60'dan 80'e çıkarıldığı görülmektedir. Bu değerlerin arttırılması, rassal TB algoritmasının performansını arttırırken CPU işlem sürelerini rekor değerlere taşımıştır. Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın kullandığı akıllı arama yordamlarının (Algoritma 3 ve Algoritma 4), daha kısa CPU işlem sürelerinde daha iyi sonuçlara ulaştığını göstermektedir. Özellikle bu durum işlem sayısı ve makina sayısı fazla olan zorluğu yüksek problemlerde daha net görülmektedir.

Problem boyutu büyüdüğünde, önerilen algoritma-rassal TB algoritması ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi farkının büyüdüğü görülmektedir. Çizelge 5.8'de problem 5ba'nın ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin önerilen algoritmada 1,72; rassal TB algoritmasında 11,25 olduğu görülmektedir. Aslında %553 gibi görünen fark yanıltıcıdır. Yayılma süresinde %17 fark bulunmaktadır. Önerilen algoritma, 5ba probleminde sipârişleri ucu ucuna yerleştirmiş ve sipârişler çok düşük değerlerle gecikmiştir. Çizelge 5.8'de fark sütunu, İfade **(5.6)** ile hesaplanmaktadır (Şekil C.1-C.37'de önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözümlerin Gantt diyagramları verilmiştir).

$$Fark\% = \frac{A\lg B - A\lg A}{A\lg A} \qquad \textbf{(5.6)}$$

Çizelge 5.8 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması performans farkı.

Problem No	Açılımı	C_{max}			T_{ORT}			CPU (saniye)		
		Alg-A	Alg-B	Fark %	Alg-A	Alg-B	Fark %	Alg-A	Alg-B	Fark %
1ha	2/4/3/2	143,33	148,17	3,37	4,83	6,58	36,21	154,00	135,67	-11,90
1hx	2/4/3/2	154,33	157,00	1,73	9,67	11,08	14,66	114,17	109,33	-4,23
1ba	2/4/3/2	152,00	152,83	0,55	30,50	32,08	5,19	99,50	103,67	4,19
1bx	2/4/3/2	161,83	163,17	0,82	40,83	41,42	1,43	130,67	144,33	10,46
2ha	4/4/3/2	254,17	272,67	7,28	0,00	0,00	0,00	254,50	205,83	-19,12
2hx	4/4/3/2	277,00	289,83	4,63	0,00	0,96	inf	271,67	371,00	36,56
2ba	4/4/3/2	264,17	275,50	4,29	28,04	34,17	21,84	299,83	259,50	-13,45
2bx	4/4/3/2	288,67	300,17	3,98	38,92	44,42	14,13	394,67	191,83	-51,39
3ha	4/3/3/4	55,67	63,67	14,37	0,00	0,00	0,00	205,17	194,00	-5,44
3hx	4/3/3/4	61,17	66,17	8,17	0,00	0,00	0,00	195,83	408,17	108,43
3ba	4/3/3/4	59,00	63,67	7,91	3,50	5,46	55,95	212,00	193,00	-8,96
3bx	4/3/3/4	63,83	68,50	7,31	6,63	8,83	33,33	458,67	240,83	-47,49
4ha	4/6/3/4	179,83	204,50	13,72	0,00	3,96	inf	198,17	455,17	129,69
4hx	4/6/3/4	196,00	212,83	8,59	1,46	8,67	494,29	150,67	719,00	377,21
4ba	4/6/3/4	181,33	205,50	13,33	21,79	33,29	52,77	344,50	364,00	5,66
4bx	4/6/3/4	195,67	216,50	10,65	27,58	39,13	41,84	271,83	393,50	44,76
5ha	6/4/4/4	181,83	230,00	26,49	0,00	0,25	inf	176,00	520,50	195,74
5hx	6/4/4/4	208,33	246,33	18,24	0,00	5,08	inf	299,67	632,83	111,18
5ba	6/4/4/4	192,00	225,50	17,45	1,72	11,25	553,23	197,67	714,83	261,64
5bx	6/4/4/4	214,33	246,17	14,85	6,81	20,81	205,71	590,00	603,00	2,20
6ha	4/6/4/8	83,17	110,83	33,27	0,04	8,04	inf	188,33	1118,83	494,07
6hx	4/6/4/8	98,00	116,00	18,37	1,17	10,96	839,29	259,17	818,67	215,88
6ba	4/6/4/8	88,67	102,83	15,98	10,88	23,21	113,41	268,00	917,17	242,23
6bx	4/6/4/8	98,17	118,33	20,54	14,29	29,54	106,71	348,00	488,50	40,37
7ha	4/6/6/8	122,33	158,00	29,16	0,42	14,29	3.330,00	486,83	1256,67	158,13
7hx	4/6/6/8	138,00	178,67	29,47	4,13	26,08	532,32	1134,50	1713,17	51,01
7ba	4/6/6/8	129,33	161,00	24,48	14,83	37,25	151,12	487,33	1464,67	200,55
7bx	4/6/6/8	144,83	185,67	28,19	23,67	51,54	117,78	835,67	1653,17	97,83
8ha	6/6/6/8	179,33	215,67	20,26	0,00	21,56	inf	1114,50	2460,50	120,77
8hx	6/6/6/8	203,83	249,17	22,24	1,17	31,47	2.597,62	1155,83	3105,33	168,67
8ba	6/6/6/8	196,50	250,50	27,48	15,03	50,89	238,63	1646,50	3522,00	113,91
8bx	6/6/6/8	221,50	268,33	21,14	29,81	58,56	96,46	1846,83	5303,33	187,16
9hx	6/3-5/2-4/5	113,50	127,00	11,89	1,44	6,42	344,23	539,00	473,83	-12,09
10hx	5/3-5/2-5/5	82,50	96,00	16,36	0,03	0,00	-100,00	439,17	562,50	28,08
11hx	6/2-4/2-4/4	135,67	141,17	4,05	0,64	1,86	191,30	486,67	706,67	45,21
12hx	9/1-3/2-3/4	76,67	79,50	3,70	0,74	0,70	0,00	468,67	530,83	13,26
Ortalama		155,46	176,87	13,77	9,46	18,88	99,64	464,56	918,22	97,65
Alg-A	Önerilen Algoritma									
Alg-B	Rassal Tavlama Benzetimi									

Rassal TB algoritması, işlemleri yayılma değerini %17 arttıracak şekilde yerleştirdiği için, önerilen algoritmanın ucu ucuna yetişen sipârişleri, rassal TB algoritmasında teslim gecikmesi olarak yansımaktadır. %553 teslim gecikmesi farkı, %17'lik yayılma süresi farkından kaynaklanmaktadır. Eğer problemin teslim gecikmesi sıkılığı daha yüksek olsa, belki önerilen algoritma 1,72 değil de 30 gibi bir teslim gecikmesine sahip sonuç üretecekti. Öyle bir durumda, her iki algoritmanın performans farkı, büyük olasılıkla %553 yerine %50 gibi bir değere inecekti. Yâni önerilen algoritmanın çok ufak değerlerle geciken sonuçlar üretmesi, oransal karşılaştırmada ciddî farklılıklara neden olmaktadır.

Çizelge 5.9'da önerilen algoritma-rassal TB algoritmasının performans farkının 0,05 önem düzeyinde olup olmadığı incelenmiştir. Problemlerin tümüne yakınında, gerek yayılma süresine, gerek ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresine, gerekse uyum değerine göre %5 önem düzeyinde farklar olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan hipotez testinde örneklemin normal dağılıma uygunluğu ve varyansların eşitliği test edilmiştir. Tüm bu testler, Matlab'in istatistiksel fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uyum değeri hesaplanırken göreceli daha kötü çözümler üreten rassal TB algoritmasının "yayılma ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi" değerlerine göre ağırlık katsayıları belirlenmiştir. Örneğin problem 4ba'da rassal TB algoritmasının yayılma süresi 205,5; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ise 33,29'dur. 205,5, 33,29 ile bölünerek ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin ağırlık katsayısı 6,17 hesaplanır. Yayılma süresinin ağırlık katsayısı 1 kabul edilerek yayılma ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi, ağırlık katsayılarıyla çarpılarak toplanmaktadır. Rassal TB algoritmasının uyum değeri 411 olurken, önerilen algoritmanın ise 315,85 hesaplanacaktır.

Önerilen algoritma, yayılma süresi ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi toplamını enküçüklemeye çalışırken, en hızlı makinalara yüklemeyi ve aynı makinadaki önceki ve sonraki işlemle olan hazırlık süreleri toplamını da azaltmayı amaçlamaktadır. Çizelge 5.10'da önerilen algoritmanın bu amaca ulaşıp ulaşamadığı araştırılmaktadır. Ortalama hazırlık süresi hesaplanırken hazırlık süreleri toplanıp hazırlık yapabilecek işlem sayısına bölünmektedir. Problemin kabullerine göre makinalardaki ilk işlemlerin hazırlık süreleri sıfır olacaktır. Bu nedenle toplam işlem sayısından makina sayısı çıkarılarak, hazırlık süresine gereksinim duyabilecek işlem sayısı belirlenmektedir.

Problemlerin bir kısmında hazırlık süresi 0-8 (sonu a ile bitenler) bir kısmında da 1-8 aralığı (sonu x ile bitenler) kullanılmıştı. Düşük hazırlık süreli problemlerde 1,7 birim sürenin altında hazırlık süreleri; yüksek hazırlık süreli problemlerde ise 2,5 birim sürenin altında hazırlık süreleri elde edilmiştir. Ortalamada önerilen algoritma, 1,69 birim ortalama hazırlık süresi ile çizelge oluştururken, rassal TB algoritması 2,20 birim ortalama hazırlık süresi ile çizelge oluşturmaktadır. Ortalama hazırlık süresinde %30 performans farkı vardır.

Çizelge 5.9 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması performans farkının 0,05 önem düzeyinde karşılaştırması.

			Yayılma Süresi			Ortalama Sipariş Teslim Gecikmesi Süresi			Uyum Değeri		
Problem	Gösterimi	Toplam işlem sayısı	Önerilen Algoritma	Rassal Tavlama Benzetimi	p	Önerilen Algoritma	Rassal Tavlama Benzetimi	p	Önerilen Algoritma	Tavlama Benzetimi	p
1ha	2/4/3/2	24	143,33	148,17	**0***	4,83	6,58	**0.003***	252,11	296,33	**0.002***
1hx	2/4/3/2	24	154,33	157,00	**0.037***	9,67	11,08	**0.030***	291,27	314,00	**0.031***
1ba	2/4/3/2	24	152,00	152,83	0.064	30,50	32,08	0.089	297,29	305,67	0.082
1bx	2/4/3/2	24	161,83	163,17	0.34	40,83	41,42	0.42	322,70	326,33	0.36
2ha	4/4/3/2	48	254,17	272,67	**0***	0,00	0,00	-	254,17	272,67	**0***
2hx	4/4/3/2	48	277,00	289,83	**0***	0,00	0,96	**0.013***	277,00	579,67	**0.002***
2ba	4/4/3/2	48	264,17	275,50	**0.01***	28,04	34,17	**0***	490,28	551,00	**0***
2bx	4/4/3/2	48	288,67	300,17	**0***	38,92	44,42	**0***	551,66	600,33	**0***
3ha	4/3/3/4	36	55,67	63,67	**0***	0,00	0,00	-	55,67	63,67	**0***
3hx	4/3/3/4	36	61,17	66,17	**0***	0,00	0,00	-	61,17	66,17	**0***
3ba	4/3/3/4	36	59,00	63,67	**0.001***	3,50	5,46	**0.001***	99,82	127,33	**0.01***
3bx	4/3/3/4	36	63,83	68,50	**0.004***	6,63	8,83	**0.004***	115,21	137,00	**0.01***
4ha	4/6/3/4	72	179,83	204,50	**0***	0,00	3,96	**0.001***	179,83	409,00	**0***
4hx	4/6/3/4	72	196,00	212,83	**0***	1,46	8,67	**0***	231,81	425,67	**0***
4ba	4/6/3/4	72	181,33	205,50	**0***	21,79	33,29	**0***	315,85	411,00	**0***
4bx	4/6/3/4	72	195,67	216,50	**0***	27,58	39,13	**0***	348,30	433,00	**0***
5ha	6/4/4/4	96	181,83	230,00	**0***	0,00	0,25	**0.148**	181,83	460,00	**0***
5hx	6/4/4/4	96	208,33	246,33	**0***	0,00	5,08	**0***	208,33	492,67	**0***
5ba	6/4/4/4	96	192,00	225,50	**0***	1,72	11,25	**0***	226,52	451,00	**0***
5bx	6/4/4/4	96	214,33	246,17	**0***	6,81	20,81	**0***	294,86	492,33	**0***
6ha	4/6/4/8	96	83,17	110,83	**0***	0,04	8,04	**0***	83,74	221,67	**0***
6hx	4/6/4/8	96	98,00	116,00	**0***	1,17	10,96	**0***	110,35	232,00	**0***
6ba	4/6/4/8	96	88,67	102,83	**0***	10,88	23,21	**0***	136,85	205,67	**0***
6bx	4/6/4/8	96	98,17	118,33	**0***	14,29	29,54	**0***	155,41	236,67	**0***
7ha	4/6/6/8	144	122,33	158,00	**0***	0,42	14,29	**0***	126,94	316,00	**0***
7hx	4/6/6/8	144	138,00	178,67	**0***	4,13	26,08	**0***	166,26	357,33	**0***
7ba	4/6/6/8	144	129,33	161,00	**0***	14,83	37,25	**0***	193,45	322,00	**0***
7bx	4/6/6/8	144	144,83	185,67	**0***	23,67	51,54	**0***	230,09	371,33	**0***
8ha	6/6/6/8	216	179,33	215,67	**0***	0,00	21,56	**0***	179,33	431,33	**0***
8hx	6/6/6/8	216	203,83	249,17	**0***	1,17	31,47	**0***	213,07	498,33	**0***
8ba	6/6/6/8	216	196,50	250,50	**0***	15,03	50,89	**0***	270,47	501,00	**0***
8bx	6/6/6/8	216	221,50	268,33	**0***	29,81	58,56	**0***	358,09	536,67	**0***
9hx	6/3-5/2-4/5	70	113,50	127,00	**0***	1,44	6,42	**0***	142,09	254,00	**0***
10hx	5/3-5/2-5/5	60	82,50	96,00	**0***	0,03	0,00	**0.34**	165,00	96,00	**0***
11hx	6/2-4/2-4/4	50	135,67	141,17	**0.006***	0,64	1,86	**0.001***	184,13	282,33	**0.001***
12hx	9/1-3/2-3/4	40	76,67	79,50	**0.022***	0,74	0,70	0.49	159,97	159,00	0.6
				Genel	**0***		Genel	**0***		Genel	**0***

Çizelge 5.10 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının diğer istatistikleri.

	Önerilen Algoritma				Rassal Tavlama Benzetimi					
Problem	**O. Hazırlık Süresi**	**O. Makina Hızı**	**P. Y. İ. S**	**P. Y. İ. S Oranı**	**O. Hazırlık Süresi**	**O. Makina Hızı**	**P. Y. İ. S**	**P. Y. İ. S Oranı**	**% fark (O. H. S.)**	**% fark (O. M. H.)**
1ha	1,3636	1,0417	1	0,06	1,6364	1,0417	1	0,06	20,01	0,00
1hx	2,0455	1,0417	3	0,19	1,8182	1,1667	2	0,13	-11,11	12,00
1ba	1,6364	1,0833	1	0,06	1,6364	1,0833	1	0,06	0,00	0,00
1bx	2,5	1,0833	1	0,06	2,3182	1,2083	2	0,13	-7,27	11,54
2ha	0,7609	1,0625	0	0,00	1,3043	1,0625	1	0,03	71,42	0,00
2hx	1,8043	1	1	0,03	1,9348	1,1042	1	0,03	7,23	10,42
2ba	0,7826	1,1458	3	0,09	1,2174	1,1458	4	0,13	55,56	0,00
2bx	2,0652	1,0833	1	0,03	2,2826	1,125	1	0,03	10,53	3,85
3ha	1,125	1,2222	3	0,13	2,125	1,25	4	0,17	88,89	2,27
3hx	1,9688	1,2222	5	0,21	2,3125	1,2222	4	0,17	17,46	0,00
3ba	1,4688	1,3056	4	0,17	1,6563	1,25	6	0,25	12,77	-4,26
3bx	2,4375	1,2222	5	0,21	2,0313	1,25	8	0,33	-16,66	2,27
4ha	1,3824	1,0694	9	0,19	1,8529	1,1806	5	0,10	34,04	10,40
4hx	2,0294	1,0833	5	0,10	2,25	1,0694	8	0,17	10,87	-1,28
4ba	1,2206	1,0972	7	0,15	1,7353	1,2361	8	0,17	42,17	12,66
4bx	2,0588	1,1528	7	0,15	2,3529	1,2222	6	0,13	14,29	6,02
5ha	0,7826	1,0729	6	0,08	1,8152	1,25	11	0,15	131,94	16,51
5hx	2	1,1563	5	0,07	2,7174	1,25	12	0,17	35,87	8,10
5ba	1,1957	1,0729	10	0,14	1,9457	1,1771	14	0,19	62,72	9,71
5bx	2,3261	1,1354	12	0,17	2,6522	1,2396	16	0,22	14,02	9,18
6ha	1,4091	1,2917	16	0,22	2,3409	1,7083	22	0,31	66,13	32,25
6hx	2,2614	1,3542	17	0,24	3,1932	1,4688	27	0,38	41,20	8,46
6ba	1,25	1,3542	27	0,38	1,9886	1,5729	23	0,32	59,09	16,15
6bx	2,3068	1,2604	17	0,24	3,0795	1,4792	19	0,26	33,50	17,36
7ha	1,2647	1,2083	22	0,18	2,2794	1,5486	37	0,31	80,23	28,16
7hx	2,4118	1,2222	32	0,27	3,2574	1,5278	43	0,36	35,06	25,00
7ba	1,1912	1,2917	38	0,32	2,0809	1,7292	42	0,35	74,69	33,87
7bx	2,4191	1,25	35	0,29	3,2132	1,5556	36	0,30	32,83	24,45
8ha	0,9567	1,2037	33	0,18	1,5	1,4907	33	0,18	56,79	23,84
8hx	1,9183	1,2036	34	0,19	2,5721	1,4769	26	0,14	34,08	22,71
8ba	1,1827	1,3704	55	0,31	2,1731	1,5324	55	0,31	83,74	11,82
8bx	2,2115	1,2407	50	0,28	2,9423	1,6806	59	0,33	33,05	35,46
9hx	1,4615	1,2714	12	0,27	2,1385	1,3429	14	0,31	46,32	5,62
10hx	1,3273	1,3333	8	0,20	1,8364	1,45	7	0,18	38,36	8,75
11hx	2,2391	1,3	9	0,27	2,8696	1,32	7	0,21	28,16	1,54
12hx	2,1944	1,175	11	0,46	2,1944	1,175	11	0,46	0,00	0,00
ortalama	1,69	1,19	14,03	0,18	2,20	1,32	16	0,21	30,01	11,50

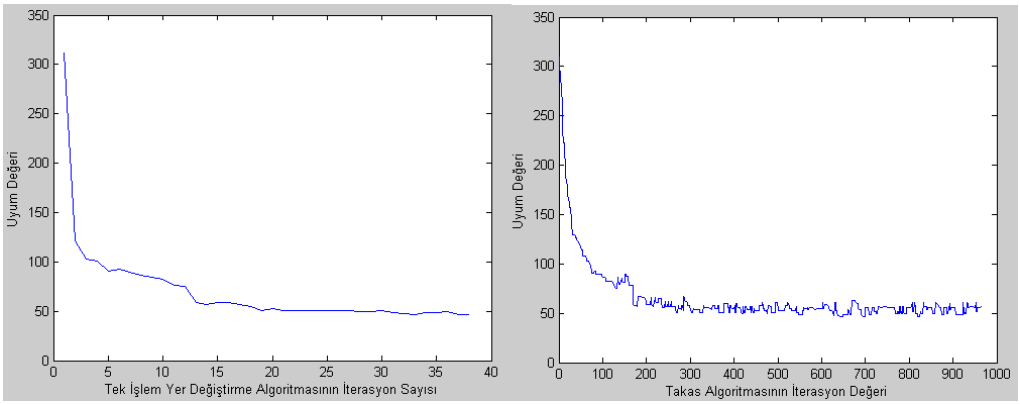
O. Hazirlik Süresi (O.H.S):	Ortalama Hazırlık Süresi (Hazırlık Süresi Toplamı/(Toplam İşlem sayısı -Makina Sayısı))
O. Makina Hızı (O.M.H):	Atama yapılan işlemlerin en hızlı kaçıncı makinaya atandığını göstermektedir.
P. Y. İ. S	Paralel Yapılan İşlem Sayısı
P. Y. İ. S Oranı:	Paralel Yapılan İşlem Sayısı / (Ürünlerin İlk işlemleri dikkate alınmayarak geriye kalan işlemlerin sayısının toplamı)

İşlemlerin ortalama en hızlı kaçıncı makinaya yüklendiği incelendiğinde, tüm problemlerde önerilen algoritma 1,4 değerinin altında sonuçlar üretmektedir. Ortalamada önerilen algoritma 1,19.; rassal TB algoritması 1,32. en hızlı makinaya yükleme yapmaktadır. Yâni önerilen algoritma, işlemlerin %19'unu ikinci en hızlı makinaya yüklemektedir. Rassal TB algoritması ise işlemlerin %32'sini en hızlı 2. makinaya yüklemektedir. Aslında rassal TB algoritmasının da işlemleri, en hızlı makinalara yüklemede başarılı olduğu düşünülebilir. Bu sonuçlar da gösteriyor ki, önerilen algoritmanın üstün performansının en önemli nedeni, en hızlı makinalara yükleme yaparken hazırlık süreleri toplamını enküçüklemeyi başarabilmesidir.

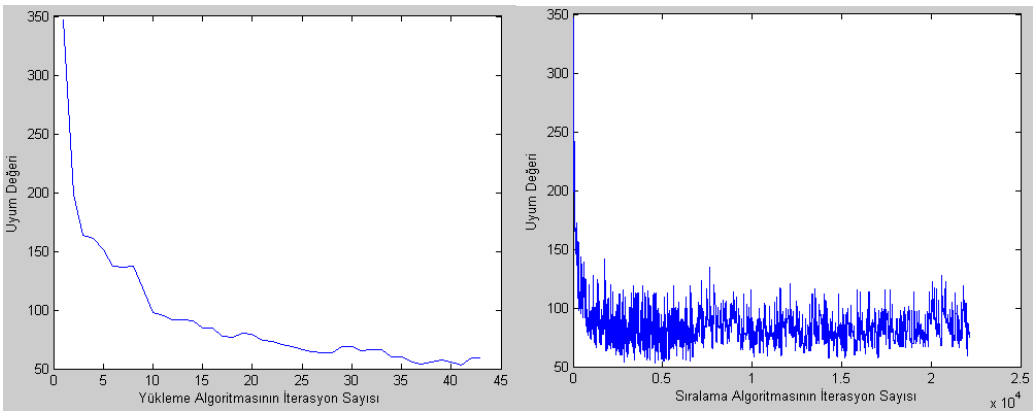
Paralel yapılan işlem sayısına bakıldığında, önerilen algoritmanın, rassal TB algoritmasına göre daha az paralel işlem gerçekleştirmeye eğilimli olduğu görülmektedir. Özellikle işlem sayısının artmasıyla birlikte, rassal TB algoritması, paralel yapılan işlemleri daha fazla yeğlemektedir. Aslında sipariş-ürün ikililerinde paralel yapılan işlem sayısının artışı, önerilen algoritmada sonucun gelişimini engellemektedir. (Örneğin 21 sipariş-ürün ikilisi, 2. siparişin 1. ürünü, toplam 3 işlemden oluşuyorsa ve tüm işlemler paralel yapılıyorsa, sonucun gelişim hızı azalacaktır.) Çünkü tek işlem yer değiştirme algoritması, makinalarda atanabilecek lokasyonları belirlerken, öncül ve ardıl işlemlerin başlangıç zamanlarını kullanmaktadır. Eğer ardı adına bir ürünün işlemleri paralel işlenirse, araştırma alanı çok daralacaktır ve bu nedenle sonuçların gelişimi yavaşlayacaktır. Ancak önerilen algoritma, paralel yapılan işlem oranını belirli bir değerde tutabilmektedir. Gerek takas gerekse tek işlem yer değiştirme algoritmasında, etki analizi sonucunda ürünün ilk ve son işlemlerinin seçilme olasılığı daha fazladır. Bunun en önemli nedeni, ilk işlemler makinada ilk sıralara atanırsa önünde işlem olmayacağı için hazırlık süresinin sıfır olacak olması; aynı şekilde ürünün son işlemi de makinada en son sıraya atanırsa sonrasında işlem olmayacağı için hazırlık süresinin sıfır olacak olmasıdır. Böylece bu işlemlerin (ürünün ilk ve son işlemleri) diğer işlemlere göre seçilme olasılığı artarken, diğer işlemlerin de hareket yeteneği artmaktadır.

Şekil 5.3'de önerilen algoritmanın uyum değerinin, tek işlem yer değiştirme ve takas algoritması iterasyon sayısına bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 5.4'de ise, rassal TB algoritmasının uyum değerinin yükleme ve takas (Sıralama) algoritması iterasyon sayısına bağlı değişimi görülmektedir. Önerilen algoritma 15-20 tek işlem yer değiştirme iterasyonuyla 50 değerine yaklaşırken, rassal TB algoritması 25-30 iterasyonla 50 değerine ulaşmaktadır. En önemli fark, iki algoritmanın takas algoritması sonuçlarında görülmektedir. Önerilen algoritmanın takas algoritması, 200 iterasyonla 50 değerine ulaşırken; rassal TB algoritması, 2.000 iterasyonla 50

değerine yaklaşmaktadır. Bu sonuçlar, önerilen algoritmanın kısa CPU işlem sürelerinde iyi sonuçlar üretmesinde Algoritma 3 ve 4'ün büyük katkısı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3 : Problem 3bx için önerilen algoritmanın uyum değeri-iterasyon sayısı grafiği.

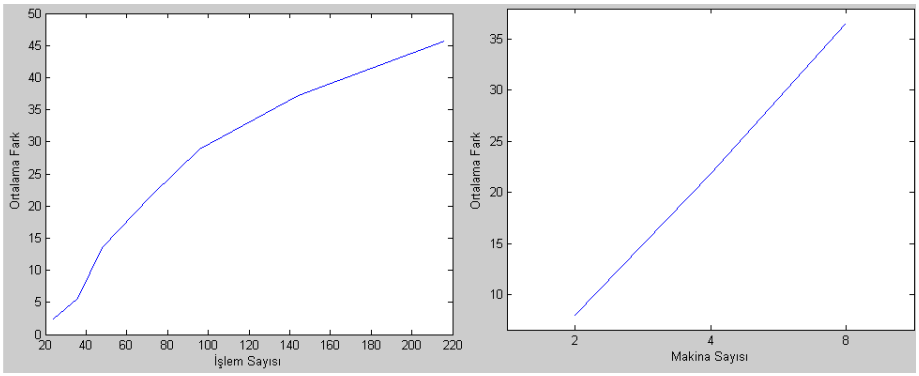


Şekil 5.4 : Problem 3bx için rassal TB algoritmasının uyum değeri-iterasyon sayısı grafiği.

Yayılma süresi, ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ve uyum değeri için önerilen algoritma ve rassal TB algoritması performans farkının, problem parametrelerinin değişimlerinden nasıl etkilendiği Anova ile irdelenecektir (Çizelge 5.11-5.13 ve Şekil 5.5-5.6). Verilerin, Anova analizinin kabullerine uygunluğu test edilmiştir. Gerekli görülen durumlarda Box-Cox dönüşümü yapılmıştır. Çizelge 5.11'de yayılma süresi Anova sonuçları incelendiğinde işlem sayısı ve makina sayısı artışının, iki algoritmanın performans farkını 0,05 önem düzeyinde arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 5.11 : Yayılma süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları.

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
islem sayisi	218.072	5	43.6145	16.29	0.0005
makina sayisi	13.133	1	13.1329	4.9	0.0577
hazirlik suresi	1.113	1	1.1134	0.42	0.5371
siparis gecikme orani	0.52	1	0.5204	0.19	0.671
islem sayisi*hazirlik suresi	1.166	5	0.2331	0.09	0.9922
islem sayisi*siparis gecikme orani	8.226	6	1.3711	0.51	0.7849
makina sayisi*hazirlik suresi	2.277	1	2.277	0.85	0.3835
hazirlik suresi*siparis gecikme orani	1.261	1	1.2614	0.47	0.5119
Error	21.425	8	2.6781		
Total	525.939	31			

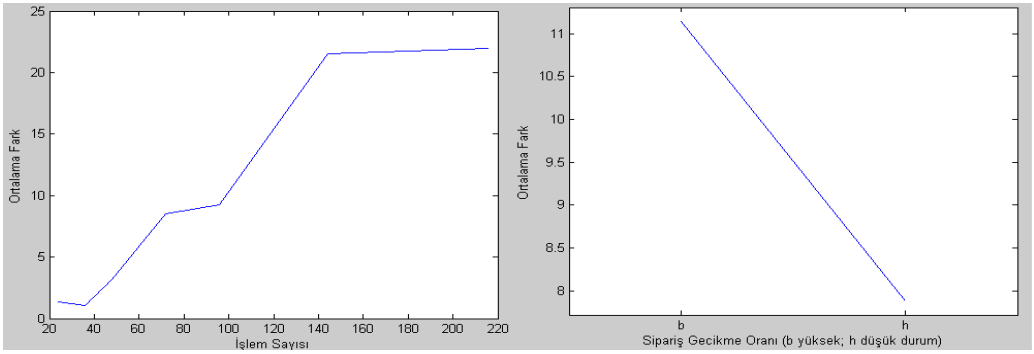


Şekil 5.5 : İşlem sayısı ve makina sayısına göre yayılma süresi ortalama farkının değişimi.

Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ve uyum değeri için Anova sonuçları incelendiğinde, işlem sayısı ve sipâriş gecikme oranı artışı, algoritmalar arası ortalama sipâriş teslim gecikmesi performans farkına neden olmaktadır (Çizelge 5.12-5.13 ve Şekil 5.6). Özellikle yayılma süresi performans farkında da işlem sayısının etkili bir parametre olduğu görülmüştü. Makina sayısı artışı performans farkına neden olsa da, gerek ortalama sipâriş teslim gecikmesi, gerekse de uyum değeri performans farkına neden olduğuna ilişkin 0,05 önem düzeyinde bir kanıt elde edilememiştir.

Çizelge 5.12 : Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları.

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
islem sayisi	2.1424	5	0.42848	7.03	0.0084
makina sayisi	0.0108	1	0.01077	0.18	0.6853
hazirlik suresi	0.1126	1	0.11264	1.85	0.2111
siparis gecikme orani	0.7815	1	0.78152	12.82	0.0072
islem sayisi*hazirlik suresi	0.0877	5	0.01754	0.29	0.9069
islem sayisi*siparis gecikme orani	0.374	6	0.06234	1.02	0.4738
makina sayisi*hazirlik suresi	0.0022	1	0.00224	0.04	0.8526
hazirlik suresi*siparis gecikme orani	0.0626	1	0.06257	1.03	0.3406
Error	0.4876	8	0.06094		
Total	11.346	31			



Şekil 5.6 : İşlem sayısı ve sipâriş gecikme oranına göre ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ortalama farkının değişimi.

Çizelge 5.13 : Uyum değeri için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları.

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
islem sayisi	186.737	5	37.3474	19.3	0.0003
makina sayisi	0.226	1	0.2262	0.12	0.7413
hazirlik suresi	3.219	1	3.2185	1.66	0.2332
siparis gecikme orani	44.941	1	44.9413	23.22	0.0013
islem sayisi*hazirlik suresi	5.24	5	1.048	0.54	0.7412
islem sayisi*siparis gecikme orani	28.101	6	4.6834	2.42	0.1232
makina sayisi*hazirlik suresi	0.001	1	0.0006	0	0.9868
hazirlik suresi*siparis gecikme orani	2.621	1	2.6211	1.35	0.278
Error	15.482	8	1.9352		
Total	729.167	31			

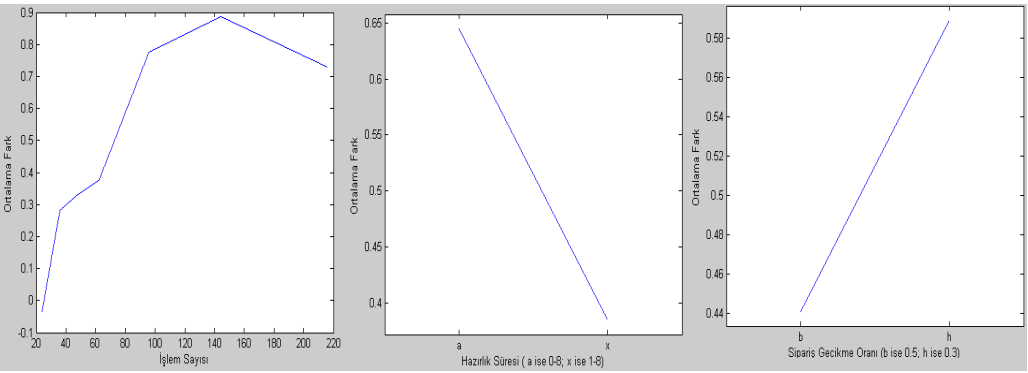
Önerilen algoritmanın en önemli özelliği, işlemleri en hızlı makinalara yüklerken hazırlık süreleri toplamını enküçüklemeye çalışmasıdır. Bu özelliğin etkisini incelemek için önerilen algoritma-rassal TB algoritması hazırlık süresi ve makina hızı performans farkı için Çizelge 5.10 verileri kullanılarak Anova analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.14-5.15 ve Şekil 5.7-5.9).

Çizelge 5.14 : Ortalama hazırlık süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları.

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
islem sayisi	0.8389	5	0.16778	9.52	0.0032
makina sayisi	0.04855	1	0.04855	2.75	0.1356
hazirlik suresi	0.47614	1	0.47614	27.01	0.0008
siparis gecikme orani	0.16263	1	0.16263	9.23	0.0161
islem sayisi*hazirlik suresi	0.08161	5	0.01632	0.93	0.5113
islem sayisi*siparis gecikme orani	0.628	6	0.10467	5.94	0.0124
makina sayisi*hazirlik suresi	0.02864	1	0.02864	1.62	0.2382
hazirlik suresi*siparis gecikme orani	0.00023	1	0.00023	0.01	0.9117
Error	0.14102	8	0.01763		
Total	4.26081	31			

Bu analiz ile bâzı ilginç sonuçlara ulaşılmıştır. İşlem sayısı artışı, önerilen algoritma ile rassal TB algoritması arasındaki ortalama hazırlık süresi farkını arttırmaktadır. Ancak hazırlık süresinin 0-8 yerine 1-8 aralığından seçilmesi ve sipâriş gecikme

oranının artması, rassal TB algoritmasının ortalama hazırlık süresi değerlerini, 0,05 önem düzeyinde önerilen algoritmaya yaklaştırmaktadır.



Şekil 5.7 : İşlem sayısı, sipâriş gecikme oranı ve hazırlık süresine göre ortalama hazırlık süresi farkının değişimi.

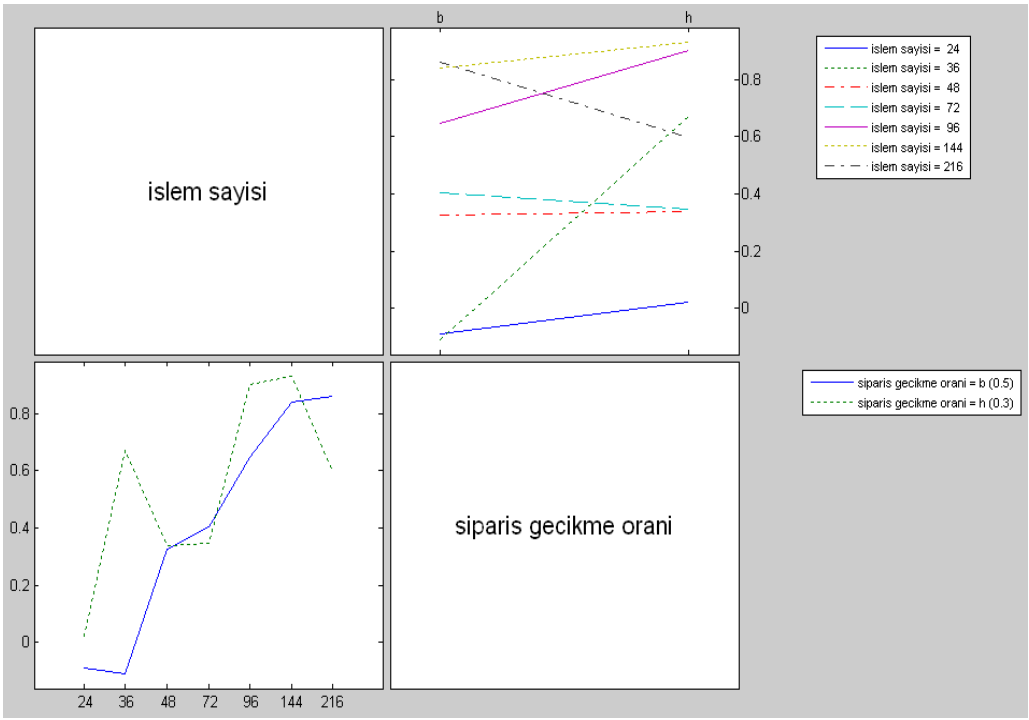
Çizelge 5.15 : Ortalama makina hızı için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının Anova sonuçları**.**

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
islem sayisi	0.87594	5	0.17519	4.64	0.0277
makina sayisi	0.08671	1	0.08671	2.3	0.1682
hazirlik suresi	0.01076	1	0.01076	0.28	0.608
siparis gecikme orani	0.01127	1	0.01127	0.3	0.5998
islem sayisi*hazirlik suresi	0.28966	5	0.05793	1.53	0.2809
islem sayisi*siparis gecikme orani	0.16068	6	0.02678	0.71	0.6527
makina sayisi*hazirlik suresi	0.00581	1	0.00581	0.15	0.7052
hazirlik suresi*siparis gecikme orani	0.10179	1	0.10179	2.7	0.1393
Error	0.30211	8	0.03776		
Total	4.62519	31			

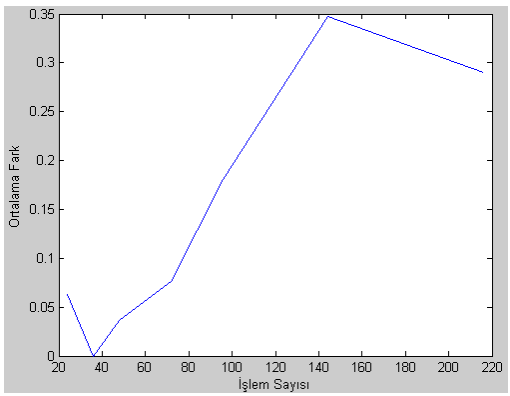
Önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkı, ortalama makina hızı verisi kullanılarak irdelendiğinde, işlem sayısı artışının 0,05 önem düzeyinde performans farkına neden olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin 0,05 önem düzeyinde bir performans farkına neden olduğu bulgusu elde edilmememiştir. Yapılan Anova analizlerinin tümüne yakınında, artan işlem sayısının önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkına neden olduğu görülmüştür. Rassal TB algoritmasında artan işlem sayısı, ortalama hazırlık sürelerinin artmasına ve yükleme yapılan makinaların en hızlı alternatiflerden seçilememesine, dolayısıyla algoritmanın performansının zayıflamasına neden olmaktadır.

Çizelge 5.16'da önerilen algoritmanın parametre değerleri deney tasarımı kullanılmadan düşürülmüş, performansının ve CPU işlem sürelerinin nasıl değiştiği irdelenmiştir. Çizelge 5.16'da Alg A, önerilen algoritmanın parametre değerleri deney tasarımı ile belirlendiğinde elde edilen sonuçları göstermektedir. Alg A_d ile, önerilen algoritmanın parametre değerleri deney tasarımı yapılmadan düşürülmüştür. Azaltılan parametre değerleri, neredeyse en düşük alabileceği değerlere

yaklaştırılmıştır. Alg A_d'de aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı, gelişme olmayan iterasyon sayısı ve sıcaklık değerleri, her bir TB algoritması için sırasıyla 4-4-2 değerleri seçilmiştir (Çizelge 5.16'da, dipnotta görülen 4-4-4-4/2-2 ile ilk dört rakam, her bir TB algoritmasında aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısının, gelişme olmayan iterasyon sayısının seçilen değerlerini gösterirken 2-2 ise ilgili algoritmaların başlangıç sıcaklık değerlerini ifâde etmektedir). Alg A_d parametre kümesi kullanıldığında, ortalama CPU işlem süreleri, 464'den 113'e düşmüştür (%75 azalmıştır).



Şekil 5.8 : Ortalama hazırlık süresi için önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkının işlem sayısı ve sipâriş gecikme oranına bağlı etkileşim grafiği.



Şekil 5.9 : İşlem sayısına göre ortalama makina hızının değişimi.

Çizelge 5.16 : Önerilen algoritmanın parametre değerleri düşürülmesi durumunda sonuçlar.

			Yayılma Süresi					Ortalama Sipâriş Teslim Gecikmesi Süresi					CPU (saniye)				
Problem No	**Açılımı**	**İşlem Sayısı**	**Alg-A**	**Alg-A_d**	**Alg-A_{d2}**	**Alg-A_{d3}**	**Alg-B**	**Alg-A**	**Alg-A_d**	**Alg-A_{d2}**	**Alg-A_{d3}**	**Alg-B**	**Alg-A**	**Alg-A_d**	**Alg-A_{d2}**	**Alg-A_{d3}**	**Alg-B**
1ha	2/4/3/2	24	143,33	147,66	146,75	147,75	148,17	4,83	8,33	7,63	8,50	6,58	154,00	24,20	11,20	10,70	135,67
1hx	2/4/3/2	24	154,33	154,33	154,25	154,25	157,00	9,67	16,00	14,50	17,60	11,08	114,17	16,80	8,70	7,20	109,33
1ba	2/4/3/2	24	152,00	150,33	148,25	144.5	152,83	30,50	41,00	36,75	41,37	32,08	99,50	13,50	11,38	6,92	103,67
1bx	2/4/3/2	24	161,83	158,50	159,50	156,00	163,17	40,83	48,60	51,25	46,75	41,42	130,67	16,00	9,83	7,43	144,33
2ha	4/4/3/2	48	254,17	255,25	259,50	263,75	272,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	254,50	35,10	38,20	24,70	205,83
2hx	4/4/3/2	48	277,00	285,75	286,25	282,25	289,83	0,00	0,19	0,19	0,13	0,96	271,67	34,30	27,53	27,88	371,00
2ba	4/4/3/2	48	264,17	274,00	271,00	273,25	275,50	28,04	32,93	31,25	33,00	34,17	299,83	35,02	45,82	35,63	259,50
2bx	4/4/3/2	48	288,67	299,50	291,50	295,50	300,17	38,92	43,25	41,19	42,56	44,42	394,67	41,00	29,68	32,73	191,83
3ha	4/3/3/4	36	55,67	59,50	58,75	62,00	63,67	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	205,17	35,90	36,40	17,63	194,00
3hx	4/3/3/4	36	61,17	64,25	61,50	63,75	66,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	195,83	24,20	21,40	17,87	408,17
3ba	4/3/3/4	36	59,00	69,25	63,50	64,00	63,67	3,50	6,75	4,82	4,80	5,46	212,00	30,80	27,36	19,93	193,00
3bx	4/3/3/4	36	63,83	71,25	66,00	70,75	68,50	6,63	8,00	7,07	7,82	8,83	458,67	20,70	18,27	9,47	240,83
4ha	4/6/3/4	72	179,83	189,00	185,25	187,50	204,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,96	198,17	56,20	67,32	40,32	455,17
4hx	4/6/3/4	72	196,00	203,00	200,25	202,50	212,83	1,46	4,31	4,07	3,94	8,67	150,67	73,40	58,72	43,17	719,00
4ba	4/6/3/4	72	181,33	191,33	185,25	190,00	205,50	21,79	26,81	25,94	25,56	33,29	344,50	57,12	53,89	34,28	364,00
4bx	4/6/3/4	72	195,67	207,50	204,25	206,50	216,50	27,58	33,94	30,43	32,44	39,13	271,83	65,70	56,12	40,70	393,50
5ha	6/4/4/4	96	181,83	190,00	187,50	190,00	230,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	176,00	86,00	137,40	81,70	520,50
5hx	6/4/4/4	96	208,33	219,75	213,25	218,50	246,33	0,00	0,00	0,00	0,00	5,08	299,67	82,30	101,50	82,60	632,83
5ba	6/4/4/4	96	192,00	203,00	190,75	198,25	225,50	1,72	4,63	1,76	2,71	11,25	197,67	82,35	77,37	53,36	714,83
5bx	6/4/4/4	96	214,33	228,25	230,50	228,50	246,17	6,81	13,71	11,29	13,33	20,81	590,00	87,40	112,10	83,04	603,00
6ha	4/6/4/8	96	83,17	90,33	87,75	94,25	110,83	0,04	0,38	0,00	0,38	8,04	188,33	101,70	78,42	48,71	1118,83
6hx	4/6/4/8	96	98,00	102,25	101,00	105,40	116,00	1,17	2,32	1,94	3,35	10,96	259,17	95,90	71,26	67,42	818,67
6ba	4/6/4/8	96	88,67	97,75	93,75	97,40	102,83	10,88	14,50	11,88	13,65	23,21	268,00	64,10	46,29	34,10	917,17
6bx	4/6/4/8	96	98,17	103,50	101,75	102,00	118,33	14,29	18,70	16,50	16,81	29,54	348,00	76,40	63,50	48,25	488,50
7ha	4/6/6/8	144	122,33	139,25	130,00	137,50	158,00	0,42	5,44	2,00	3,88	14,29	486,83	165,00	161,60	101,00	1256,67
7hx	4/6/6/8	144	138,00	153,75	149,50	161,00	178,67	4,13	10,88	7,19	11,40	26,08	1134,50	147,00	196,27	111,51	1713,17
7ba	4/6/6/8	144	129,33	144,00	134,75	138,75	161,00	14,83	24,25	18,87	21,00	37,25	487,33	151,00	165,90	112,90	1464,67
7bx	4/6/6/8	144	144,83	154,50	154,25	157,25	185,67	23,67	33,19	30,50	31,82	51,54	835,67	151,50	154,14	119,41	1653,17
8ha	6/6/6/8	216	179,33	192,75	181,00	195,50	215,67	0,00	0,00	0,00	0,56	21,56	1114,50	334,00	381,20	217,49	2460,50
8hx	6/6/6/8	216	203,83	224,75	210,25	221,00	249,17	1,17	11,04	2,04	4,25	31,47	1155,83	315,75	398,42	251,27	3105,33
8ba	6/6/6/8	216	196,50	218,75	203,00	213,00	250,50	15,03	30,92	22,29	25,54	50,89	1646,50	268,25	472,52	232,59	3522,00
8bx	6/6/6/8	216	221,50	238,00	237,00	240,50	268,33	29,81	41,46	36,21	38,92	58,56	1846,83	309,50	426,22	333,27	5303,33
9hx	6/3-5/2-4/5	70	113,50	121,00	122,00	120,00	127,00	1,44	3,59	2,90	2,13	6,42	539,00	342,50	42,69	34,05	473,83
10hx	5/3-5/2-5/5	60	82,50	86,00	87,25	89,25	96,00	0,03	0,35	0,00	0,15	0,00	439,17	256,00	32,50	22,96	562,50
11hx	6/2-4/2-4/4	50	135,67	146,00	139,25	143,80	141,17	0,64	3,04	1,71	2,38	1,86	486,67	93,60	40,80	25,90	706,67
12hx	9/1-3/2-3/4	40	76,67	81,00	78,23	78,75	79,50	0,74	1,00	1,07	0,86	0,70	468,67	302,60	36,32	19,36	530,83
Ortalama			155,46	164,31	160,40	164,30	176,87	9,46	13,60	11,76	12,71	18,88	464,56	113,69	103,28	68,26	918,22

Alg-A	Önerilen Algoritma (Deney Tasarımı)	**Alg-A_{d2}**	Önerilen Algoritmanın gelişme olmayan iterasyon sayısı kuralı değiştirilmiş hali (30-30-30-30/2-2)
Alg-A_d	Parametre değerleri azaltılmış Onerilen Algoritma (4-4-4-4/2-2)		
Alg-B	Rassal Tavlama Benzetimi	**Alg-A_{d3}**	**Alg A_{d2}**'nin parametre değerleri azaltılmış hali (10-10-20-20/2-2)

Azaltılan parametre değerleri, araştırmanın derinlemesine yapılmasını engellediği için beklendiği gibi sonuçları kötüleştirmiştir. Yayılma süresi ortalaması, 155,46'dan 164,31'e; ortalama sipâriş teslim gecikmesi ortalaması 9,46'dan 13,6'ya yükselmiştir. Alg A_d, rassal TB algoritmasına göre çok daha iyi sonuçlar üretirken, ortalama CPU işlem süreleri ise 2 dakikanın altına düşmüştür. 200 işlemi aşan 8 serisi problemlerde 300 saniyenin altında mâkul çözümler elde edilmesi, algoritmanın uygulanabilirliğini de güçlendirmektedir. Ortak ürünleri içeren problem 9, 10, 11 ve 12'de, CPU işlem süreleri diğer problemlere göre daha az azalmıştır. Bunun en önemli nedeni, önerilen algoritmanın iterasyonlar sırasında bir çözümü değerlendirirken en iyi çözümle aynı değeri elde ettiğinde gelişme olmayan iterasyon sayacını sıfırlamakta olmasıdır. Bu özellik, ortak ürünlerin olduğu problemlerde aynı çözümlerin yeniden ziyaret edilmesine neden olabilmektedir.

Alg A_{d2} ve Alg A_{d3}'de, Alg A_d'de karşılaşılan performans kaybını gidermek için farklı bir yaklaşım uygulanmıştır. En iyi çözüm değerinin aşılması durumunda, gelişme olmayan iterasyon sayacı sıfırlanmaktadır. Alg A_{d2}'de parametre değerleri 30-30-30-30/2-2 seçilerek önerilen algoritma çalıştırılmış ve tüm problemler çözülmüştür.

CPU işlem sürelerinin Alg A_d'ye göre azalması, çözüm sürelerinin ne kadar kısa olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda gerek yayılma süresi gerekse ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi Alg A_d'ye göre çok daha iyidir. Elde edilen sonuçların deney tasarımı ile parametrelerin belirlendiği duruma çok yakın olduğu görülmektedir. Alg A_{d3}, Alg A_{d2}'nin parametre değerleri düşürülmüş hâlidir. Elde edilen değerler, beklendiği gibi Alg A_{d2}'den daha kötüdür ancak Alg A_d'ye göre daha iyidir. CPU işlem süreleri Alg A_d'nin sürelerinin yarısıdır (Ortalama 1 dakika). Özellikle 9-12 problemlerinde CPU işlem sürelerindeki büyük düşüş dikkat çekicidir.

5.3.3 Çıkarımlar

36 problemin sonuçları incelendiğinde problemlerin tümüne yakınında, önerilen algoritmanın, rassal TB algoritmasına göre gerek yayılma süresi, gerek ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi, gerekse uyum değeri sonuçlarına göre %5 önem düzeyinde çok daha iyi sonuçlar ürettiği kanıtlanmıştır. Önerilen algoritmanın, yayılma süresini azaltmakta gösterdiği başarı, doğal olarak ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin de azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Önerilen algoritma, işlemlerin "ortalama hazırlık süresi ve işlem süresi toplamını" azaltarak, performans ölçütlerini enküçüklemeye çalışmaktadır. Elde edilen ortalama hazırlık süresi ve makina hızı istatistikleri de bu amaca ulaşıldığını ve aynı zamanda

performans ölçütlerinin de daha hızlı ve daha iyi enküçüklendiğini göstermektedir. Bu amaçlarda başarılı olan önerilen algoritma, aynı zamanda tek işlem yer değiştirme algoritması ile makina yüklerini dengelemektedir. Takas algoritması ile dengelenen makinalarda, birbirine benzer özelliklere sahip işlemler takas edilerek makina yük dengeleri bozulmadan "hazırlık ve işlem süreleri toplamı" düşük yerleştirmeler gerçekleştirilmektedir. Bu özellikler gösteriyor ki önerilen algoritma, performans ölçütlerini enküçüklerken problemlere salt bir yönden bakmamaktadır. Gerek Algoritma 3 ve 4'ün farklı özellikleri kullanılarak, gerek TB algoritmalarının göreceli kötü çözümleri kabul etmesiyle yerel en iyi çözümden kaçmak olanaklı olmaktadır.

Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması için yayılma süresi, ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi, ortalama hazırlık süresi ve makina hızları istatistiklerinin Anova sonuçları Çizelge 5.17'de tablo hâlinde gösterilmiştir. İşlem sayısı artışı yâni problem boyutunun büyümesi durumunda, önerilen algoritma-rassal TB algoritması performans farkı hızla artmaktadır. Aslında bu durum literatür çalışmalarında diğer yazarlar tarafından gözlenmiştir. Bu nedenle sonuçlar şaşırtıcı değildir. Ancak aynı durum, literatürdeki birçok algoritma için de geçerlidir. Sıraya bağlı hazırlık süresi içermeyen ESTÇP'lerde bile yazarlar, 80 işlemi geçen problemleri incelememiştir. Bu nedenle 200 işlemi geçen sıraya bağlı hazırlık süresinin sözkonusu olduğu problemlerimizde rassal TB algoritmasının sonuçları kabul edilebilir düzeydedir.

Çizelge 5.17 : Önerilen algoritma - rassal TB algoritması performans farkının parametre bâzında değişimi.

Önerilen Algoritma - Rassal TB Algoritması Performans Farkı				
Ölçüt / Faktör	**İşlem Sayısı**	**Makina Sayısı**	**Hazırlık Süresi**	**Gecikme Oranı**
Yayılma Süresi	+	+		
Ortalama Sipâriş Teslim Gecikmesi Süresi	+			+
Ortalama Hazırlık Süresi	+		-	-
En Hızlı Makinalara Atama	+			

İncelenen problemlerde makina sayısı arttığında işlem sayısı da artmaktadır. Ancak makina sayısı arttığında yayılma süresi performans ölçütünde 0,05 önem düzeyinde fark varken, ortalama sipâriş teslim gecikmesinde 0,05 önem düzeyinde fark olmaması dikkat çekicidir. Makina sayısı arttığında yayılma süresi artışının ortalama sipâriş teslim gecikmesine yansımamasının ana nedeni, artan makina alternatiflerinin, teslim gecikmelerini azaltabilecek daha fazla lokasyonu sunmasına bağlanabilir. 4 makinalı bir problemde bir işlem için 4 lokasyon varken, 8 makinalı problemde alternatifler 8 lokasyona çıkabilmektedir. Sipâriş teslim gecikmelerinin

enküçüklenmesi için daha çok lokasyonun bulunması, rassal aramada iyi çözümlerin daha rahat elde edilmesini sağlayabilmektedir.

Belki de en ilginç sonuçlar, ortalama hazırlık süresi için gerçekleştirilen Anova analizinde elde edilmiştir. Artan hazırlık süresi ve geciken sipâriş oranı, önerilen algoritma-rassal TB algoritması ortalama hazırlık süresi farkını, 0,05 önem düzeyinde azaltmaktadır. Ancak ortalama sipâriş teslim gecikmesine göre performans farkı, artan geciken sipâriş oranında 0,05 önem düzeyinde artmaktadır. Sunulan problemde, en iyi sonucun elde edilebilmesi için ortalama hazırlık süresinin azaltılması, işlemlerin en hızlı makinalara yüklenmesi ve sipâriş teslim tarihlerine uygun yerleşimin sağlanması gerekmektedir. Rassal TB algoritması ortalama hazırlık süresini azaltıyorsa ve en hızlı makinalara yükleme istatistiğinde 0,05 önem düzeyinde bir fark yoksa sipâriş teslim tarihlerine göre yerleşimde sorun olması beklenebilir. Önerilen algoritma, gerek tek işlem yer değiştirme, gerekse takas algoritmasında sipâriş gecikmelerini etki analiziyle kontrol etmektedir. Eğer “yeri değiştirilen bir işlemin hazırlık süreleri ve işlem süresi toplamı” değerini enküçüklemek sipâriş gecikmelerini arttırıyorsa, hazırlık süresi ve işlem süresi toplamıyla sipâriş gecikmesi toplamı arasında bir ödünleşme noktası aranarak uyum değerinin gelişimi amaçlanmaktadır. Yâni gerektiği zamanlarda hazırlık süresi ve işlem süresi toplamını eniyilemek ikinci plâna atılmaktadır. Bu değişken karar verme mekanizması ile ortalama sipâriş teslim gecikmesi de enküçüklenmeye çalışılmaktadır.

Önerilen algoritmanın parametre değerlerinin azaltılması, performansının azalmasına neden olmaktadır. Ancak performans kaybı kabul edilebilir düzeylerdedir. Özellikle CPU işlem sürelerinde yaşanan büyük düşüş de dikkate alındığında, performans kaybının önemsiz olduğu düşünülebilir.

Önerilen algoritmanın gelişme olmayan iterasyon sayısını arttırma kuralında yapılan değişikliğin de CPU işlem sürelerini etkilediği, yapılan denemelerde görülmüştür. En iyi çözümden daha iyi çözümlere ulaşılması durumunda sayacın sıfırlanması, CPU işlem sürelerini azaltmaktadır. Ancak parametre değerlerinin yükseltilmesi durumunda deney tasarımı kullanılarak elde edilen en iyi sonuçlara yaklaşılırken, CPU işlem süreleri de yükselecektir. Bu nedenle mâkul çözümlerin düşük CPU işlem sürelerinde elde edilmesi amaçlanıyorsa durdurma ölçütünde bu değişiklik kullanılabilir.

5.4 Gerçek Uygulama

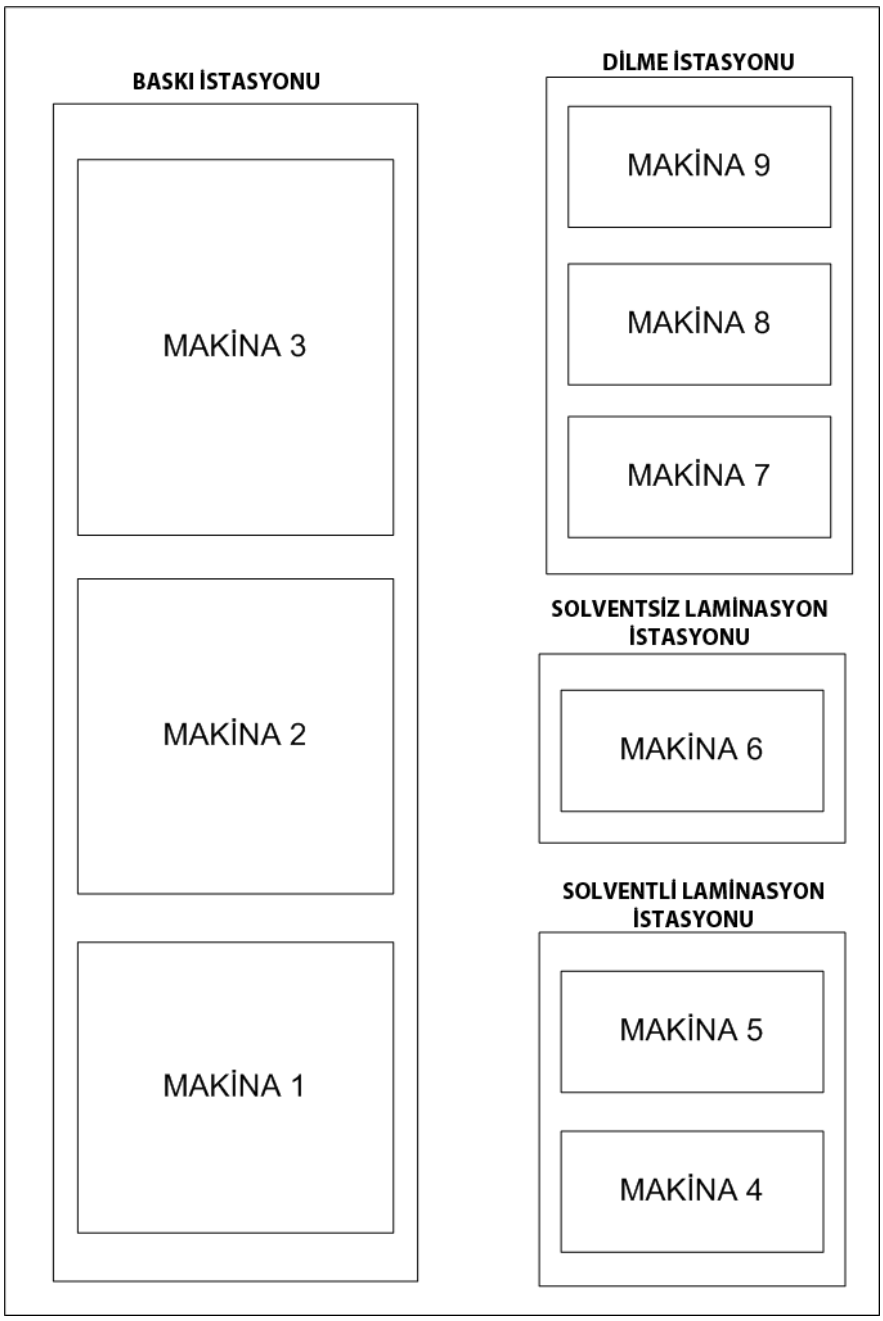
5.4.1 Giriş

Önerilen algoritmanın, gerçek bir üretim ortamında performansının irdelenmesi için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Esnek sipâriş tipi üretim ortamınına ve paralel işleme özelliğine sahip bir ambalaj tesisinin verileri kullanılarak, önerilen algoritmanın sonuçları, fabrika üretim plânlama programı ve rassal TB algoritmasının ürettiği sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Öncelikle bu çalışma kapsamında üretim ortamının özellikleri kısaca aktarılacaktır. Ardından üretim ortamının ve fabrika plânlama programının özelliklerinden dolayı önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasında yaşanan sıkıntılar sunulacak ve bu sorunlara getirilen çözümler veya yapılan kabuller ifâde edilecektir.

5.4.2 Uygulama yapılan yerin ve sürecin özellikleri

Uygulama çalışmasına konu olan ambalaj fabrikasında toplam 15 makina bulunmaktadır. Ancak gerek mevsimsellik (iş hacminin azlığı), gerekse yaz aylarında kullandırılan operatör izinleri ve bâzı makinalarda yaşanan kalite sorunları nedeniyle toplam 9 makina çalıştırılmaktadır. Fabrikada toplam 5 istasyon bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla baskı, solventli laminasyon, solventsiz laminasyon, dilme ve ambalajdır. Şekil 5.10'da uygulama çalışmasına konu olan istasyonlar ve makinalar görülmektedir. Ambalaj istasyonu, bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Ambalaj istasyonunda toplam 1 makina vardır. Fakat kapasitesi, fabrikanın gereksinimi olan kapasitenin çok üstünde olduğu için, bu istasyonun fabrika performansına etkisi ihmâl edilmiştir.

Baskı istasyonunda film üzerine müşterinin talep ettiği tasarıma uygun şekilde baskı yapılmaktadır. Makinalar yüksek teknoloji ürünü olduğu için otomasyon yaygındır. Bu nedenle boyu 10 metreye yaklaşan baskı makinalarını iki operatör kullanabilmektedir. Genelde iş geçişlerinde bu operatörler, aktif görev almaktadır. İş geçişleri yaklaşık olarak 30 dakika sürmektedir. Baskı onayı alınmasıyla hazırlık süresi tamamlanmaktadır. Baskı onayıyla birlikte hazırlık süreleri, tahmînen 50-60 dakika sürmektedir. Fabrika çizelgeleme programında, aynı ürünü içeren sipârişlerin baskıları arka arkaya yapılırsa hazırlık süresi 0; farklı ürünlerin baskıları arka arkaya yapılırsa hazırlık süresi 60 dakika kabul edilmiştir. Baskı istasyonunda toplam üç makina bulunmaktadır. 3. makina diğer tüm makinalardan daha hızlıdır. 1. ve 2. makina aynı özelliklere sahip olsa da operatörlerin bâzı baskı türlerinde uzmanlaşmış olmasına bağlı olarak hızları, farklılık göstermektedir. Bu nedenle üç makinanın da genelde işlem hızları farklılık göstermektedir.



Şekil 5.10 : Fabrikada bulunan makinaların ve istasyonların krokisi.

Solventli laminasyon istasyonunda iki film, tutkalla yapıştırılarak birleştirilmektedir. Bâzen bu birleştirme işleminde baskıdan gelen filmle başka bir film; bâzen de işlenmemiş iki farklı film birleştirilebilmektedir. Solventli laminasyon istasyonunda toplam üç makina bulunmaktadır. Ancak gerek azalan iş yükü gerekse operatörlerin yıllık izinleri nedeniyle toplam iki makina çalıştırılmaktadır. Makina 4 ve 5 birbirinden farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle hızları da farklıdır. Ancak bâzı işleri makina 4

hızlı yaparken; bâzı işleri de makina 5 hızlı yapmaktadır. Bir makina diğerinden yavaş değildir.

Solventsiz laminasyon istasyonunda solventli laminasyonda olduğu gibi iki film tutkalla yapıştırılarak birleştirilmektedir. Kullanılan tutkalın yapısı nedeniyle (solventsiz) tümüyle ayrı bir makinanın kullanılması gerekmektedir. Genelde yeni gıda güvenliği yasaları, solventsiz laminasyonun kullanımını teşvik etmektedir. Solventsiz laminasyon istasyonunda toplam iki makina bulunmaktadır. Ancak makinalardan biri, kalite sorunları nedeniyle kullanılmamaktadır. Ayrıca makina 6, yüksek kapasiteli bir makina olduğu için 2. solventsiz laminasyon makinasının çalıştırılmasına gereksinim duyulmamaktadır.

Dilme istasyonunda basılan veya lamine edilen malzemeler küçük bobinlere bölünmektedir. Bu istasyonda toplam altı makina vardır. Ancak üç makinayı çalıştırabilecek operatör olduğu için istasyonda toplam üç makinanın bulunduğu kabul edilmiştir. Dilmeden çıkan bobinler ambalajlanarak depoya geçmektedir. Ambalaj istasyonu, yüksek kapasitesi nedeniyle dikkate alınmamıştır.

Fabrikada üretim akışları, değişkenlik göstermekle birlikte genelde baskı-laminasyon (solventli veya solventsiz)-dilme şeklinde gerçeklemektedir. Ancak bu rotayı izlemeyen çok sayıda ürün de bulunmaktadır. Bu nedenle esnek sipâriş tipi çizelgeleme problemi yapısına uygundur. Bu çalışmaya konu olan problemde, her makinanın her işlemi gerçekleştirmeye yetkin olduğu kabul edilmiştir. Uygulamaya konu olan fabrikada, makina gruplarından istasyonlar oluşturulmuştur. Farklı istasyondaki makinalar, diğer istasyondaki makinaların işlemlerini gerçekleştirememektedir. Bu nedenle uygulama probleminde kısmî esneklik sözkonusudur.

Fabrikada paralel yapılan işlemler, sürecin özelliği gereği biraz farklıdır. Örneğin baskıda bir ürün basılırken diğer makinaya geçebilmesi için 9.000 metre üretilmesi gerekmektedir. 9.000 metre, bir bobinin maksimum taşıyabileceği miktardır. 9.000 metreyi geçtiği zaman bobin, diğer makinalara takılamamaktadır. 9.000 metreye ulaşan bobinlerin artı yönde toleransı olmadığı için bir bobin 8000 metreye ulaştığında makinadan indirilmektedir. Fabrika çizelgeleme programı da transfer miktarını 8.000 metre kabul etmiştir.

Fabrikada bâzı işlemler tamamlandıktan sonra diğer işleme geçebilmek için bekleme sürelerini doldurmaları gerekmektedir. Örneğin laminasyon faaliyeti tamamlanır tamamlanmaz dilmeye geçilmesi için 12 saat beklemesi gerekmektedir. Bu aşamaya kürleşme denilmektedir. Kürleşme ile ambalajdan zararlı maddelerin

atılması ve ambalaj bağ yapısının güçlendirilmesi sağlanmaktadır. Ancak kürleşme süresi, bâzı durumlarda ihmâl edilebilmektedir.

Fabrika, sipâriş bazlı çalışmaktadır. Bu nedenle belirli dönemlerde iş yükleri artarken belirli dönemlerde de üretim yavaşlamaktadır. İş yükleri azaldığı dönemlerde makina bakımları yapılmaktadır.

Fabrika haftada 5 gün, 08:00-17:00 saatleri arasında çalışmaktadır. 12:30-13:30 arasında yemek arası verilmektedir. Çalışmanın yapıldığı dönemde resmî tatil yoktur.

5.4.3 Uygulama yapılan yerin ve sürecin özelliklerinin önerilen algoritmaya uyarlanması

Önerilen algoritmanın kabulleri, uygulamaya konu olan ambalaj fabrikasının bâzı özellikleriyle tam olarak uyuşmamaktadır. Bu bölümde, karşılaşılan sorunlar ve bunlara getirilecek çözümler aktarılacaktır.

1. Uygulamaya konu olan ambalaj fabrikası istasyonlara ayrılmıştır. Bir işlemi salt ilgili istasyondaki makinalar gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle kısmî esneklik sözkonusudur. Önerilen algoritmada tüm işlemler, tüm makinalarda gerçekleştirilebilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için işlem süreleri matrisinde bir işlemi gerçekleştiremeyecek istasyona ait makinaların işlem sürelerine 10.000 gibi büyük bir değer girilmektedir. Ancak ilk çözüm oluşturulurken rassal yükleme ve sıralama yapan önerilen algoritmanın, işlemlerin gerçekleştirilemeyeceği makinalara yükleme yapması engellenmelidir. Bu nedenle ilk çözüm oluşturulurken ilgili işlemi gerçekleştirebilecek istasyondaki makinalardan birine rassal yükleme yapılacaktır. Bu değişiklik ile, olumlu etkisi olmayacak arama alanları kısmen azaltılsa da tek işlem yer değiştirme ve takas TB algoritmalarının komşu çözüm araştırma yönergeleri istasyon yapısına uygun şekilde değiştirilmediğinden, CPU süreleri gereksiz uzayacaktır. Ancak Algoritma 3 ve 4'ün akıllı arama yönergeleri, işlemleri yüklenemeyecek istasyonlara atamayacaktır.
2. Uygulamaya konu olan ambalaj fabrikasında sipârişler ton ile ifâde edilmektedir. Ancak iş emirleri metre ile verilmektedir. Reçetelerde kg-metre dönüşümleri yapılmaktadır. Bu durum, paralel işlemede önemli bir soruna neden olmaktadır. Fabrikada 8.000 metrede bir bobin, diğer makinaya geçebilmektedir. Ancak 1 ton, filmin kalınlığına bağlı olarak 5.000 metre de olabilir 40.000 metre de olabilir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için sipârişin kaç metre olduğu belirlenerek transfer miktarı olan 8.000 metreye bölünmektedir. Eğer elde edilen

değer 1'den küçükse 1 kabul edilecek; aksi durumda bir üst sayıya yuvarlanacaktır. Elde edilen değer ilgili üründen talep edilen yeni sipâriş miktarı olacaktır. Ayrıca ilgili sipârişin ürünü için hayalî reçete oluşturularak işlem süreleri de değiştirilecektir.

3. Çalışmanın yapıldığı dönemde fabrikada toplam 21 sipâriş, 34 ürün, 162 işlem bulunmaktaydı. Ancak bu sipârişlerin ve ürünlerin bir kısmının üretimine başlandığı için üretime başlanan sipârişler, plânlanacak sipârişlerden çıkarılmıştır. Geriye kalan 14 sipâriş, 20 ürün, 98 işlem plânlanacaktır.
4. Fabrika üretim plânlama programı, haftanın günleri ve saatleri şeklinde üretim plânı vermektedir. Önerilen algoritma ise birim zaman aralığını kullanmaktadır. Ortak bir Gantt diyagramı yapısı elde etmek için, fabrika üretim plânlama programının üreteceği çizelge, birim zamana (dakika) dönüştürülecektir.
5. Ambalaj istasyonunda işlemlerde iş-kesme sözkonusudur. Önerilen algoritmada ve fabrika üretim plânlama programında iş-kesme dikkate alınmamaktadır. Ancak fabrikada ambalaj istasyonunun kapasitesi çok yüksek olduğu için fabrika plânlama programında da ambalaj bölümü işlemleri plânlansa da dikkate alınmamaktadır. Fabrika plânlama programında ambalaj hızları, normal hızlarına göre 100 kat arttırılarak, diğer makinaları etkilemesi engellenmiştir.
6. Önerilen algoritmada bir işlem tamamlanır tamamlanmaz diğer makinaya geçebilmektedir. Ancak uygulama yapılan fabrikada kürleşme adı verilen zorunlu bir bekleme süresi sözkonusudur. Kürleşme sürelerinin ortadan kaldırılması için plânlama programında yeni oluşturulan hayalî reçetelerde kürleşme süreleri 0 olarak değiştirilmiştir. Böylece bekleme kısıtı ortadan kaldırılmıştır.

5.4.4 Uygulama çalışmasına konu olan problemin özellikleri

Bu bölümde ambalaj sektöründe gerçekleştirilen uygulama çalışmasına konu olan problemin özellikleri aktarılacaktır. Toplam 98 işlemden oluşan 14 sipârişte, çok sayıda ürün talep edilmektedir. Toplam 20 ürün, çizelgelenecektir. Ancak bâzı ürünler birden çok sipârişte bulunabilmektedir (Çizelge 5.18). Genelde ürünlerin, önce baskı istasyonunda ilk işlemi gerçekleştirilmektedir. Baskı istasyonundan sonra sırasıyla solventli veya solventsiz laminasyon ve dilme istasyonlarına uğramaktadır. Ancak bu düzene uymayan çok sayıda da ürün bulunmaktadır. Örneğin solventli laminasyon-baskı-dilme rotası da sıklıkla kullanılmaktadır (Çizelge 5.19). Uygulamaya konu olan fabrikada genelde aynı müşteriler sipâriş vermektedir. Bu müşteriler, farklı sipârişlerinde sıklıkla aynı ürünleri talep edebilmektedir. Farklı sipârişlerin aynı ürünleri makinalarda arka arkaya işlenirse hazırlık süreleri sıfır

olacaktır. Bu nedenle üretimde de genelde benzer ürünlerin arka arkaya işlenmesi yeğlenmektedir. Fabrika çizelgeleme programı da bu düşünceye uygun bir şekilde

Çizelge 5.18 : Uygulama çalışmasında çizelgelenecek problemin özellikleri.

Sipariş Sayısı	Ürün Sayısı	Toplam İşlem Sayısı
14	20	98

Çizelge 5.19 : Ürünlerin istasyonlardaki akışları.

Ürün No	Akış			
1	Baskı	Dilme		
2	Baskı	Solventli Laminasyon	Dilme	
3	Solventli Laminasyon	Baskı	Dilme	
4	Baskı	Dilme		
5	Baskı	Solventli Laminasyon	Solventli Laminasyon	Dilme
6	Baskı	Solventsiz Laminasyon	Dilme	
7	Baskı	Solventsiz Laminasyon	Dilme	
8	Baskı	Solventsiz Laminasyon	Dilme	
9	Solventli Laminasyon	Dilme		
10	Dilme			
11	Dilme	Baskı	Dilme	
12	Solventli Laminasyon	Dilme		
13	Baskı	Solventsiz Laminasyon	Dilme	
14	Solventli Laminasyon	Baskı	Dilme	
15	Baskı	Solventli Laminasyon	Solventli Laminasyon	Dilme
16	Baskı	Dilme		
17	Dilme	Baskı	Dilme	
18	Baskı	Solventli Laminasyon	Solventli Laminasyon	Dilme
19	Baskı	Solventsiz Laminasyon	Dilme	
20	Baskı	Solventli Laminasyon	Solventli Laminasyon	Dilme

Fabrikada teslim tarihleri girilirken öncelikle müşteriden, istediği teslim tarihi talep edilmektedir. Tüm sipârişler için bu işlem gerçekleştirildikten sonra plânlama programı çalıştırılarak en erken teslim tarihleri belirlenmektedir. Müşteriye geri dönüş yapılmaktadır ve müşteriyle yapılan görüşmeler sonucunda yeni teslim tarihleri sisteme girilmektedir. Böylece aşırı gecikmelerin önüne geçilmektedir. Bu çalışmada teslim tarihleri dakikaya çevrilmiştir. Örneğin 480 dakika, 1 gün sonra teslim edileceğini ifâde etmektedir.

5.4.5 Sonuçlar

Ambalaj fabrikasında gerçekleştirilen uygulama çalışmasında üç farklı algoritmanın performansı sınanmıştır. Önerilen algoritma ve rassal TB algoritması, uygulama problemini Intel core 2 duo 2.66 GHZ işlemcili dizüstü bilgisayar ile çözmüştür. Fabrika plânlama programı ise HP dual-core 3 GHZ işlemcili sunucu (server) ile uygulama problemini çözmüştür.

Önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının parametre değerlerinin belirlenmesi için Matlab R2008a'da deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.20 ve 5.21'de önerilen algoritmanın ve rassal TB algoritmasının hangi parametrelerinin deney tasarımı ile belirleneceği ve deney tasarımı sırasında parametrelerin alabileceği alt ve üst sınır değerler görülmektedir. Uygulama çalışmasında kuramsal çalışmaya göre komşu çözümler arasında uyum değeri farkları daha büyük artış ve azalışlar gösterebileceğinden, sıcaklık değerlerinin alabileceği değerler arttırılmıştır.

Çizelge 5.20 : Önerilen algoritmanın belirlenecek parametre değerleri.

			Alt sınır değer	Üst sınır değer
Tek İşlem Yer Değiştime Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**1**	**100**
	Son sıcaklık	0,7	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**1**	**80**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
Takas Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**0,5**	**15**
	Son sıcaklık	0,05	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**1**	**80**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
DOE	Deney tasarımı ile belirlenecek.			

Çizelge 5.21 : Rassal TB algoritmasının belirlenecek parametre değerleri.

			Alt sınır değer	Üst sınır değer
Yükleme Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**1**	**100**
	Son sıcaklık	0,5	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
Takas Algoritması	İlk sıcaklık	DOE	**1**	**100**
	Son sıcaklık	0,05	**-**	**-**
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	DOE	**5**	**80**
	Geometrik soğuma katsayısı	0,96	**-**	**-**
DOE	Deney tasarımı ile belirlenecek.			

Uygulama problemi, önerilen algoritma, rassal TB algoritması ve fabrika plânlama programıyla çözülmüştür. Çizelge 5.22'de önerilen algoritma ve rassal TB algoritması'nın 6 deneme sonunda elde ettiği en iyi sonuçlar verilmiştir (Şekil D.1-D.3'de algoritmaların elde ettiği en iyi çözümlerin Gantt diyagramları verilmiştir.). Fabrika plânlama programı sonucu ise iki denemenin sonunda elde edilmiştir. Uyum değerine ve ortalama teslim gecikmesi süresine göre sonuçlar en iyiden en kötüye doğru sıralandığında önerilen algoritma, fabrika plânlama programı ve rassal TB algoritması sırası elde etmiştir. Ancak yayılma süresine göre en iyi

sonucu rassal TB algoritmasının elde etmesi dikkat çekicidir. Yayılma süresine göre önerilen algoritma, fabrika üretim plânlama programına göre yine daha iyi sonuç üretmiştir. Fabrika plânlama programı farklı bir işlemci kullandığı için CPU işlem sürelerini karşılaştırmak doğru olmayacaktır. Ancak fabrika üretim plânlama programının çalıştırıldığı sunucunun işlemcisi, diğer algoritmaların test edildiği işlemciden daha hızlıdır. CPU işlem sürelerine göre en kısa zamanda fabrika üretim plânlama programı sonuç elde ederken, önerilen algoritmanın CPU işlem süreleri 948 saniye gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Deney tasarımı için izin verilen parametre değerlerinin yüksek seçilmesi bu duruma neden olmuştur. Ayrıca fabrika üretim plânlama programı, aynı anda çift işlemcisini kullanabilecek şekilde tasarlandığı için, CPU kapasitelerini daha iyi kullanabilmektedir. Çizelge 5.22'de koyu renkle işaretlenen değerler, elde edilen en iyi değeri işaret etmektedir. % $fark_{opt}$ ise en iyi değerle olan farkı ifâde etmektedir.

Çizelge 5.22 : Uygulama probleminde elde edilen en iyi sonuçlar.

		Değer	**% $fark_{opt}$**
Önerilen Algoritma	Yayılma Süresi	6637	0,08
	Ortalama Teslim Gecikmesi Süresi	**36,78**	0
	Uyum Değeri	**8119**	0
	CPU İşlem Süresi (saniye)	948	152,8
Rassal TB Algoritması	Yayılma Süresi	**6632**	0
	Ortalama Teslim Gecikmesi Süresi	164,57	347,44
	Uyum Değeri	13263	63,35
	CPU İşlem Süresi (saniye)	739	97,07
Fabrika Planlama Programı	Yayılma Süresi	6767	2,04
	Ortalama Teslim Gecikmesi Süresi	85,92	133,61
	Uyum Değeri	10229	25,99
	CPU İşlem Süresi (saniye)	**375**	0
% $fark_{opt}$	Elde edilen en iyi değerle olan fark		

Önerilen algoritmanın daha hızlı sonuç üretmesi için Çizelge 5.23'de görülen parametre değerlerinin azaltılması denenmiştir. Parametrelerin değerlerinin belirlenmesi için deney tasarımı yapılmadan parametre değerleri en düşük değerlere yaklaştırıldığında sonuçlar kötüleşmesine rağmen, hâlâ fabrika üretim plânlama programından daha iyi sonuçların üretildiği görülmektedir (Çizelge 5.24). En dikkat çekici kısım ise CPU işlem sürelerinde yaşanan büyük düşüşlerdir. Ortalama 60 saniyede, fabrika üretim plânlama programının 375 saniyede ürettiği sonuçtan daha iyi sonuçların üretildiği görülmektedir.

Çizelge 5.25'de, önerilen algoritmanın gerek ortalama hazırlık süresi gerekse ortalama makina hızı istatistiklerinin diğer algoritmalardan daha iyi olduğu görülmektedir. Paralel yapılan işlem sayılarında, fabrika plânlama programının diğer iki algoritmadan dikkat çekici bir şekilde farklılaştığı görülmektedir. Çözüm olgunlaşmaya yaklaştıkça parelel yapılan işlem sayılarının yavaşça artması, yerel en

iyi çözümde takılmasını engellemektedir. Ancak iyi bir çözüm için paralel yapılan işlem sayısının da yüksek olması gerekirken çok yüksek değerlere ulaşılması ise, çözümün gelişimini engellemektedir. Fabrika plânlama programının paralel yapılan işlem sayısını yeterince arttıramamasının, çözümün gelişmesini engellediği düşünülebilir.

Çizelge 5.23 : Önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının deney tasarımı sonuçları.

Önerilen Algoritmanın Parametre Değerleri			Rassal TB Algoritmasının Parametre Değerleri		
Tek İşlem Yer Değiştime Algoritması	İlk sıcaklık	62	Yükleme Algoritması	İlk sıcaklık	2,2
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	43		Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	80
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	80		Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	80
Takas Algoritması	İlk sıcaklık	57	Sıralama (Takas) Algoritması	İlk sıcaklık	2,4
	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	67		Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	80
	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	80		Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	80

Çizelge 5.24 : Önerilen algoritmanın parametre değerleri azaltıldığında elde edilen sonuçlar.

	Yayılma Süresi	Ortalama Teslim Gecikmesi Süresi	Uyum Değeri	CPU İşlem Süresi (sn)
Deneme 1	6681	65,9	9336	58
Deneme 2	6810	78,5	9973	52
Deneme 3	6749	66,07	9411	49
Deneme 4	6748	71,5	9629	60
Deneme 5	6718	61,14	9181	82
Ortalama	**6741,2**	**68,622**	**9506**	**60,2**
Tek İşlem Yer Değiştirme Algoritması	**Değeri**	**Takas Algoritması**	**Değeri**	
İlk sıcaklık	**18**	İlk sıcaklık	**12**	
Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	**6**	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	**8**	
Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	**12**	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	**10**	

Çizelge 5.25 : Çizelge 5.22'de sunulan sonuçların diğer istatistikleri.

	O. Hazırlık Süresi (dakika)	O. Makina Hızı	P.Y.İ.S
Önerilen Algoritma	35,61	1,51	29
Rassal TB Algoritması	38,82	1,55	30
Fabrika Planlama Programı	37,69	1,53	24
O. Hazirlik Süresi (O.H.S):	Ortalama Hazırlık Süresi: (Hazırlık Süresi Toplamı/(Toplam İşlem sayısı -Makina Sayısı))		
O. Makina Hızı (O.M.H):	Atama yapılan işlemlerin en hızlı kaçıncı makinaya atandığını göstermektedir.		
P. Y. İ. S	Paralel Yapılan İşlem Sayısı		
P. Y. İ. S Oranı:	işlemlerin sayısının toplamı)		

5.4.6 Çıkarımlar

Ambalaj sektöründe gerçekleştirilen uygulama sonuçlarına göre önerilen algoritma, fabrika üretim plânlama programına göre daha iyi sonuçlar üretmektedir. Özellikle yüksek parametre değerlerinde önerilen algoritma, karşılaştırılan algoritmalara göre çok daha iyi sonuçlar üretmektedir. Ancak CPU işlem süreleri hızla artmaktadır. Bu

nedenle düşük parametre setlerinin kullanılması denenmiş ve düşük CPU işlem sürelerine rağmen sonuçların diğer iki algoritmaya göre hala üstün olduğu görülmüştür. Aslında önerilen algoritma ve rassal TB algoritmasının sonuçlarını irdelerken dikkat edilmesi gereken önemli bir ayrıntı bulunmaktadır. Gerek rassal TB algoritması gerekse de önerilen algoritma, istasyon yapısına uygun tasarlanmamıştır. Halbuki fabrika plânlama programı bu özelliği kullanmaktadır. Bu nedenle fabrika üretim plânlama programının CPU işlem süreleri düşmektedir. Önerilen algoritma, komşu çözüm ararken, yüklenemeyecek istasyonlardaki makinaları araştırmaktadır. Ancak bu makinalara etki analizi sonucunda yükleme yapmayacaktır. Yine de yükleme yapılamayacak istasyonları incelemektedir. Eğer algoritmaya istasyon özelliği eklenirse CPU işlem sürelerinin azalması beklenebilir.

Rassal TB algoritması, önceki kuramsal uygulama sonuçlarıyla karşılaştırıldığında önerilen algoritmaya göre daha kötü sonuçlar elde etmiştir. Bunun en önemli nedeni, sipâriş sayısının artmasıdır. Daha önceki kuramsal çalışmalarda, sipâriş sayısı artışı ile işlem sayısı artışı aynı anlama gelmekteydi. Bu nedenle de sipâriş sayısı artışı incelenmemiştir. Ancak bu uygulamada, plânlanan 98 işlem, test edilen kuramsal problemlerin orta ölçekli olanlarına denk gelmektedir. Orta boyutlu problemlerde 6 sipâriş sözkonusu iken, uygulamada 14 sipâriş bulunmaktadır. Özellikle sipâriş sayısı artışı ve kısmî esnekliğin rassal TB algoritmasının performansını, önerilen algoritmaya göre kötü etkilediği bu veriler ışığında söylenebilir. Zâten önceki kuramsal uygulamada da Anova analizi sonuçlarına göre rassal TB algoritmasının, işlemleri sipârişlerin teslim tarihlerine göre yerleştirmede sıkıntı yaşadığı sonucuna ulaşılmıştı. Rassal TB algorimasının çok ölçütlü problemimizde yayılma süresini enküçüklemede her zaman iyi sonuçlara ulaşması da, yayılma süresini enküçüklemede gösterdiği başarıyı onaylarken, sipâriş teslim gecikmesi süresi sonuçları, sipâriş teslim gecikmesi süresini enküçüklemede başarısının kısıtlı olduğunu desteklemektedir.

Önerilen algoritmada düşük parametre değer kümelerinin kullanımıyla yüksek sayıdaki sipârişin planlanması, düşük CPU işlem sürelerinde başarılabilir. Ancak işlem sayısının 200-300'ü geçmesi durumunda algoritmanın performansının da düşeceği dikkate alınmalıdır. Uygulama sırasında çok fazla sipârişin bulunmaması, fabrika plânlama programının artan sipâriş sayısı ve işlem sayısında nasıl sonuçlar ürettiğinin irdelenmesini engellemiştir.

Sonuçlar irdelendiğinde sipârişlerin ortalama teslim gecikmesi süresinin düşük olduğu görülmektedir. Fabrika, gelen sipârişleri hemen plânlama programına girdi olarak sunmamaktadır. Öncelikle plânlama bölümü, müşteriye verebileceği en erken

teslim tarihini bildirmektedir ve müşteriden gelen bilgiler ışığında teslim tarihleri belirlenmektedir. Bu nedenle de varolan sipârişlerin teslim tarihi sıkılığı gevşektir. Eğer teslim tarihleri sıkı olsaydı sonuçların da daha farklı olması beklenebilirdi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne sahip paralel işlemeli Tip 2 ESTÇP'de "yayılma ve ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi" ağırlıklı toplamının enküçüklenmesi amacıyla yeni bir metasezgisel algoritma önerilmiştir. Literatür araştırması sonucunda sipâriş-ürün ikilisine odaklanan MSÇP'leri ve ürün-işlem ikililerine odaklanan Tip 2 ESTÇP'leri içeren çok sayıda çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalarda sipâriş-ürün ikilisi olan MSÇP'lerde öncelik ilişkisi yapısının aranmadığı görülmüştür. Tip 2 ESTÇP'lerde ise sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne sahip problemlerin bulunmadığı saptanmıştır.

Bölüm 3'de, incelenen problemin matematiksel formülasyonu oluşturulmuştur. Zorluğu yüksek problem, kısa CPU işlem sürelerinde matematiksel programlama ile çözülemeyeceğinden, literatürde sıklıkla kullanılan metasezgisel yöntemlere başvurulmuştur. Fattahi'nin çok sayıda makalesinde kullandığı TB metasezgiseli, gerek basitliği gerekse ESTÇP çalışmalarında sıklıkla kullanılması nedeniyle yeğlenmiştir. Literatürde ESTÇP'nin bünyesinde barındırdığı yükleme ve sıralama iki alt problemi birlikte veya birbirinden bağımsız çözülebilmektedir. Özellikle bu kararın, çözümün kalitesini etkilediğine dikkat çekilmektedir. Ancak hangi yöntembiliminin daha iyi sonuç ürettiği, literatür sonuçlarına göre net değildir. Dauzere-Peres ve Paulli (1997) ve Mastrolilli ve Gambardella (1999), çalışmalarında bütünleşik yöntembiliminin daha iyi sonuçlar ürettiğini belirtirken Fattahi ve diğ. (2007) ise hiyerarşik ve bütünleşik yöntembilimini veri kümelerinde sınamış ve hiyerarşik yöntembiliminin daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Bütünleşik yöntembiliminin literatürde daha iyi sonuçlar ürettiğine olan inancın daha baskın olması ve yapılan denemelerin bu durumu teyit etmesi, önerilen algoritmada bütünleşik yöntembiliminin yeğlenmesine neden olmuştur. Ancak literatürde bütünleşik yöntembilimli algoritmalar, tek bir TB algoritması kullanırken, bu çalışmada iki farklı TB algoritması hiyerarşik yapılanmayla kurgulanmıştır. Hiyerarşide en üstte yer alan tek işlem yer değiştirme algoritması ile bir işlem, farklı bir lokasyona atanmaktadır. Hiyerarşide ikinci sırada yer alan takas algoritması ise iki işlemi birbiriyle takas etmektedir. Her iki algoritma da bütünleşik yöntembilimini kullanarak işlemlerin aynı anda hem yüklemesine hem de makinadaki sıralamasına karar verebilmektedir. Artan komşuluk alternatiflerinin, yakınsama hızının

azalmasına neden olmaması için etki analiziyle komşu çözümlerden en iyilerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Etki analiziyle yeri değiştirilen işlemin “atandığı lokasyonun önündeki işlem ve arkasındaki işlemle olan hazırlık süreleri toplamı” ve “yeri değiştirilen işlemin yüklendiği makinadaki işlem süresi” toplamı enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca sipârişlerin teslim gecikmesi süresini varolan durumdan daha fazla arttırmayacak lokasyonların araştırılması sağlanmaktadır. Böylece ilerleyen iterasyonlarda sipâriş teslim gecikmesi süresi, kademeli olarak azalırken, hazırlık süreleri ve işlem süreleri toplamı da izin verilen arama alanları araştırılarak azaltılmaktadır. Bunun yanında tek işlem yer değiştirme algoritması ile gerek makina yüklerinin gerekse de makina yayılma sürelerinin dengelenmesi sağlanmaktadır.

Bölüm 4’de, önerilen algoritmanın diğer paket programlarla çalışma sistematiği aktarılmış ve problemlerin veri giriş ekranlarının nasıl oluşturulacağı anlatılmıştır. Sipâriş-ürün-işlem üçlüsüne sahip veri kümesinin literatürde bulunmaması nedeniyle 36 problem oluşturulmuş ve bu problemler Fattahi’nin rassal TB algoritması ve önerilen algoritmayla çözülmüş, sonuçları karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritmanın, karşılaştırılan rassal TB algoritmasına göre performansının, istatistiksel analizler sonucunda üstün olduğu görülmüştür. Özellikle ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresinin azaltılmasında önerilen algoritmanın rassal TB algoritmasına göre başarısı dikkat çekicidir.

Ambalaj sektöründe gerçekleştirilen uygulamada ise fabrika plânlama programına göre kısa CPU işlem sürelerinde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak deney tasarımı ile belirlenen parametre değerleri kullanıldığında, çok daha iyi sonuçlara, yüksek CPU işlem sürelerinde ulaşılmıştır. Düşük parametre değerlerinin kullanımıyla, kabul edilebilir düzeyin üstünde performansın elde edilmesi dikkat çekicidir. Algoritmanın bu özelliği, parametre değerlerini belirlemek için deney tasarımının kullanılmasının zorunlu olmadığını göstermektedir.

Sunulan çalışmada birçok yenilikçi özellik bulunmaktadır. Bu çalışmada literatüre sunulan yenilikler, aşağıda maddeler hâlinde özetlenmiştir.

1. ESTÇP literatürü, henüz diğer çizelgeleme problemleri kadar geniş değildir. Özellikle klasik sipâriş tipi çizelgeleme problemlerinden daha zor olması ve bilgisayar hesaplama kapasitelerinin problemin çözümünde yeterli hızlara yeni ulaşması, literatürün kısıtlı kalmasına neden olmuştur. Bu çalışmada sipâriş-ürün-işlem üçlüsünü içeren sıraya bağlı hazırlık süreli paralel işlenebilen

işlem özelliğine sahip ESTÇP oluşturulmuştur ki, literatürde bu özelliklere sahip ilk problemdir.

2. Oluşturulan problemin matematiksel modeli literatüre sunulmuştur.
3. Literatürde ESTÇP'de, yükleme ve sıralama problemleri aynı anda veya sırayla çözülerek en iyi sonuç elde edilmeye çalışılırken, burada sunulan çift katmanlı TB algoritmasının her iki algoritması da, hem yükleme hem de sıralama yapabilmektedir ki, bu özelliğiyle literatürden ayrışmaktadır. Literatürdeki çift katmanlı TB algoritmaları, yükleme ve sıralamayı ayrı ayrı gerçekleştirirken, her iki problemi birlikte çözen algoritmalar, tek katmanlı algoritmalardır.
4. Önerilen TB algoritmasının arama alanını daraltan yeni iki sezgisel algoritma sunulmuştur.
5. Ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi ve yayılma süresi toplamının enküçüklenmesinde kritik yol kavramı, yerel araştırma algoritmalarının komşu çözümlerinde kullanılmaktadır. Literatürde genelde yayılma süresinin enküçüklenmeye çalışıldığı problemlerde karşılaşılan kritik yol kavramı, sipâriş teslim gecikmesini de içerecek şekilde değiştirilmiştir. Ayrıca işlem seçimlerinde kritik yol kullanımının neden olduğu yerel en iyi çözüme takılma olasılığının azaltılması için, reddedilen çözümün kritik yolunun kullanılması da literatürde ilk kez denenmiştir.
6. Önerilen algoritmanın testi için çok sayıda yeni gevşek ve sıkı teslim tarihli problem oluşturularak literatüre sunulmuştur.

Önerilen algoritma, yukarıda sayılan olumlu özelliklerinin yanında aşağıda belirtilen durumlarda performansı zayıflayabilmektedir.

1. Sipârişlerin ortak ürünleri içerdiği durumda, CPU işlem sürelerinin arttığı gözlenmiştir. Parametre değerlerinin azaltılması, CPU işlem sürelerinde düşüşleri beklendiği kadar azaltmamıştır. Aynı ürünün işlemlerinin yer değiştirilmesi (takası) aynı çözümün üretilmesine neden olmaktadır. Aynı uyum değerinin elde edilmesi, durdurma kriterlerini devre dışı bırakmaktadır. Eğer durdurma kriterlerinde bu durumu dikkate alacak şekilde değişiklik yapılırsa bu sorun ortadan kalkmaktadır.
2. 200 işlemi aşan problemlerde CPU işlem sürelerinin hızla arttığı gözlenmiştir. Ancak düşük parametre değerleri ile makul çözümler elde edilebilmektedir.
3. Önerilen algoritma, sipârişleri parça parça planladığı için sipâriş sayısı artışı da CPU işlem sürelerinin artmasına neden olabilir. Bu durumda parçalı

planlama oranı düşürülerek CPU işlem süreleri azaltılabilir. Ancak çözüm kalitesi de kötüleşecektir.

Oluşturulan problemin ve çözüm yönteminin yenilikçi özellikleri, çalışmanın geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Gelecekte problemin yapısında yapılabilecek bâzı değişikliklerle problemin genelleştirilmesi ve oluşturulan algoritmanın değişik süreç özellikli problemleri çözebilecek duruma getirilmesi de olanaklı olabilecektir. Aşağıda gelecekte problem ve algoritma özelliklerinde yapılabilecek değişikler listelenmektedir:

1. Birçok üretim ortamında aynı ürünün işlemleri arasında beklememe veya zorunlu bekleme süreleri sözkonusudur. Özellikle zorunlu bekleme süresinin, beklememe kısıtına göre önerilen algoritmaya uyumlandırılması daha kolaydır.

2. Sipârişlerde aynı ürünlerden çok sayıda talep edilebilmektedir. Aynı ürünlerin arka arkaya üretilmesi, hazırlık sürelerini enküçüklemeye yardımcı olmaktadır. Ancak aynı ürünlerde iş-kesmeye izin verilmesi, problemin performans ölçütlerinin enküçüklenmesine yardımcı olabilmektedir. Özellikle ambalaj sektöründe iş-kesme, sıkı teslim tarihli sipârişlerin sözkonusu olduğu durumlarda kullanılabilmektedir. İş-kesmenin uygulanması durumunda, varolan fabrika üretim plânı bu durumu dikkate almadığından, fabrika plânının yeniden değiştirilmesine neden olmaktadır. İş-kesmenin probleme ve algoritmaya uyumlandırılması, algoritmanın uygulanabilirliğini arttracaktır.

3. Gerçek üretim ortamlarında çok sayıda sipâriş içerisinde bâzı sipârişler diğerlerinden daha önemlidir. Öncelikli sipârişler için geciken sipâriş sayısının enküçüklenmesini içerecek, diğer sipârişler için varolan performans ölçütlerini dikkate alacak bir problem formulasyonu ve çözüm yöntemi de, gerçek üretim ortamı gereksinimlerine yanıt verebilecektir. Önerilen algoritmanın bu özelliklere sahip probleme uyumlandırılması için, Algoritma 3 ve 4'de küçük boyutlu değişikliklere gereksinim vardır.

4. Önerilen algoritma, tam esnek durum için oluşturulmuştur. Halbuki gerçek üretim ortamlarında çok sayıda istasyon ve her istasyonda çok sayıda paralel makina bulunmaktadır. Önerilen algoritma komşu çözümlerini belirlerken, bir işlem için tüm makinaları araştırmaktadır. Bu durum, yüklenemeyecek istasyonların araştırılmasına ve buna bağlı olarak artan CPU işlem sürelerine neden olmaktadır. Ancak etki analizi sonucuna göre yükleme yapılamayacak istasyonlarda komşu çözüm denenmeyeceğinden, çözüm kalitesi

etkilenmemektedir. İstasyon yapısına geçilmesi durumunda yaşanacak en önemli gelişme, azalan CPU işlem süreleri olacaktır.

5. Önerilen algoritma, çift katmanlı TB algoritmasını içermektedir. İterasyonlar sırasında aynı çözümleri yeniden test etme olasılığı bulunmaktadır. Bu sorunu azaltmak için TA metasezgiseli de önerilen algoritmaya eklenebilir.

KAYNAKLAR

Ahmadi, R., Bagchi, U., and Roemer, T. A, 2005: Coordinated Scheduling of Customer Orders for Quick Response, *Naval Resource Logistics*, **52**, 493-512

Alvarez-Valdes, R., Fuertes, A., Tamarit, J. M., Gimenez, G. and Ramos, R., 2005: A heuristic to schedule flexible job-shop in a glass factory, *European Journal of Operational Research*, **165**, 525-534

Bagheri, A., Zandieh, M., Mahdavi, I. and Yazdani, M., 2010: An artificial immune algorithm for the flexible job-shop scheduling problem, *Future Generation Computer Systems*, **26**, 533-541

Baker., K. R. and Trietsch, D., 2009: *Principles of sequencing and scheduling*, John Wiley & Sons, New Jersey

Baykasoglu, A., 2002: Linguistic-based meta-heuristic optimisation model for flexible job shop scheduling, *International Journal of Production Research*, **40** (17), 4523-4543.

Baykasoglu, A., Özbakır, L. and Sonmez, A. I., 2004: Using multiple objective tabu search and grammars to model and solve multi-objective flexible job shop scheduling problems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **15** (6), 777-785.

Baykasoglu, A. and Özbakır, L., 2008: Analysing the effect of flexibility on manufacturing systems performance, *Journal of Manufacturing Technology Management*, **19** (2), 172-193.

Bazargan, M., 2010: *Airline Operations and Scheduling*, Ashgate Publishing Company

Billaut, J., Moukrim, A. and Sanlaville, E., 2005: *Flexibility and Robustness in Scheduling*, John Wiley & Sons

Blazewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G. and Weglarz, J., 2007: *Handbook on scheduling: From Theory to Applications*, Springer, Berlin

Blocher, J. D, and Chhajed, D., 1996: The customer order lead-time problem on parallel machines, *Naval Research Logistics*, **43**, 629–654.

Blocher, J. D., Chhajed, D. and Leung M., 1998: Customer order scheduling in a general job shop environment, *Decision Sciences*, **29**, 951–981.

Brandimarte, P., 1993: Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search, *Annals of Operations Research*, **41**, 157–183.

Brucker, P. and Knust, S., 2006: *Complex Scheduling*, Springer, Berlin

Brucker, P., 2007: *Scheduling Algorithms*, Springer, Berlin

Chan, F. T. S., Wong, T. C. and Chan, L. Y., 2006: Flexible job-shop scheduling problem under resource constraint, *International Journal of Production Research*, **44** (11), 2071-2089

Chen, J. C., Chen, K. H., Wu, J. J. and Chen, C. W., 2007: A study of flexible job shop scheduling problem with paralel machines and reentrant process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **39**, 344-354

Dauzere-Peres, S. and Paulli, J., 1997: An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search, *Annals of Operations Research*, **70**, 281–306.

Demirkol, E., Mehta, S. and Uzsoy, R., 1998: Benchmarks for shop scheduling problems, *European Journal of Operational Research*, **109**, 137-141

Donoso, Y. and Fabregat, R., 2007: *Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics*, Auerbach Publications

Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P. and Taillard, E., 2006: *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer, Berlin

Erel E. and Ghosh J. B., 2007: Customer order scheduling on a single machine with family setup times: complexity and algorithms, *Applied Mathematics and Computation*, **185**, 11–18

Fattahi, P., Saidi, M. and Jolai, F., 2007: Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **18**, 331–342.

Fattahi, P., Jolai, F. and Arkat, J., 2009: Flexible job shop scheduling with overlapping in operations, *Applied Mathematical Modelling*, **33**, 3076-3087

French, S., 1982: *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, John-Wiley & Sons

Gao, J., Gen, M., Sun, L. and Zhao, X., 2007: A hybrid of genetic algorithm and bottleneck shifting for multiobjective flexible job shop scheduling problems, *Computers & Industrial Engineering*, **53**, 149–162

Gao, J., Sun, L. and Gen, M., 2008: A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems, *Computers and Operations Research*, **35**, 2892-2907.

Garey, M. R., Johnson, D. S. and Sethi, R., 1976: The complexity of flowshop and job-shop scheduling, *Mathematics of Operations Research*, **1**, 117–129.

Gen, M., Gao, J. and Lin, L., 2009: Multistage-Based Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problem, *Intelligent and Evolutionary Systems*, **187**, 183-196

Gendreau, M. and Potvin, J., 2010: *Handbook of Metaheuristics*, Springer

Giffler, B., Thompson, G. L., 1960: Algorithms for solving production-scheduling problems, *Operations Research*, **8**, 487-503

Glover, F. and Kochenberger, G. A., 2003: *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, New York

Gomes, M. C., Barbosa-Póvoa, A. P. and Novais, A. Q., 2005: Optimal scheduling for flexible job shop operation, *International Journal of Production Research*, 43 (11), 2323-2353

Gonzalez, T. F., 2007: *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*, Chapman & Hall/CRC

Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K. and Rinnooy, A. H. G., 1979: Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey, *Annals of Discrete Mathematics*, **5**, 287–326

Hartmann, S., 2002: A self-adapting genetic algorithm for project scheduling under resource constraints, *Naval Resource Logistics*., **49**, 433–448.

Herrmann, J. W., 2006: *Handbook of Production Scheduling*, Springer, New York

Hazır, Ö., Günalay, Y. and Erel, E., 2008: Customer order scheduling problem: a comperative metaheuristics study, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37**, 589-598

Hsu, S. and Liu, C. –H, 2009: Improving delivery efficiency of the customer order scheduling problem in a job shop, *Computers and Industrial Engineering,* **59**, 856-866

Julien F.M. and Magazine M.J., 1990: Scheduling customer orders: an alternative production scheduling approach. *Journal of Manufacturing and Operations Management,* **3**:177–199.

Kacem, I., Hammadi, S. and Borne, P., 2002: Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **32** (1), 1–13.

Karaboğa, D., 2004: *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Atlas Yayın Dağıtım

Kim, K.-H. and Egbelu, P. J., 1999: Scheduling in a production environment with multiple process plans per job, *International Journal of Production Research*, **37**, 2725-2753

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecci, P. M., 1983: Optimization by simulated annealing, *Science*, 671-680

Kunadilok, J., 2007: Heuristics for scheduling reentrant flexible job shops with sequence-dependent setup times and limited buffer capacities, *Ph.D Thesis*, Clemson University

Leung, J. Y-T., 2004: *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis*, Chapman & Hall/CRC

Leung, J. Y.-T., Li, H. and Pinedo, M., 2005: Order scheduling in an environment with dedicated resources in parallel, *Journal of Scheduling*, **8**, 355–386.

Leung, J. Y.-T., Li, H. and Pinedo, M., 2006: Approximation algorithms for minimizing total weighted completion time of orders on identical machines in parallel, *Naval Research Logistics*, **53**, 243–260.

Leung, J. Y.-T., Li, H. and Pinedo, M., 2008a: Scheduling orders on either dedicated or flexible machines in parallel to minimize total weighted completion time, *Annals of Operations Research,* **159**, 107-123

Leung, J. Y.-T., Lee, C. Y., Ng, C. W. and Young, G. H., 2008b: Preemptive multiprocessor order scheduling to minimize total weighted flowtime , *European Journal of Operational Research,* **190**, 40-51

Li, J., Pan, Q., Suganthan, P.N and Chua, T.J, 2011: A hybrid tabu search algorithm with an efficient neighborhood structure for the flexible job shop scheduling problem, *International Journal of Manufacturing Technology,* **52,** 683-697

Liao, C. and Chuang, C., 1996: Sequencing with setup time and order tardiness trade-offs, *Naval Research Logistics*, **43**, 971–984.

Lin, B. M. T. and Kononov, A. V., 2007: Customer order scheduling to minimize the number of late jobs, *European Journal of Operational Research*, **183**, 944-948

Liouane, N., Saad, I., Hammadi, S. and Borne, P., 2007: Ant systems & Local search optimization for flexible job shop scheduling production, *International Journal of Computers, Communications & Control,* **2** (2), 174-184

Liu, C. –H, 2009: Lot streaming for customer order scheduling problem in job shop environments, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing,* **22**, 890-907

Lopez, P. and Roubellat, F., 2001: *Production Scheduling*, John Wiley & Sons

Manne, A. S., 1960: On the job shop scheduling problem, *Operations Research*, 8 (2), 219-223

Mastrolilli, M. and Gambardella, L. M., 1999: Effective neighborhood functions for the flexible job shop problem, *Journal of Scheduling*, **3** (1), 3–20.

Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E., 1953: Equations of State Calculations by Fast Computing Machines, *The Journal of Chemical Physics*, **21**, 1087-1092

Michalewicz, Z. and Fogel, D. B., 2000: *How to Solve It: Modern Heuristics*, Springer, Berlin

Mishra, N., Choudhary, A. K. and Tiwari, M. K., 2007: Modeling the planning and scheduling across the outsourcing supply chain: a Chaos-based fast Tabu-SA approach, *International Journal of Production Research*, **46** (13), 3683-3715

Moslehi, G. and Mahnam, M., 2011: A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search, *International Journal of Production Economics,* **129,** 14-22

Pan, J. C. And Huang, H., 2009: A hybrid genetic algorithm for no-wait job shop scheduling problems, *Expert Systems with Applications*, **36**, 5800-5806

Park, B. J. and Choi, H. R., 2006: A Genetic Algorithm for Integration of Process Planning and Scheduling in a Job Shop, *19th ACS Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, 647-657

Pezzella, F., Morganti, G. and Ciaschetti, G., 2008: A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem, *Computers and Operations Research*, **35**, 3202-3212.

Pinedo, M. L., 2000: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, Springer, New York

Pinedo, M. L., 2008: *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Springer, New York

Rajkumar, M., Asokan, P., Anilkumar, N. and Page, A., 2011: A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling problem with limited resource constraints, *International Journal of Production Research,* **49,** 2409-2423

Rossi, A. and Boschi, E., 2009: A hybrid heuristic to solve the paralel machines job-shop scheduling problems, *Advances in Engineering Software*, **40**, 118-127

Saidi-Mehrabad, M., and Fattahi, P., 2007: Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **32**, 563–570.

Shapiro, B. P., Rangan, V. K. and Sviokla, J. J., 1992: Staple yourself to an order, *Harvard Business Review*, **70** (4), 113-122

Shi-Jin, W., Bing-Hai, Z. and Li-Feng, X., 2007: A filtered-beam-search-based heuristic algorithm for flexible job-shop scheduling problem, *International Journal of Production Research*, **46** (11), 3027-3058

Stankovic, J. A., Spuri, M., Ramamritham, K. and Buttazzo, G. C., 1998: *Deadline Scheduling For Real-Time Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston

Tanyaş, M. ve Baskak, M., 2003: *Üretim Plânlama ve Kontrol*, İrfan Yayımcılık, İstanbul

Tekbaş, H. ve Baskak, M, 2010: Müşteri sipârişlerinin çizelgeleme problemin esnek atölye tipi çizelgeleme problemine uyumlandırılması ve tavlama benzetimi ile çözümü**,** 10*. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*

Thomalla, C. S., 2001: Job shop scheduling with alternative process plans, *International Journal of Production Economics*, **74**, 125-134

T'kindt, V. and Billaut, J., 2006: *Multicriteria Scheduling: Theory, Models and Algorithms*, Springer, Berlin

Vilcot, G. and Billaut, J., 2008: A tabu search and a genetic algorithm for solving a bicriteria general job shop scheduling problem, *European Journal of Operastional Research*, **190**, 398-411

Wagner, H., 1959: An integer linear-programming model for machine scheduling, *Naval Research Logistics Quarterly*, **6**, 131-140

Wang, S. and Yu, J., 2010: An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities, *Computers and Industrial Engineering,* **59,** 436-447

Weise, T. <*http://www.it-weise.de*>, alındığı tarih 12.08.2008.

Xhafa, F. and Abraham, A., 2008: *Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications*, Springer, Berlin

Xia, W. and Wu, **Z.,** 2005: An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems, *Computers & Industrial Engineering*, **48**, 409–425.

Xing, L., Chen,Y. and Yang, K., 2009: Multi-objective flexible job shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling, *Applied Soft Computing*, **9**, 362-376

Yang, J., 2005: The complexity of customer order scheduling problems on parallel machines, *Computers & Operations Research*, **32**, 1921-1939

Yang J and Posner M. E., 2005: Scheduling parallel machines for the customer order problem, *Journal of Scheduling*, **8**, 49-74

Yazdani, M., Amiri, M. and Zandieh, M., 2010: Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm, *Expert System with Applications,* **37,** 678-687

Zhang, H. and Gen, M., 2006: Effective genetic approach for optimizing advanced planning and scheduling in flexible manufacturing system, *Proceedings of 8th annual conference on genetic and evolutionary computation*,1841-1848.

Zhang, H., Gao, L. and Shi, Y., 2011: An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem, *Expert Systems with Applications,* **38,** 3563-3573

Zhu, X. and Wilhelm, W. E., 2006: Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review, *IEE Transactions*, **38**, 987-1007

EKLER

EK A: Gantt diyagramı örneği ve açıklaması

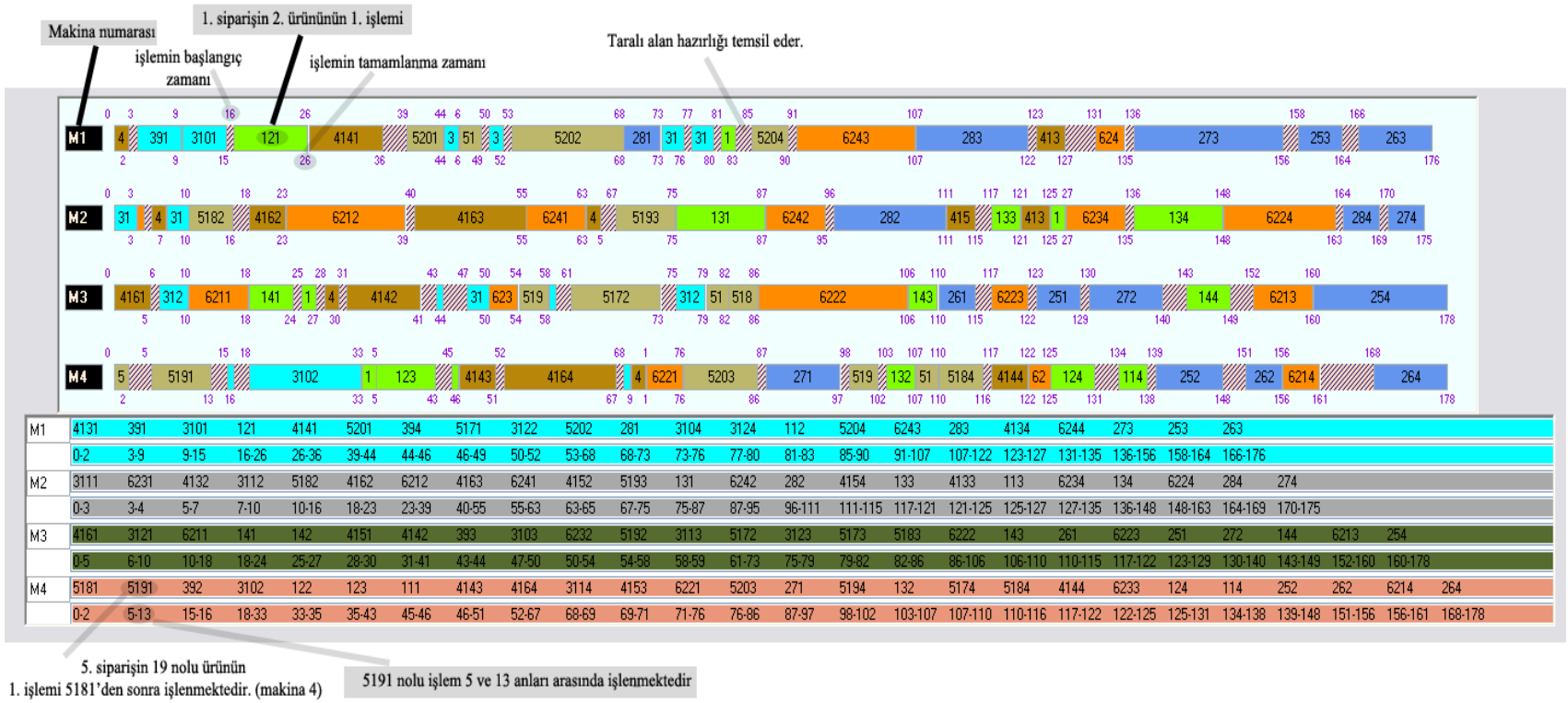
EK B: Önerilen algoritmanın ve rassal TB algoritmasının test problemlerinde kullanılan parametre değerleri

EK C: Önerilen algoritmanın test problemlerinde elde ettiği en iyi sonuçlar

EK D: Uygulama sonuçları

EK E: Bilgisayar programı

EK A: Gantt diyagramı örneği ve açıklaması



Şekil A.1 : Visual Studio 2008'de üretilen Gantt diyagramı ve Gantt diyagramının açıklamaları.

EK B: Önerilen algoritmanın ve rassal TB algoritmasının test problemlerinde kullanılan parametre değerleri

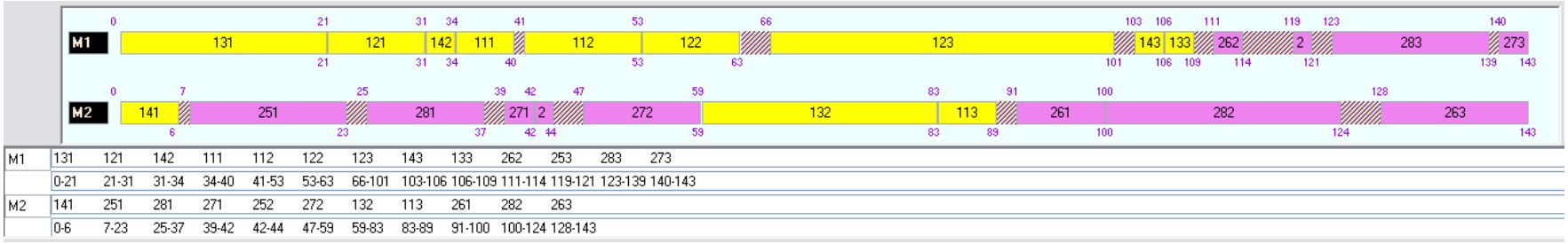
Çizelge B.1 : Test problemlerinde önerilen algoritmanın kullandığı parametre değerleri.

	Tek işlem yer değiştirme algoritması			Takas algoritması		
Problem	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	Başlangıç sıcaklığı	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	Başlangıç sıcaklığı
1ha	18	55	4.4	65	8	4.2
1hx	15	55	4.4	62	9	4.2
1ba	17	52	4	61	9	4
1bx	15	62	4.4	57	8	4
2ha	18	72	4.8	47	11	4.0
2hx	18	74	4.8	52	12	4.1
2ba	12	72	4.7	62	26	3.1
2bx	12	70	4.4	60	56	4.4
3ha	18	55	1.8	25	15	1.6
3hx	18	55	1.8	25	15	1.6
3ba	18	55	1.8	25	15	1.6
3bx	18	75	1.8	9	45	1.6
4ha	18	55	1.8	25	18	1.8
4hx	55	25	1.8	18	15	1.8
4ba	20	52	1.8	45	27	1.8
4bx	15	49	1.8	38	22	2.6
5ha	54	28	2.5	40	15	3
5hx	18	55	2	25	15	2.2
5ba	53	35	2.2	20	14	2.2
5bx	88	35	1.8	55	20	2.4
6ha	25	18	1.8	55	15	1.4
6hx	17	51	2.8	15	62	2.6
6ba	18	55	2	25	15	2.6
6bx	14	70	1.6	10	40	2.4
7ha	16	45	2	48	17	2.4
7hx	34	48	2.2	60	12	2.2
7ba	18	98	2.8	16	6	1.4
7bx	56	55	2.2	26	64	1.8
8ha	18	59	2.4	15	30	2
8hx	15	53	2.6	45	28	2.6
8ba	15	90	1.6	10	50	2
8bx	20	100	2	18	26	1.4
9hx	17	38	1.4	15	50	4.2
10hx	18	35	1.2	17	46	2.2
11hx	12	35	1.6	10	39	2
12hx	12	35	1	14	39	2.6

Çizelge B.2 : Test problemlerinde rassal TB algoritmasının kullandığı parametre değerleri.

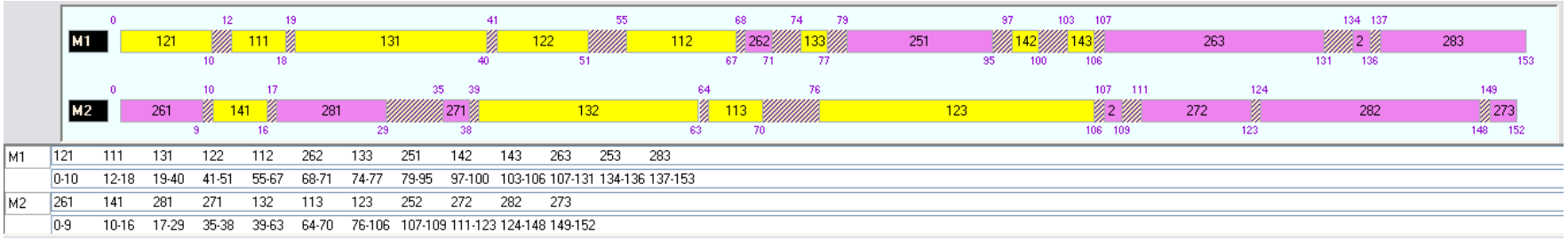
	Yükleme algoritması			Takas algoritması		
Problem	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	Başlangıç sıcaklığı	Aynı sıcaklıkta istenen iterasyon sayısı	Sonucun gelişmediği limit iterasyon sayısı	Başlangıç sıcaklığı
1ha	20	60	4,8	21	60	10
1hx	26	34	3,8	36	18	6,2
1ba	27	31	4,4	31	60	5,6
1bx	29	50	5,4	32	60	4,6
2ha	21	60	9	18	60	7,2
2hx	38	60	6,4	45	60	4,2
2ba	60	60	4,8	60	60	5,2
2bx	38	52	3,8	17	58	2,4
3ha	26	49	2	38	60	2,6
3hx	41	60	2,4	60	60	2,2
3ba	60	60	5,2	60	60	7,6
3bx	60	60	2,4	60	60	1,6
4ha	60	60	8,8	60	60	5
4hx	60	60	9,2	60	60	7,4
4ba	60	60	3,8	60	60	1
4bx	60	60	1,8	60	60	1,2
5ha	60	60	18,4	60	60	16,2
5hx	60	60	10,4	60	60	12,6
5ba	60	60	8,8	60	60	6
5bx	60	60	1,4	60	60	1,2
6ha	60	60	1,6	60	60	1,2
6hx	60	60	1	60	60	1,2
6ba	60	60	1	60	60	1,2
6bx	60	60	1,2	60	60	1,2
7ha	60	60	5,8	60	60	4,6
7hx	60	60	3	60	60	3,4
7ba	60	60	1,4	60	60	1,4
7bx	60	60	0,6	60	60	0,6
8ha	80	80	1,6	80	80	1,6
8hx	80	80	2,2	80	80	2
8ba	80	80	1	80	80	1
8bx	80	80	1	80	80	0,8
9hx	60	60	0,8	60	60	0,8
10hx	60	60	1,2	60	60	0,8
11hx	60	60	0,6	60	60	0,6
12hx	60	60	0,6	60	60	0,6

EK C: Önerilen algoritmanın test problemlerinde elde ettiği en iyi sonuçlar



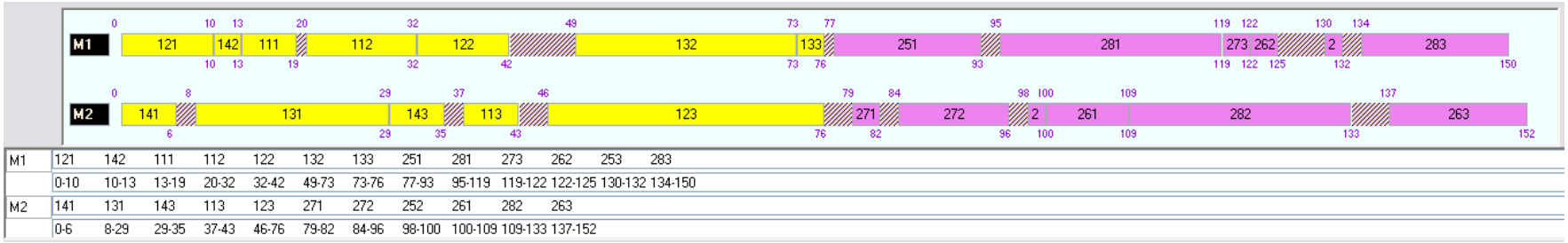
M1	131	121	142	111	112	122	123	143	133	262	253	283	273
	0-21	21-31	31-34	34-40	41-53	53-63	66-101	103-106	106-109	111-114	119-121	123-139	140-143
M2	141	251	281	271	252	272	132	113	261	282	263		
	0-6	7-23	25-37	39-42	42-44	47-59	59-83	83-89	91-100	100-124	128-143		

Şekil C.1 : Problem 1ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 143; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 4.

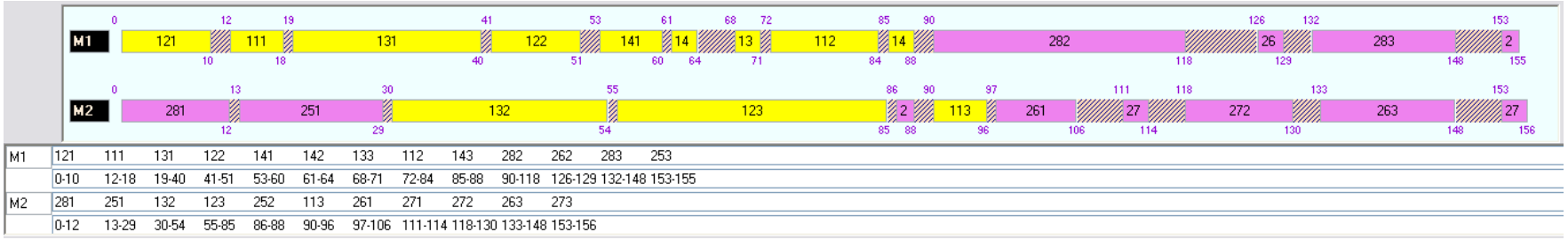


M1	121	111	131	122	112	262	133	251	142	143	263	253	283
	0-10	12-18	19-40	41-51	55-67	68-71	74-77	79-95	97-100	103-106	107-131	134-136	137-153
M2	261	141	281	271	132	113	123	252	272	282	273		
	0-9	10-16	17-29	35-38	39-63	64-70	76-106	107-109	111-123	124-148	149-152		

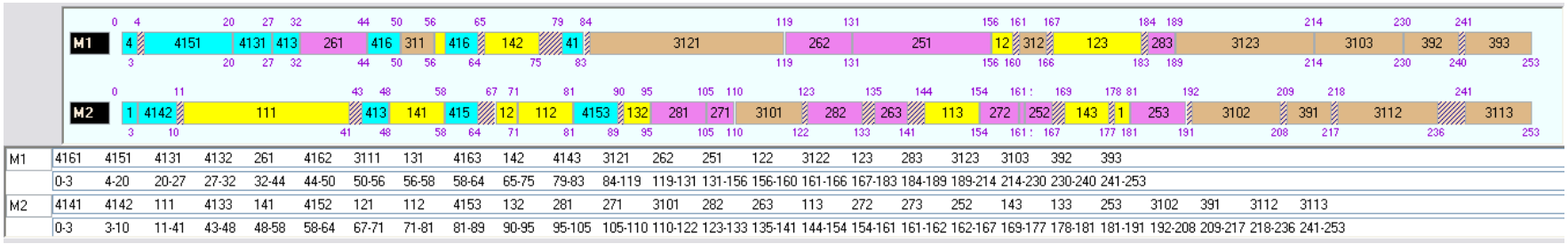
Şekil C.2 : Problem 1hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 153; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 9.



Şekil C.3 : Problem 1ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 152; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 30,5.

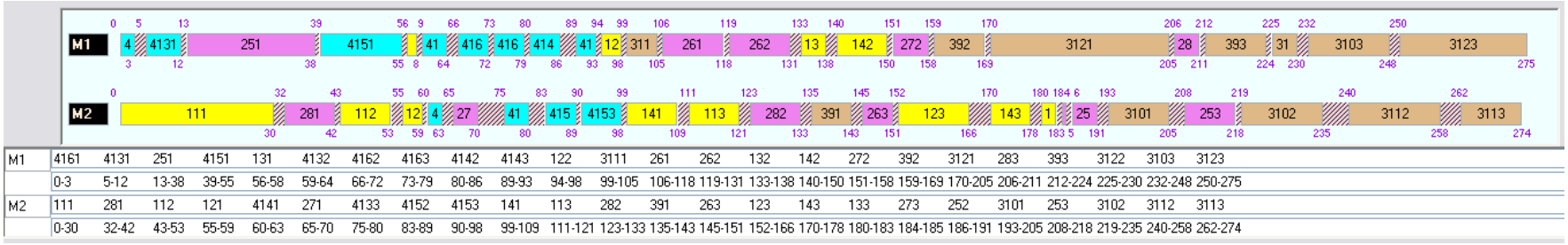


Şekil C.4 : Problem 1bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 156; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 42,5.



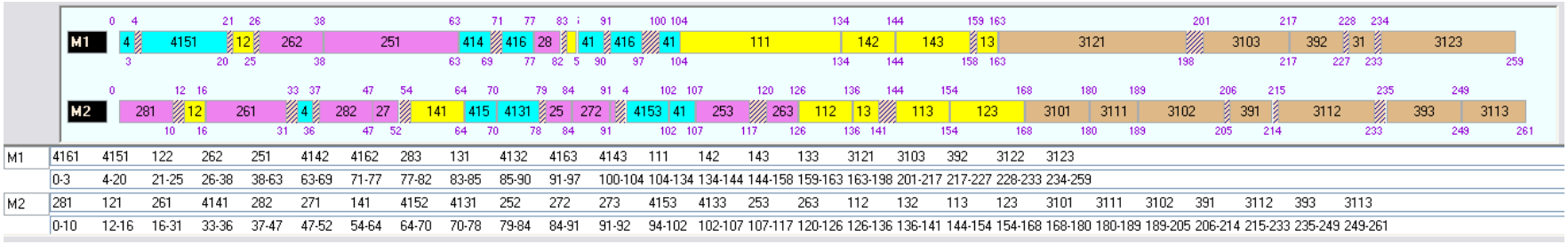
M1	4161	4151	4131	4132	261	4162	3111	131	4163	142	4143	3121	262	251	122	3122	123	283	3123	3103	392	393	
	0-3	4-20	20-27	27-32	32-44	44-50	50-56	56-58	58-64	65-75	79-83	84-119	119-131	131-156	156-160	161-166	167-183	184-189	189-214	214-230	230-240	241-253	
M2	4141	4142	111	4133	141	4152	121	112	4153	132	281	271	3101	282	263	113	272	273	252	143	133	253	3102	391	3112	3113
	0-3	3-10	11-41	43-48	48-58	58-64	67-71	71-81	81-89	90-95	95-105	105-110	110-122	123-133	135-141	144-154	154-161	161-162	162-167	169-177	178-181	181-191	192-208	209-217	218-236	241-253

Şekil C.5 : Problem 2ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 253; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



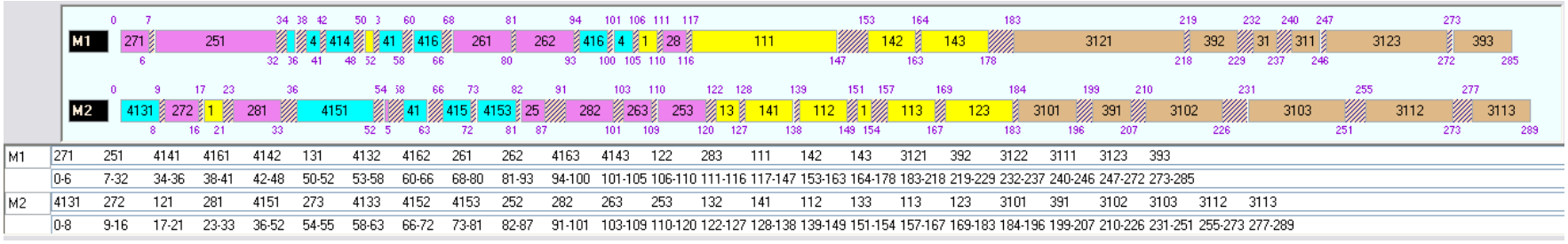
M1	4161	4131	251	4151	131	4132	4162	4163	4142	4143	122	3111	261	262	132	142	272	392	3121	283	393	3122	3103	3123	
	0-3	5-12	13-38	39-55	56-58	59-64	66-72	73-79	80-86	89-93	94-98	99-105	106-118	119-131	133-138	140-150	151-158	159-169	170-205	206-211	212-224	225-230	232-248	250-275	
M2	111	281	112	121	4141	271	4133	4152	4153	141	113	282	391	263	123	143	133	273	252	3101	253	3102	3112	3113	
	0-30	32-42	43-53	55-59	60-63	65-70	75-80	83-89	90-98	99-109	111-121	123-133	135-143	145-151	152-166	170-178	180-183	184-185	186-191	193-205	208-218	219-235	240-258	262-274	

Şekil C.6 : Problem 2hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 275; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



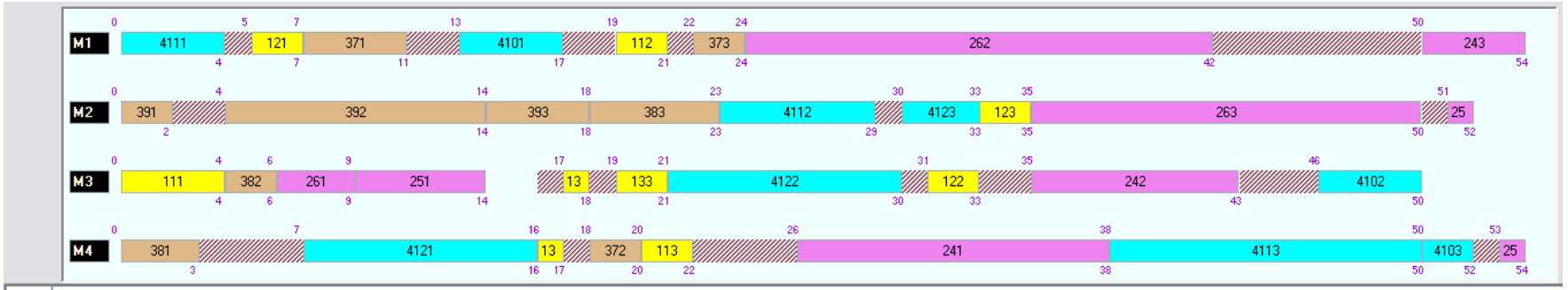
M1	4161	4151	122	262	251	4142	4162	283	131	4132	4163	4143	111	142	143	133	3121	3103	392	3122	3123
	0-3	4-20	21-25	26-38	38-63	63-69	71-77	77-82	83-85	85-90	91-97	100-104	104-134	134-144	144-158	159-163	163-198	201-217	217-227	228-233	234-259
M2	281	121	261	4141	282	271	141	4152	4131	252	272	273	4153	4133	253	263	112	132	113	123	3101	3111	3102	391	3112	393	3113
	0-10	12-16	16-31	33-36	37-47	47-52	54-64	64-70	70-78	79-84	84-91	91-92	94-102	102-107	107-117	120-126	126-136	136-141	144-154	154-168	168-180	180-189	189-205	206-214	215-233	235-249	249-261

Şekil C.7 : Problem 2ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 261; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 27,5.



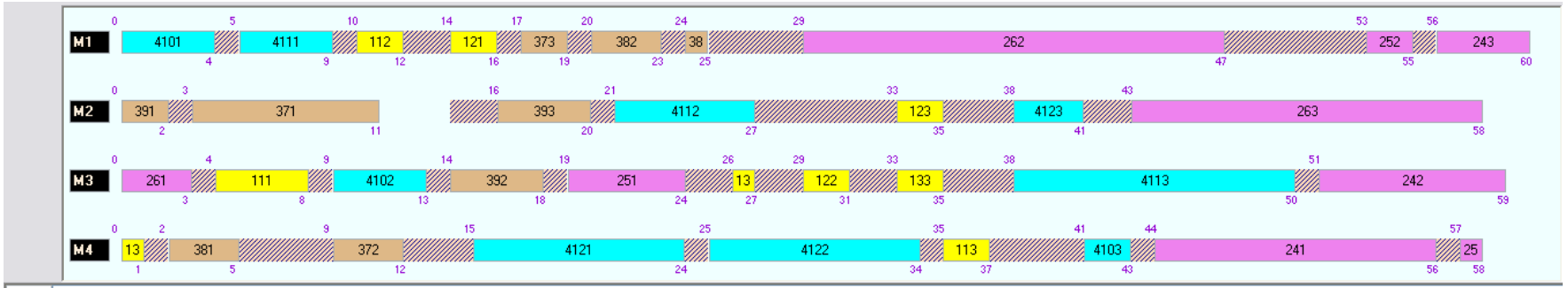
M1	271	251	4141	4161	4142	131	4132	4162	261	262	4163	4143	122	283	111	142	143	3121	392	3122	3111	3123	393
	0-6	7-32	34-36	38-41	42-48	50-52	53-58	60-66	68-80	81-93	94-100	101-105	106-110	111-116	117-147	153-163	164-178	183-218	219-229	232-237	240-246	247-272	273-285
M2	4131	272	121	281	4151	273	4133	4152	4153	252	282	263	253	132	141	112	133	113	123	3101	391	3102	3103	3112	3113
	0-8	9-16	17-21	23-33	36-52	54-55	58-63	66-72	73-81	82-87	91-101	103-109	110-120	122-127	128-138	139-149	151-154	157-167	169-183	184-196	199-207	210-226	231-251	255-273	277-289

Şekil C.8 : Problem 2bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 289; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 38.



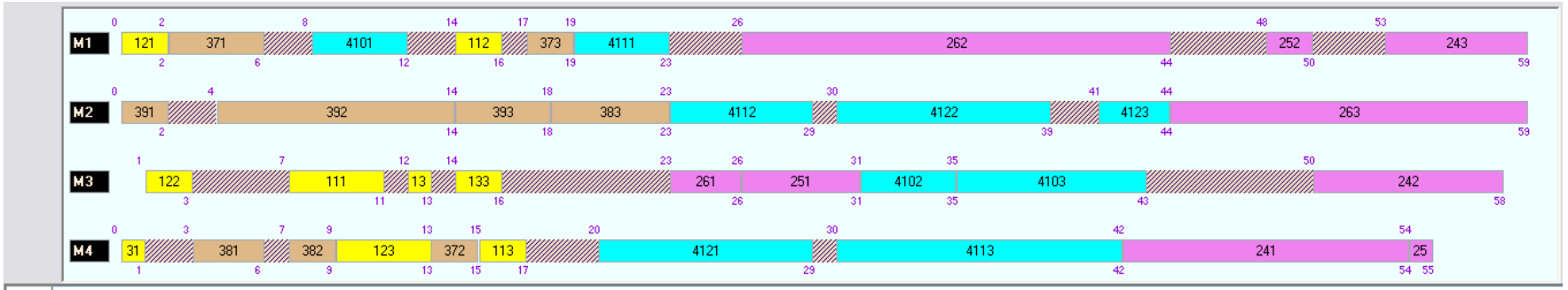
M1	4111	121	371	4101	112	373	262	243		
	0-4	5-7	7-11	13-17	19-21	22-24	24-42	50-54		
M2	391	392	393	383	4112	4123	123	263	252	
	0-2	4-14	14-18	18-23	23-29	30-33	33-35	35-50	51-52	
M3	111	382	261	251	132	133	4122	122	242	4102
	0-4	4-6	6-9	9-14	17-18	19-21	21-30	31-33	35-43	46-50
M4	381	4121	131	372	113	241	4113	4103	253	
	0-3	7-16	16-17	18-20	20-22	26-38	38-50	50-52	53-54	

Şekil C.9 : Problem 3ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 54; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



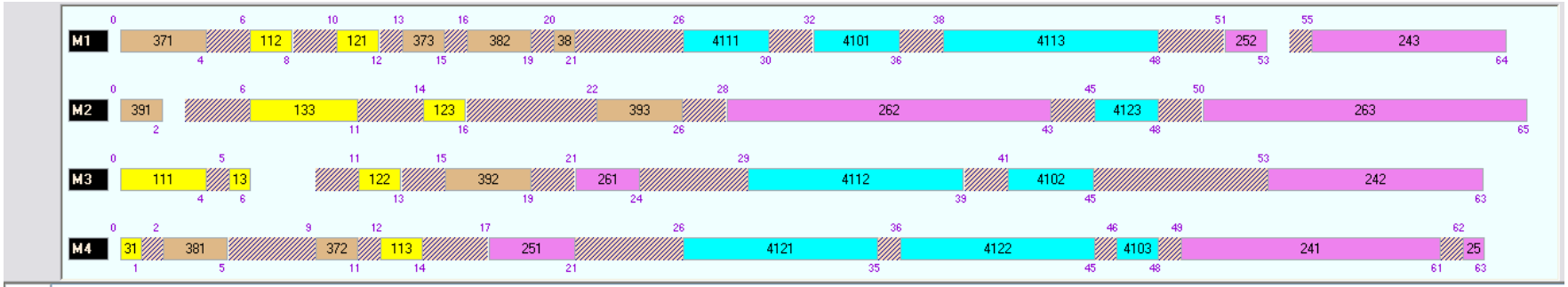
M1	4101	4111	112	121	373	382	383	262	252	243
	0-4	5-9	10-12	14-16	17-19	20-23	24-25	29-47	53-55	56-60
M2	391	371	393	4112	123	4123	263			
	0-2	3-11	16-20	21-27	33-35	38-41	43-58			
M3	261	111	4102	392	251	132	122	133	4113	242
	0-3	4-8	9-13	14-18	19-24	26-27	29-31	33-35	38-50	51-59
M4	131	381	372	4121	4122	113	4103	241	253	
	0-1	2-5	9-12	15-24	25-34	35-37	41-43	44-56	57-58	

Şekil C.10 : Problem 3hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 60; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



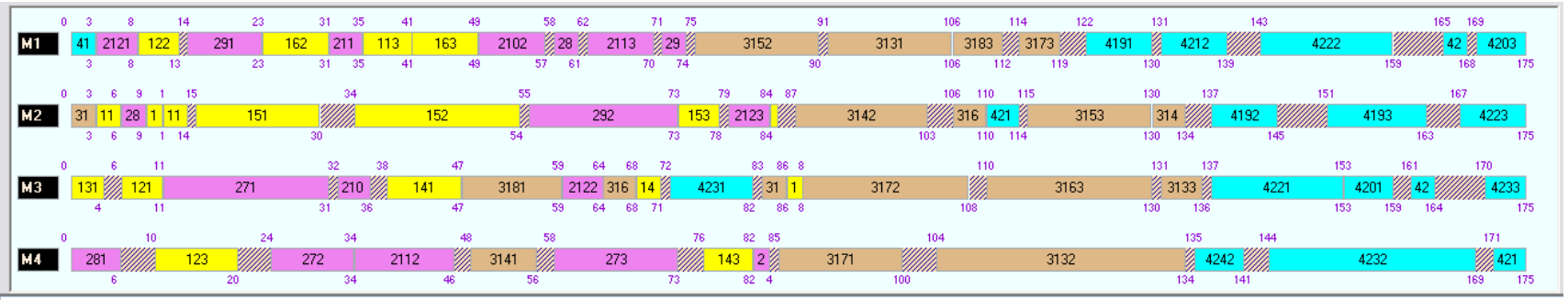
M1	121	371	4101	112	373	4111	262	252	243	
	0-2	2-6	8-12	14-16	17-19	19-23	26-44	48-50	53-59	
M2	391	392	393	383	4112	4122	4123	263		
	0-2	4-14	14-18	18-23	23-29	30-39	41-44	44-59		
M3	122	111	132	133	261	251	4102	4103	242	
	1-3	7-11	12-13	14-16	23-26	26-31	31-35	35-43	50-58	
M4	131	381	382	123	372	113	4121	4113	241	253
	0-1	3-6	7-9	9-13	13-15	15-17	20-29	30-42	42-54	54-55

Şekil C.11 : Problem 3ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 59; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 3,5.



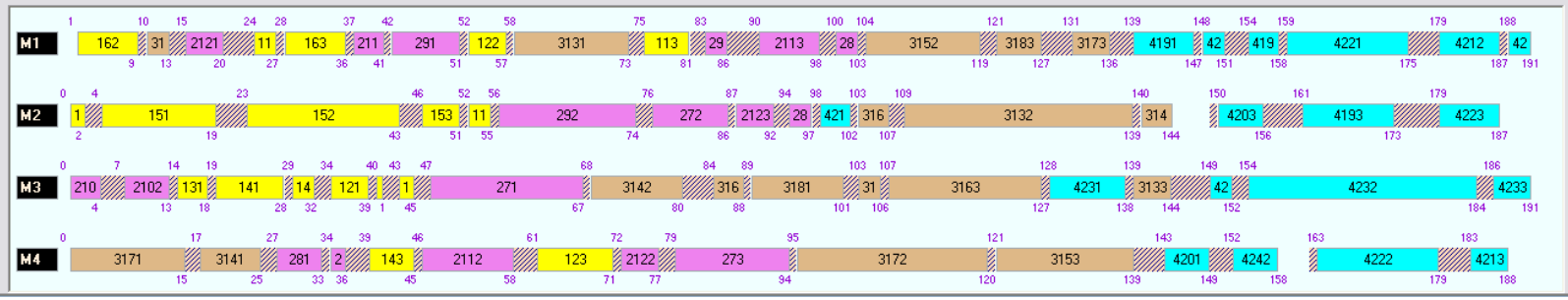
M1	371	112	121	373	382	383	4111	4101	4113	252	243
	0-4	6-8	10-12	13-15	16-19	20-21	26-30	32-36	38-48	51-53	55-64
M2	391	133	123	393	262	4123	263				
	0-2	6-11	14-16	22-26	28-43	45-48	50-65				
M3	111	132	122	392	261	4112	4102	242			
	0-4	5-6	11-13	15-19	21-24	29-39	41-45	53-63			
M4	131	381	372	113	251	4121	4122	4103	241	253	
	0-1	2-5	9-11	12-14	17-21	26-35	36-45	46-48	49-61	62-63	

Şekil C.12 : Problem 3bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 65; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 6.



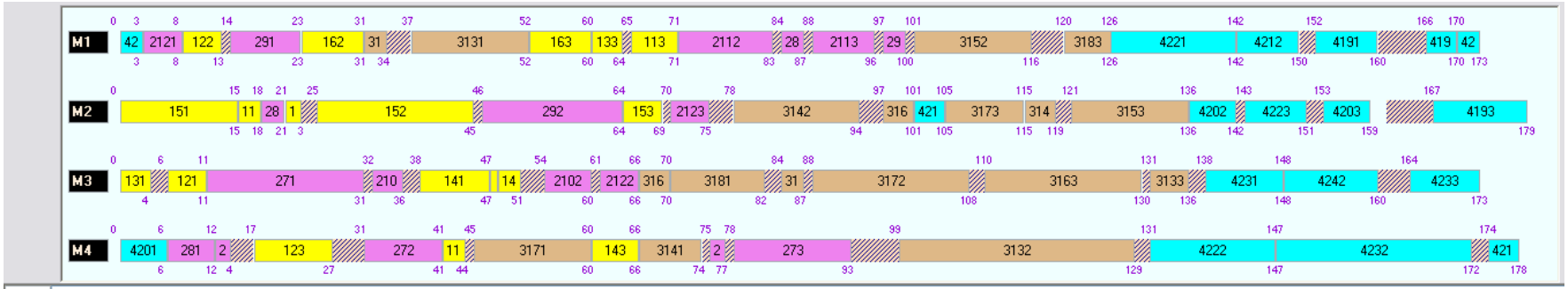
M1	4241	2121	122	291	162	2111	113	163	2102	283	2113	293	3152	3131	3183	3173	4191	4212	4222	4243	4203
	0-3	3-8	8-13	14-23	23-31	31-35	35-41	41-49	49-57	58-61	62-70	71-74	75-90	91-106	106-112	114-119	122-130	131-139	143-159	165-168	169-175
M2	3151	111	282	161	112	151	152	292	153	2123	132	3142	3162	4211	3153	3143	4192	4193	4223		
	0-3	3-6	6-9	9-11	11-14	15-30	34-54	55-73	73-78	79-84	84-85	87-103	106-110	110-114	115-130	130-134	137-145	151-163	167-175		
M3	131	121	271	2101	141	3181	2122	3161	142	4231	3182	133	3172	3163	3133	4221	4201	4202	4233		
	0-4	6-11	11-31	32-36	38-47	47-59	59-64	64-68	68-71	72-82	83-86	86-88	88-108	110-130	131-136	137-153	153-159	161-164	170-175		
M4	281	123	272	2112	3141	273	143	2103	3171	3132	4242	4232	4213								
	0-6	10-20	24-34	34-46	48-56	58-73	76-82	82-84	85-100	104-134	135-141	144-169	171-175								

Şekil C.13 : Problem 4ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 175; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



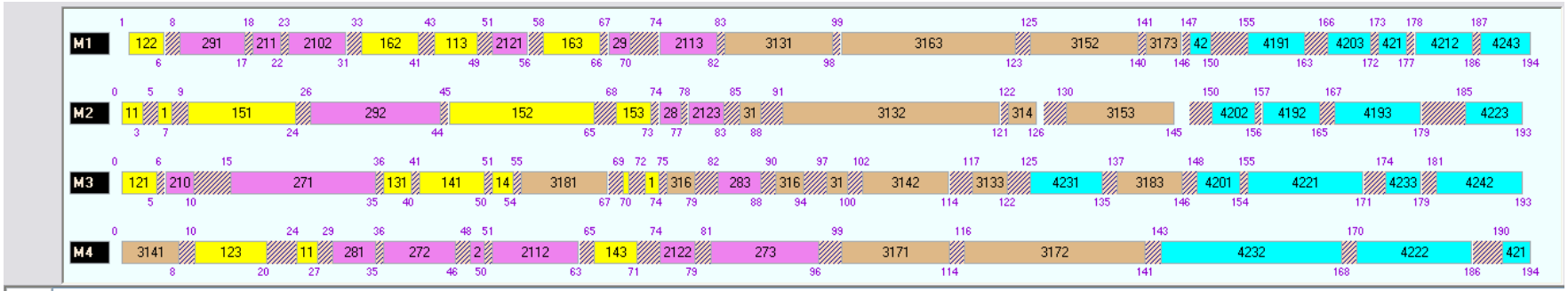
M1	162	3151	2121	111	163	2111	291	122	3131	113	293	2113	283	3152	3183	3173	4191	4241	4192	4221	4212	4243
	1-9	10-13	15-20	24-27	28-36	37-41	42-51	52-57	58-73	75-81	83-86	90-98	100-103	104-119	121-127	131-136	139-147	148-151	154-158	159-175	179-187	188-191
M2	161	151	152	153	112	292	272	2123	282	4211	3162	3132	3143	4203	4193	4223						
	0-2	4-19	23-43	46-51	52-55	56-74	76-86	87-92	94-97	98-102	103-107	109-139	140-144	150-156	161-173	179-187						
M3	2101	2102	131	141	142	121	132	133	271	3142	3161	3181	3182	3163	4231	3133	4202	4232	4233			
	0-4	7-13	14-18	19-28	29-32	34-39	40-41	43-45	47-67	68-80	84-88	89-101	103-106	107-127	128-138	139-144	149-152	154-184	186-191			
M4	3171	3141	281	2103	143	2112	123	2122	273	3172	3153	4201	4242	4222	4213							
	0-15	17-25	27-33	34-36	39-45	46-58	61-71	72-77	79-94	95-120	121-139	143-149	152-158	163-179	183-188							

Şekil C.14 : Problem 4hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 191; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



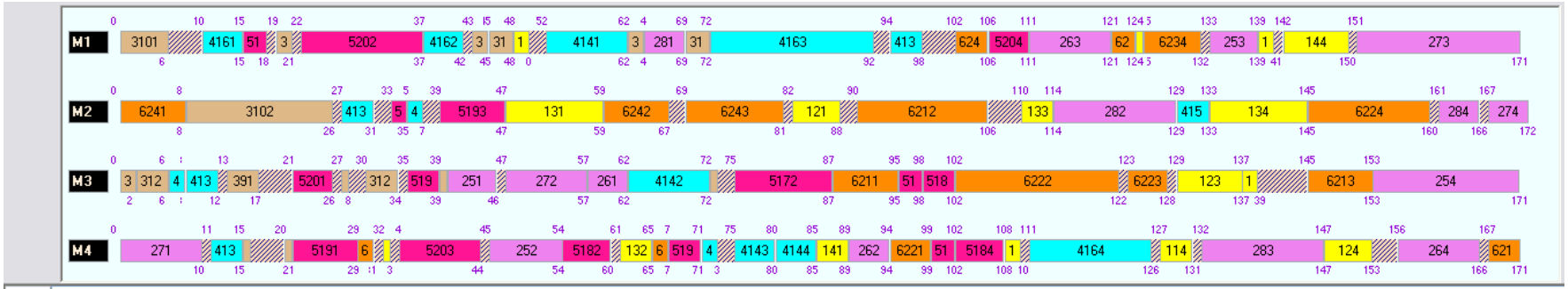
M1	4241	2121	122	291	162	3151	3131	163	133	113	2112	283	2113	293	3152	3183	4221	4212	4191	4192	4243
	0-3	3-8	8-13	14-23	23-31	31-34	37-52	52-60	60-64	65-71	71-83	84-87	88-96	97-100	101-116	120-126	126-142	142-150	152-160	166-170	170-173
M2	151	111	282	161	152	292	153	2123	3142	3162	4211	3173	3143	3153	4202	4223	4203	4193			
	0-15	15-18	18-21	21-23	25-45	46-64	64-69	70-75	78-94	97-101	101-105	105-115	115-119	121-136	136-142	143-151	153-159	167-179			
M3	131	121	271	2101	141	132	142	2102	2122	3161	3181	3182	3172	3163	3133	4231	4242	4233			
	0-4	6-11	11-31	32-36	38-47	47-48	48-51	54-60	61-66	66-70	70-82	84-87	88-108	110-130	131-136	138-148	148-160	164-173			
M4	4201	281	2111	123	272	112	3171	143	3141	2103	273	3132	4222	4232	4213						
	0-6	6-12	12-14	17-27	31-41	41-44	45-60	60-66	66-74	75-77	78-93	99-129	131-147	147-172	174-178						

Şekil C.15 : Problem 4ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 179; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 20,5.



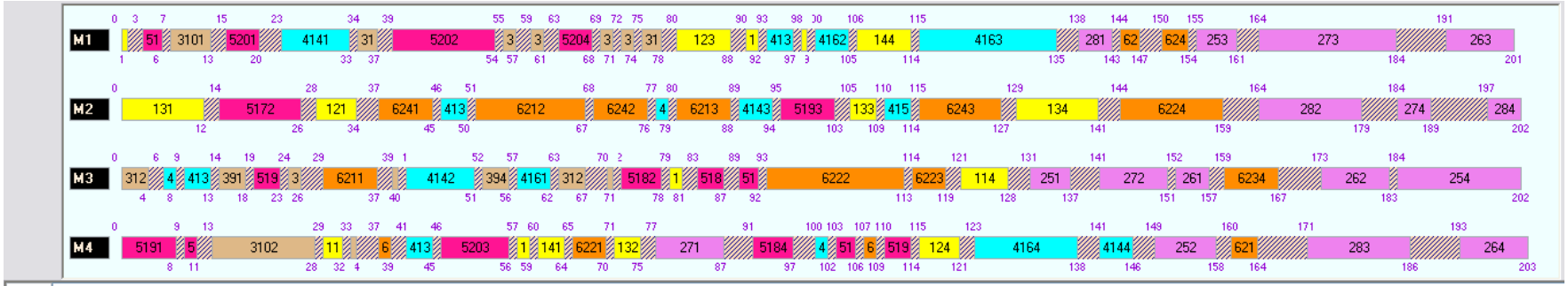
M1	122	291	2111	2102	162	113	2121	163	293	2113	3131	3163	3152	3173	4241	4191	4203	4211	4212	4243
	1-6	8-17	18-22	23-31	33-41	43-49	51-56	58-66	67-70	74-82	83-98	99-123	125-140	141-146	147-150	155-163	166-172	173-177	178-186	187-194
M2	111	161	151	292	152	153	282	2123	3151	3132	3143	3153	4202	4192	4193	4223				
	0-3	5-7	9-24	26-44	45-65	68-73	74-77	78-83	85-88	91-121	122-126	130-145	150-156	157-165	167-179	185-193				
M3	121	2101	271	131	141	142	3181	132	133	3161	283	3162	3182	3142	3133	4231	3183	4201	4221	4233	4242
	0-5	6-10	15-35	36-40	41-50	51-54	55-67	69-70	72-74	75-79	82-88	90-94	97-100	102-114	117-122	125-135	137-146	148-154	155-171	174-179	181-193
M4	3141	123	112	281	272	2103	2112	143	2122	273	3171	3172	4232	4222	4213						
	0-8	10-20	24-27	29-35	36-46	48-50	51-63	65-71	74-79	81-96	99-114	116-141	143-168	170-186	190-194						

Şekil C.16 : Problem 4bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 194; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 26,5.



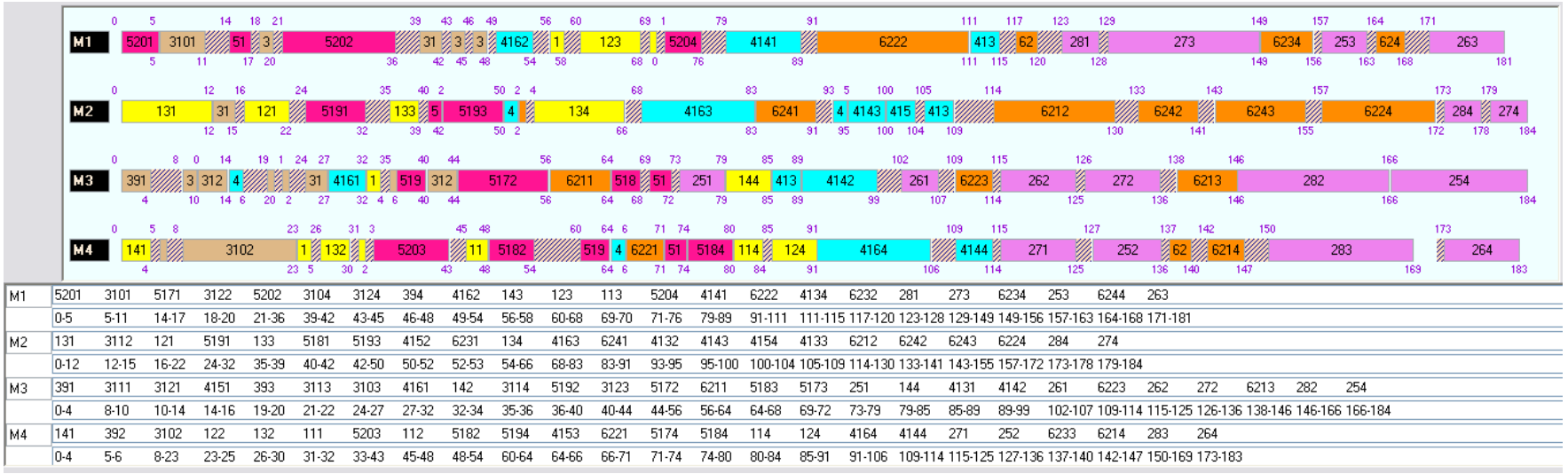
M1	3101	4161	5171	3122	5202	4162	3124	3103	112	4141	394	281	3104	4163	4134	6244	5204	263	6233	113	6234	253	143	144	273	
	0-6	10-15	15-18	19-21	22-37	37-42	43-45	45-48	48-50	52-62	62-64	64-69	69-72	72-92	94-98	102-106	106-111	111-121	121-124	124-125	125-132	133-139	139-141	142-150	151-171	
M2	6241	3102	4133	5181	4152	5193	131	6242	6243	121	6212	133	282	4154	134	6224	284	274								
	0-8	8-26	27-31	33-35	35-37	39-47	47-59	59-67	69-81	82-88	90-106	110-114	114-129	129-133	133-145	145-160	161-166	167-172								
M3	3111	3121	4151	4131	391	5201	393	3123	5192	3113	251	272	261	4142	3114	5172	6211	5173	5183	6222	6223	123	142	6213	254	
	0-2	2-6	6-8	8-12	13-17	21-26	27-28	30-34	35-39	39-40	40-46	47-57	57-62	62-72	72-73	75-87	87-95	95-98	98-102	102-122	123-128	129-137	137-139	145-153	153-171	
M4	271	4132	3112	392	5191	6231	111	5203	252	5182	132	6232	5194	4153	4143	4144	141	262	6221	5174	5184	122	4164	114	283	124	264	6214
	0-10	11-15	15-16	20-21	21-29	29-31	32-33	34-44	45-54	54-60	61-65	65-67	67-71	71-73	75-80	80-85	85-89	89-94	94-99	99-102	102-108	108-110	111-126	127-131	132-147	147-153	156-166	167-171

Şekil C.17 : Problem 5ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 172; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



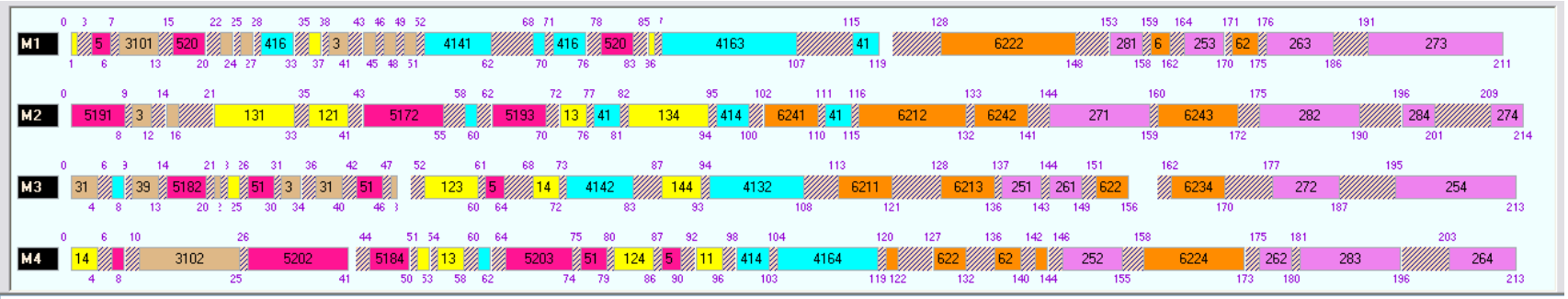
M1	111	5171	3101	5201	4141	3103	5202	3122	3112	5204	3124	3114	3104	123	143	4134	113	4162	144	4163	281	6233	6244	253	273	263	
	0-1	3-6	7-13	15-20	23-33	34-37	39-54	55-57	59-61	63-68	69-71	72-74	75-78	80-88	90-92	93-97	98-99	100-105	106-114	115-135	138-143	144-147	150-154	155-161	164-184	191-201		
M2	131	5172	121	6241	4133	6212	6242	4152	6213	4143	5193	133	4154	6243	134	6224	282	274	284									
	0-12	14-26	28-34	37-45	46-50	51-67	68-76	77-79	80-88	89-94	95-103	105-109	110-114	115-127	129-141	144-159	164-179	184-189	197-202									
M3	3121	4151	4131	391	5192	3111	6211	393	4142	394	4161	3123	3113	5182	142	5183	5173	6222	6223	114	251	272	261	6234	262	254		
	0-4	6-8	9-13	14-18	19-23	24-26	29-37	39-40	41-51	52-56	57-62	63-67	70-71	72-78	79-81	83-87	89-92	93-113	114-119	121-128	131-137	141-151	152-157	159-167	173-183	184-202		
M4	5191	5181	3102	112	392	6231	4132	5203	122	141	6221	132	271	5184	4153	5174	6232	5194	124	4164	4144	252	6214	283	264			
	0-8	9-11	13-28	29-32	33-34	37-39	41-45	46-56	57-59	60-64	65-70	71-75	77-87	91-97	100-102	103-106	107-109	110-114	115-121	123-138	141-146	149-158	160-164	171-186	193-203			

Şekil C.18 : Problem 5hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 203; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



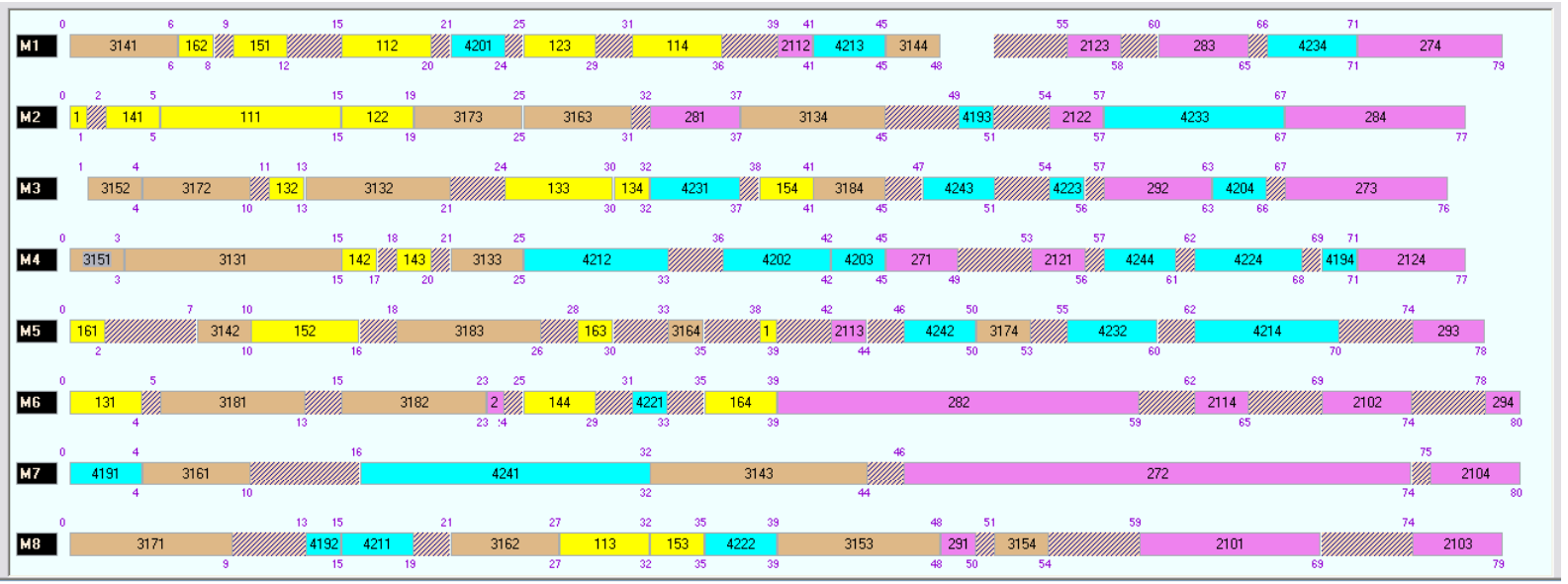
M1	5201	3101	5171	3122	5202	3104	3124	394	4162	143	123	113	5204	4141	6222	4134	6232	281	273	6234	253	6244	263
	0-5	5-11	14-17	18-20	21-36	39-42	43-45	46-48	49-54	56-58	60-68	69-70	71-76	79-89	91-111	111-115	117-120	123-128	129-149	149-156	157-163	164-168	171-181
M2	131	3112	121	5191	133	5181	5193	4152	6231	134	4163	6241	4132	4143	4154	4133	6212	6242	6243	6224	284	274	
	0-12	12-15	16-22	24-32	35-39	40-42	42-50	50-52	52-53	54-66	68-83	83-91	93-95	95-100	100-104	105-109	114-130	133-141	143-155	157-172	173-178	179-184	
M3	391	3111	3121	4151	393	3113	3103	4161	142	3114	5192	3123	5172	6211	5183	5173	251	144	4131	4142	261	6223	262	272	6213	282	254
	0-4	8-10	10-14	14-16	19-20	21-22	24-27	27-32	32-34	35-36	36-40	40-44	44-56	56-64	64-68	69-72	73-79	79-85	85-89	89-99	102-107	109-114	115-125	126-136	138-146	146-166	166-184
M4	141	392	3102	122	132	111	5203	112	5182	5194	4153	6221	5174	5184	114	124	4164	4144	271	252	6233	6214	283	264			
	0-4	5-6	8-23	23-25	26-30	31-32	33-43	45-48	48-54	60-64	64-66	66-71	71-74	74-80	80-84	85-91	91-106	109-114	115-125	127-136	137-140	142-147	150-169	173-183			

Şekil C.19 : Problem 5ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 184; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



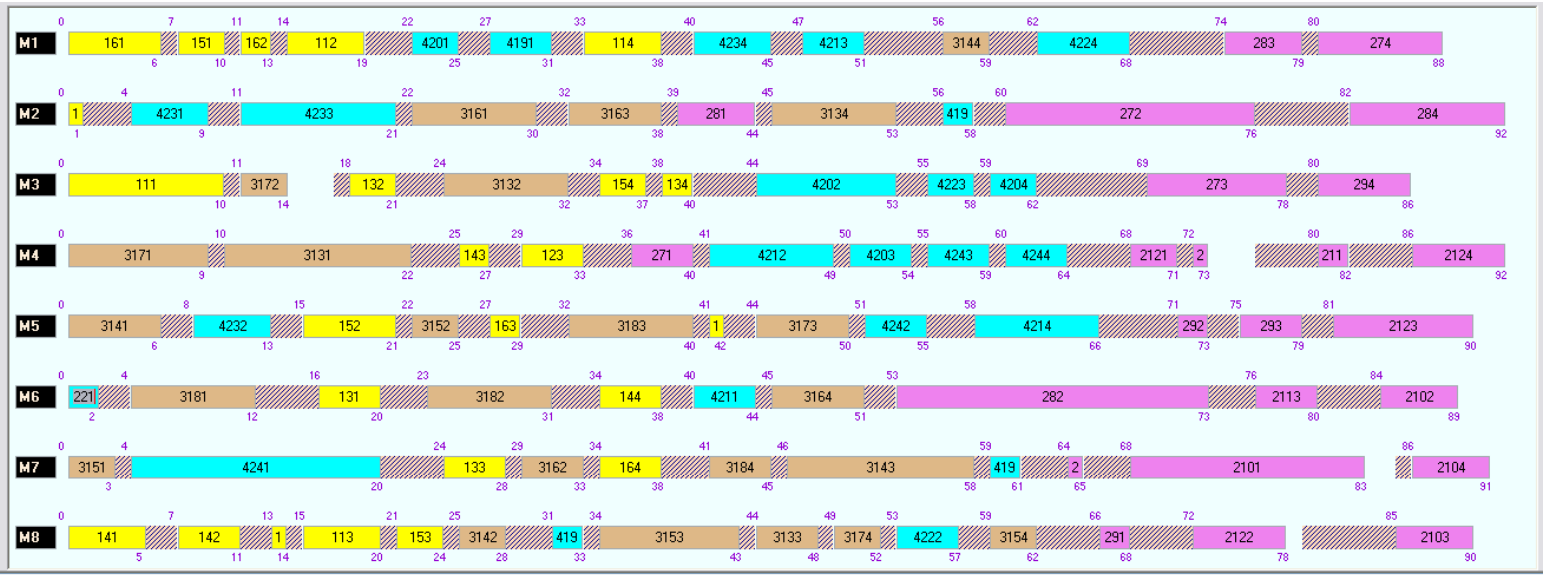
M1	111	5171	3101	5201	3122	394	4161	112	3104	3112	3124	3114	4141	4131	4162	5204	113	4163	4134	6222	281	6233	253	6244	263	273
	0-1	3-6	7-13	15-20	22-24	25-27	28-33	35-37	38-41	43-45	46-48	49-51	52-62	68-70	71-76	78-83	85-86	87-107	115-119	128-148	153-158	159-162	164-170	171-175	176-186	191-211
M2	5191	3111	392	131	121	5172	4152	5193	133	4154	134	4143	6241	4133	6212	6242	271	6243	282	284	274					
	0-8	9-12	14-16	21-33	35-41	43-55	58-60	62-70	72-76	77-81	82-94	95-100	102-110	111-115	116-132	133-141	144-159	160-172	175-190	196-201	209-214					
M3	3121	4151	391	5182	393	142	5192	3103	3123	5183	3113	123	5173	143	4142	144	4132	6211	6213	251	261	6223	6234	272	254	
	0-4	6-8	9-13	14-20	21-22	23-25	26-30	31-34	36-40	42-46	47-48	52-60	61-64	68-72	73-83	87-93	94-108	113-121	128-136	137-143	144-149	151-156	162-170	177-187	195-213	
M4	141	5181	3102	5202	5184	122	132	4153	5203	5194	124	5174	114	4144	4164	6231	6221	6214	6232	252	6224	262	283	264		
	0-4	6-8	10-25	26-41	44-50	51-53	54-58	60-62	64-74	75-79	80-86	87-90	92-96	98-103	104-119	120-122	127-132	136-140	142-144	146-155	158-173	175-180	181-196	203-213		

Şekil C.20 : Problem 5bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 214; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 5,33.



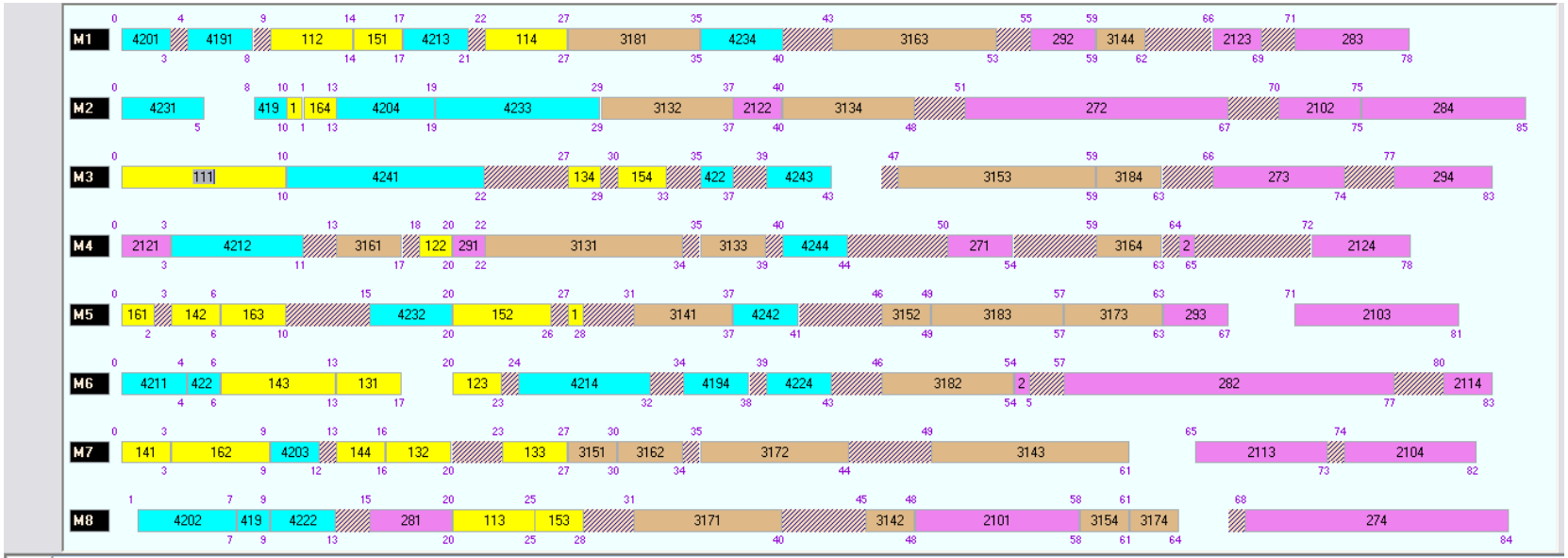
M1	3141	162	151	112	4201	123	114	2112	4213	3144	2123	283	4234	274
	0-6	6-8	9-12	15-20	21-24	25-29	31-36	39-41	41-45	45-48	55-58	60-65	66-71	71-79
M2	121	141	111	122	3173	3163	281	3134	4193	2122	4233	284		
	0-1	2-5	5-15	15-19	19-25	25-31	32-37	37-45	49-51	54-57	57-67	67-77		
M3	3152	3172	132	3132	133	134	4231	154	3184	4243	4223	292	4204	273
	1-4	4-10	11-13	13-21	24-30	30-32	32-37	38-41	41-45	47-51	54-56	57-63	63-66	67-76
M4	3151	3131	142	143	3133	4212	4202	4203	271	2121	4244	4224	4194	2124
	0-3	3-15	15-17	18-20	21-25	25-33	36-42	42-45	45-49	53-56	57-61	62-68	69-71	71-77
M5	161	3142	152	3183	163	3164	124	2113	4242	3174	4232	4214	293	
	0-2	7-10	10-16	18-26	28-30	33-35	38-39	42-44	46-50	50-53	55-60	62-70	74-78	
M6	131	3181	3182	2111	144	4221	164	282	2114	2102	294			
	0-4	5-13	15-23	23-24	25-29	31-33	35-39	39-59	62-65	69-74	78-80			
M7	4191	3161	4241	3143	272	2104								
	0-4	4-10	16-32	32-44	46-74	75-80								
M8	3171	4192	4211	3162	113	153	4222	3153	291	3154	2101	2103		
	0-9	13-15	15-19	21-27	27-32	32-35	35-39	39-48	48-50	51-54	59-69	74-79		

Şekil C.21 : Problem 6ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 80; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



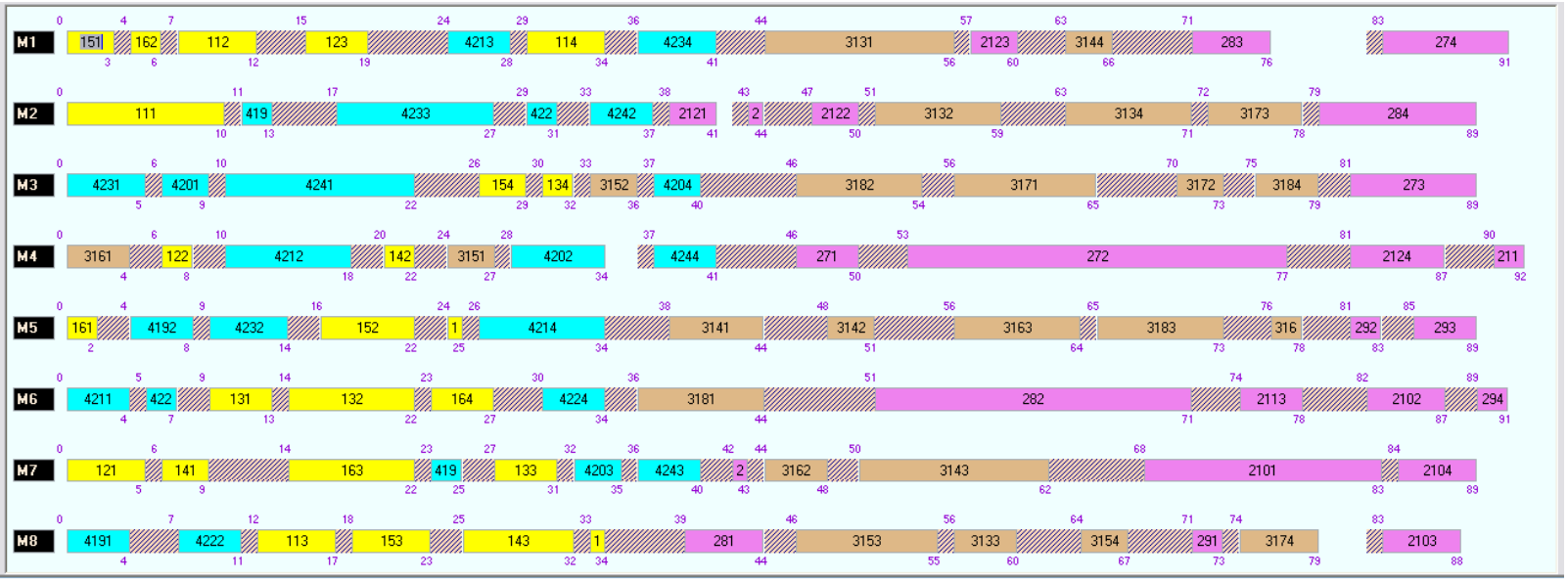
M1	161	151	162	112	4201	4191	114	4234	4213	3144	4224	283	274		
	0-6	7-10	11-13	14-19	22-25	27-31	33-38	40-45	47-51	56-59	62-68	74-79	80-88		
M2	121	4231	4233	3161	3163	281	3134	4193	272	284					
	0-1	4-9	11-21	22-30	32-38	39-44	45-53	56-58	60-76	82-92					
M3	111	3172	132	3132	154	134	4202	4223	4204	273	294				
	0-10	11-14	18-21	24-32	34-37	38-40	44-53	55-58	59-62	69-78	80-86				
M4	3171	3131	143	123	271	4212	4203	4243	4244	2121	2112	2114	2124		
	0-9	10-22	25-27	29-33	36-40	41-49	50-54	55-59	60-64	68-71	72-73	80-82	86-92		
M5	3141	4232	152	3152	163	3183	124	3173	4242	4214	292	293	2123		
	0-6	8-13	15-21	22-25	27-29	32-40	41-42	44-50	51-55	58-66	71-73	75-79	81-90		
M6	4221	3181	131	3182	144	4211	3164	282	2113	2102					
	0-2	4-12	16-20	23-31	34-38	40-44	45-51	53-73	76-80	84-89					
M7	3151	4241	133	3162	164	3184	3143	4194	2111	2101	2104				
	0-3	4-20	24-28	29-33	34-38	41-45	46-58	59-61	64-65	68-83	86-91				
M8	141	142	122	113	153	3142	4192	3153	3133	3174	4222	3154	291	2122	2103
	0-5	7-11	13-14	15-20	21-24	25-28	31-33	34-43	44-48	49-52	53-57	59-62	66-68	72-78	85-90

Şekil C.22 : Problem 6hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 92; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



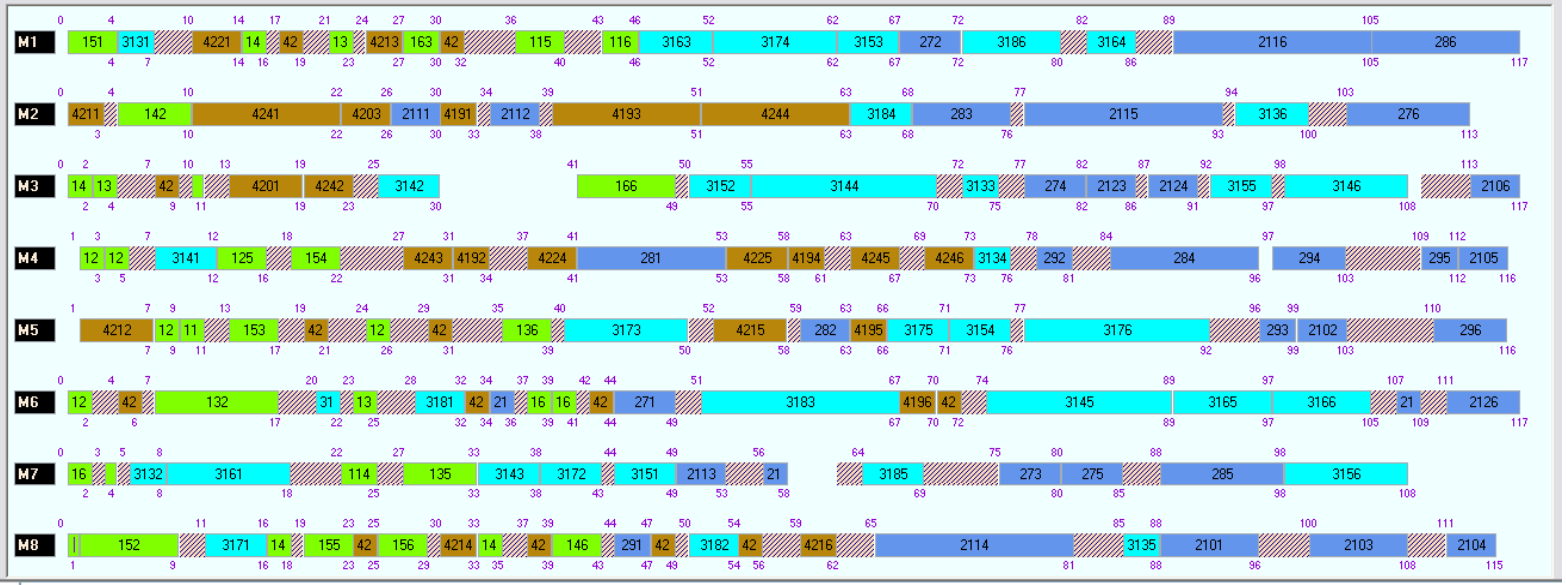
M1	4201	4191	112	151	4213	114	3181	4234	3163	292	3144	2123	283
	0-3	4-8	9-14	14-17	17-21	22-27	27-35	35-40	43-53	55-59	59-62	66-69	71-78
M2	4231	4193	121	164	4204	4233	3132	2122	3134	272	2102	284	
	0-5	8-10	10-11	11-13	13-19	19-29	29-37	37-40	40-48	51-67	70-75	75-85	
M3	111	4241	134	154	4223	4243	3153	3184	273	294			
	0-10	10-22	27-29	30-33	35-37	39-43	47-59	59-63	66-74	77-83			
M4	2121	4212	3161	122	291	3131	3133	4244	271	3164	2112	2124	
	0-3	3-11	13-17	18-20	20-22	22-34	35-39	40-44	50-54	59-63	64-65	72-78	
M5	161	142	163	4232	152	124	3141	4242	3152	3183	3173	293	2103
	0-2	3-6	6-10	15-20	20-26	27-28	31-37	37-41	46-49	49-57	57-63	63-67	71-81
M6	4211	4221	143	131	123	4214	4194	4224	3182	2111	282	2114	
	0-4	4-6	6-13	13-17	20-23	24-32	34-38	39-43	46-54	54-55	57-77	80-83	
M7	141	162	4203	144	132	133	3151	3162	3172	3143	2113	2104	
	0-3	3-9	9-12	13-16	16-20	23-27	27-30	30-34	35-44	49-61	65-73	74-82	
M8	4202	4192	4222	281	113	153	3171	3142	2101	3154	3174	274	
	1-7	7-9	9-13	15-20	20-25	25-28	31-40	45-48	48-58	58-61	61-64	68-84	

Şekil C.23 : Problem 6ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 85; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 8.



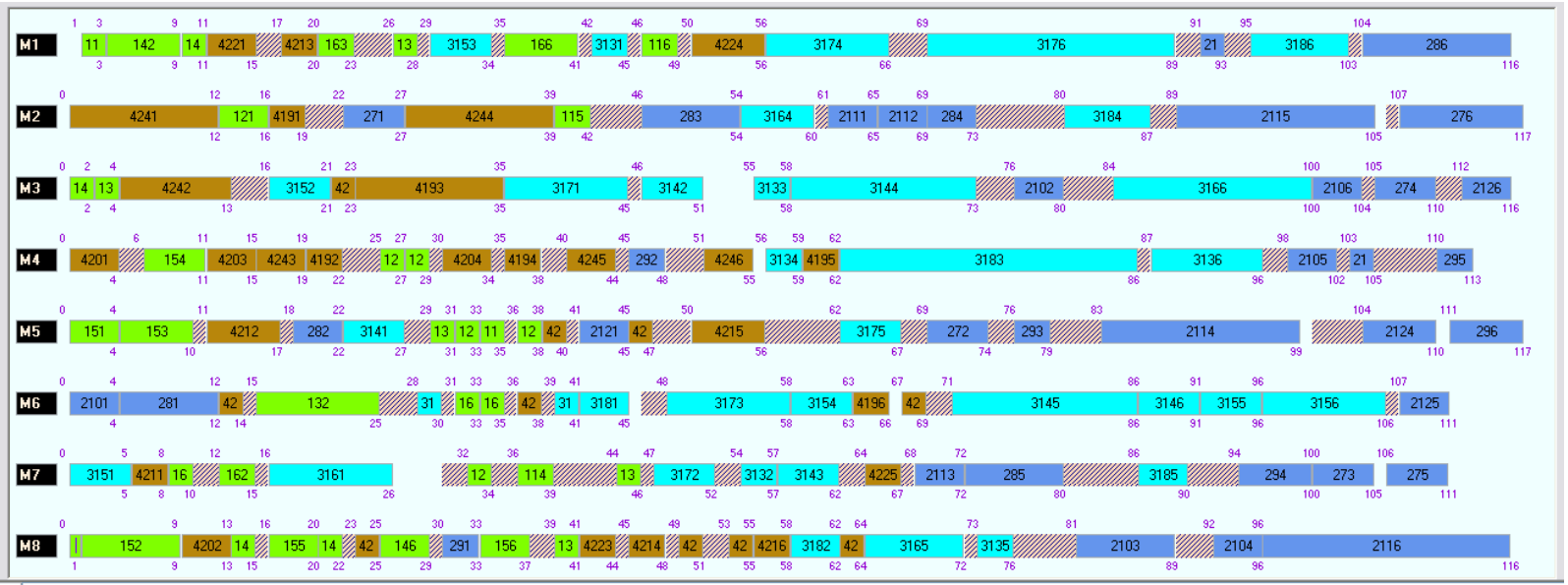
M1	151	162	112	123	4213	114	4234	3131	2123	3144	283	274	
	0-3	4-6	7-12	15-19	24-28	29-34	36-41	44-56	57-60	63-66	71-76	83-91	
M2	111	4193	4233	4223	4242	2121	2112	2122	3132	3134	3173	284	
	0-10	11-13	17-27	29-31	33-37	38-41	43-44	47-50	51-59	63-71	72-78	79-89	
M3	4231	4201	4241	154	134	3152	4204	3182	3171	3172	3184	273	
	0-5	6-9	10-22	26-29	30-32	33-36	37-40	46-54	56-65	70-73	75-79	81-89	
M4	3161	122	4212	142	3151	4202	4244	271	272	2124	2114		
	0-4	6-8	10-18	20-22	24-27	28-34	37-41	46-50	53-77	81-87	90-92		
M5	161	4192	4232	152	124	4214	3141	3142	3163	3183	3164	292	293
	0-2	4-8	9-14	16-22	24-25	26-34	38-44	48-51	56-64	65-73	76-78	81-83	85-89
M6	4211	4221	131	132	164	4224	3181	282	2113	2102	294		
	0-4	5-7	9-13	14-22	23-27	30-34	36-44	51-71	74-78	82-87	89-91		
M7	121	141	163	4194	133	4203	4243	2111	3162	3143	2101	2104	
	0-5	6-9	14-22	23-25	27-31	32-35	36-40	42-43	44-48	50-62	68-83	84-89	
M8	4191	4222	113	153	143	144	281	3153	3133	3154	291	3174	2103
	0-4	7-11	12-17	18-23	25-32	33-34	39-44	46-55	56-60	64-67	71-73	74-79	83-88

Şekil C.24 : Problem 6bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 92; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 13.



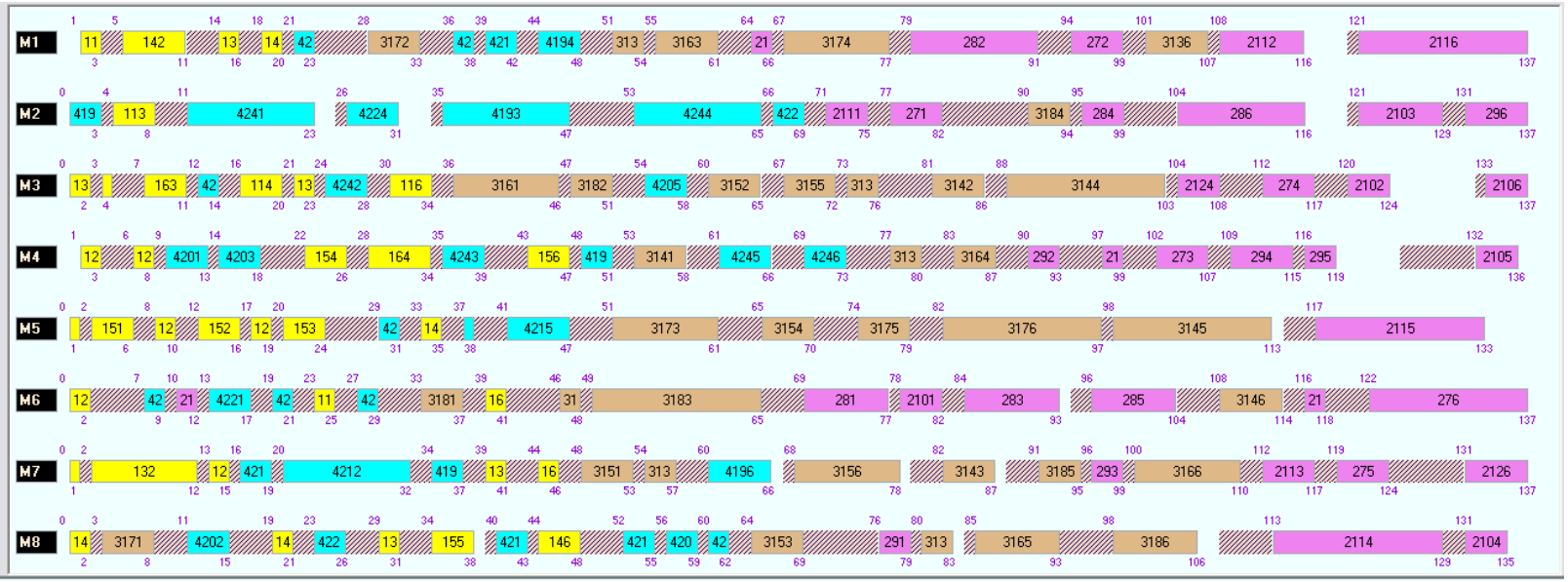
M1	151	3131	4221	143	4222	133	4213	163	4223	115	116	3163	3174	3153	272	3186	3164	2116	286
	0-4	4-7	10-14	14-16	17-19	21-23	24-27	27-30	30-32	36-40	43-46	46-52	52-62	62-67	67-72	72-80	82-86	89-105	105-117
M2	4211	142	4241	4203	2111	4191	2112	4193	4244	3184	283	2115	3136	276					
	0-3	4-10	10-22	22-26	26-30	30-33	34-38	39-51	51-63	63-68	68-76	77-93	94-100	103-113					
M3	141	131	4232	162	4201	4242	3142	166	3152	3144	3133	274	2123	2124	3155	3146	2106		
	0-2	2-4	7-9	10-11	13-19	19-23	25-30	41-49	50-55	55-70	72-75	77-82	82-86	87-91	92-97	98-108	113-117		
M4	122	123	3141	125	154	4243	4192	4224	281	4225	4194	4245	4246	3134	292	284	294	295	2105
	1-3	3-5	7-12	12-16	18-22	27-31	31-34	37-41	41-53	53-58	58-61	63-67	69-73	73-76	78-81	84-96	97-103	109-112	112-116
M5	4212	124	113	153	4202	126	4234	136	3173	4215	282	4195	3175	3154	3176	293	2102	296	
	1-7	7-9	9-11	13-17	19-21	24-26	29-31	35-39	40-50	52-58	59-63	63-66	66-71	71-76	77-92	96-99	99-103	110-116	
M6	121	4231	132	3162	134	3181	4204	2121	164	165	4205	271	3183	4196	4226	3145	3165	3166	2125	2126
	0-2	4-6	7-17	20-22	23-25	28-32	32-34	34-36	37-39	39-41	42-44	44-49	51-67	67-70	70-72	74-89	89-97	97-105	107-109	111-117
M7	161	112	3132	3161	114	135	3143	3172	3151	2113	2122	3185	273	275	285	3156				
	0-2	3-4	5-8	8-18	22-25	27-33	33-38	38-43	44-49	49-53	56-58	64-69	75-80	80-85	88-98	98-108				
M8	111	152	3171	144	155	4233	156	4214	145	4235	146	291	4206	3182	4236	4216	2114	3135	2101	2103	2104
	0-1	1-9	11-16	16-18	19-23	23-25	25-29	30-33	33-35	37-39	39-43	44-47	47-49	50-54	54-56	59-62	65-81	85-88	88-96	100-108	111-115

Şekil C.25 : Problem 7ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 117; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



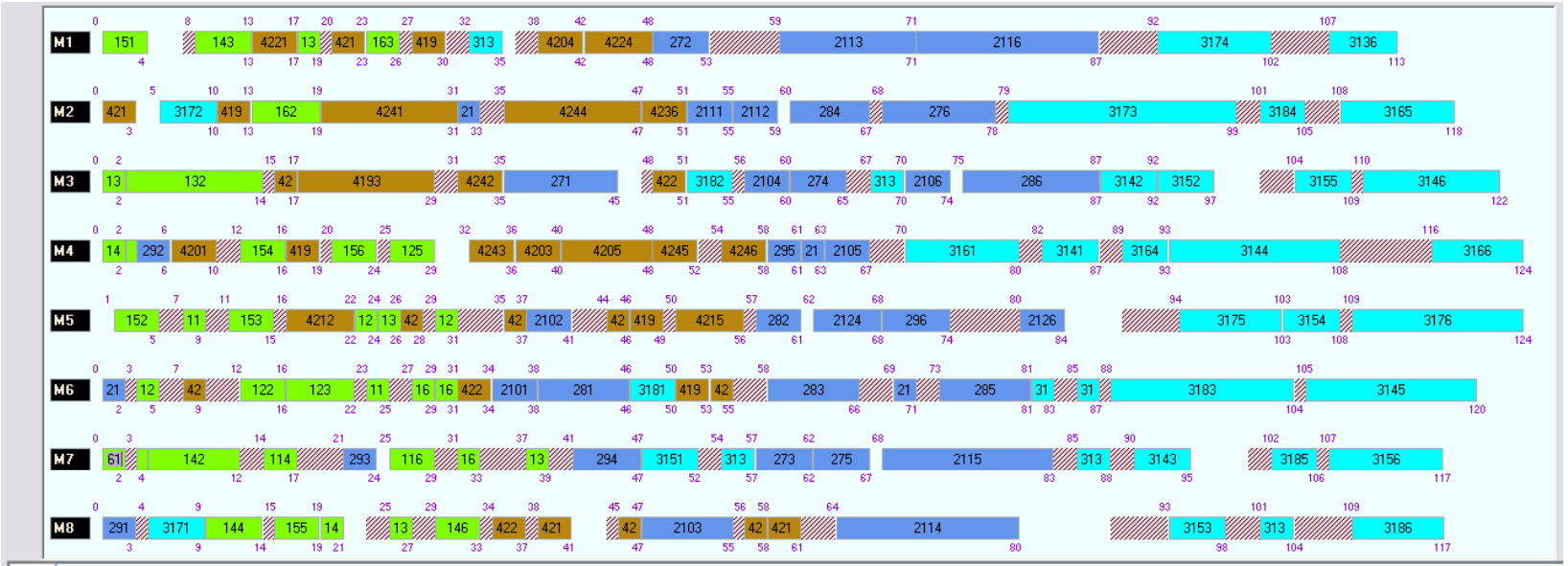
M1	112	142	143	4221	4213	163	133	3153	166	3131	116	4224	3174	3176	2122	3186	286	
	1-3	3-9	9-11	11-15	17-20	20-23	26-28	29-34	35-41	42-45	46-49	50-56	56-66	69-89	91-93	95-103	104-116	
M2	4241	121	4191	271	4244	115	283	3164	2111	2112	284	3184	2115	276				
	0-12	12-16	16-19	22-27	27-39	39-42	46-54	54-60	61-65	65-69	69-73	80-87	89-105	107-117				
M3	141	131	4242	3152	4232	4193	3171	3142	3133	3144	2102	3166	2106	274	2126			
	0-2	2-4	4-13	16-21	21-23	23-35	35-45	46-51	55-58	58-73	76-80	84-100	100-104	105-110	112-116			
M4	4201	154	4203	4243	4192	122	123	4204	4194	4245	292	4246	3134	4195	3183	3136	2105	2123	295
	0-4	6-11	11-15	15-19	19-22	25-27	27-29	30-34	35-38	40-44	45-48	51-55	56-59	59-62	62-86	87-96	98-102	103-105	110-113
M5	151	153	4212	282	3141	134	124	113	126	4233	2121	4234	4215	3175	272	293	2114	2124	296
	0-4	4-10	11-17	18-22	22-27	29-31	31-33	33-35	36-38	38-40	41-45	45-47	50-56	62-67	69-74	76-79	83-99	104-110	111-117
M6	2101	281	4231	132	3162	164	165	4205	3163	3181	3173	3154	4196	4226	3145	3146	3155	3156	2125
	0-4	4-12	12-14	15-25	28-30	31-33	33-35	36-38	39-41	41-45	48-58	58-63	63-66	67-69	71-86	86-91	91-96	96-106	107-111
M7	3151	4211	161	162	3161	125	114	136	3172	3132	3143	4225	2113	285	3185	294	273	275	
	0-5	5-8	8-10	12-15	16-26	32-34	36-39	44-46	47-52	54-57	57-62	64-67	68-72	72-80	86-90	94-100	100-105	106-111	
M8	111	152	4202	144	155	145	4222	146	291	156	135	4223	4214	4235	4206	4216	3182	4236	3165	3135	2103	2104	2116
	0-1	1-9	9-13	13-15	16-20	20-22	23-25	25-29	30-33	33-37	39-41	41-44	45-48	49-51	53-55	55-58	58-62	62-64	64-72	73-76	81-89	92-96	96-116

Şekil C.26 : Problem 7ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 117; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0 (alternatif çözüm).



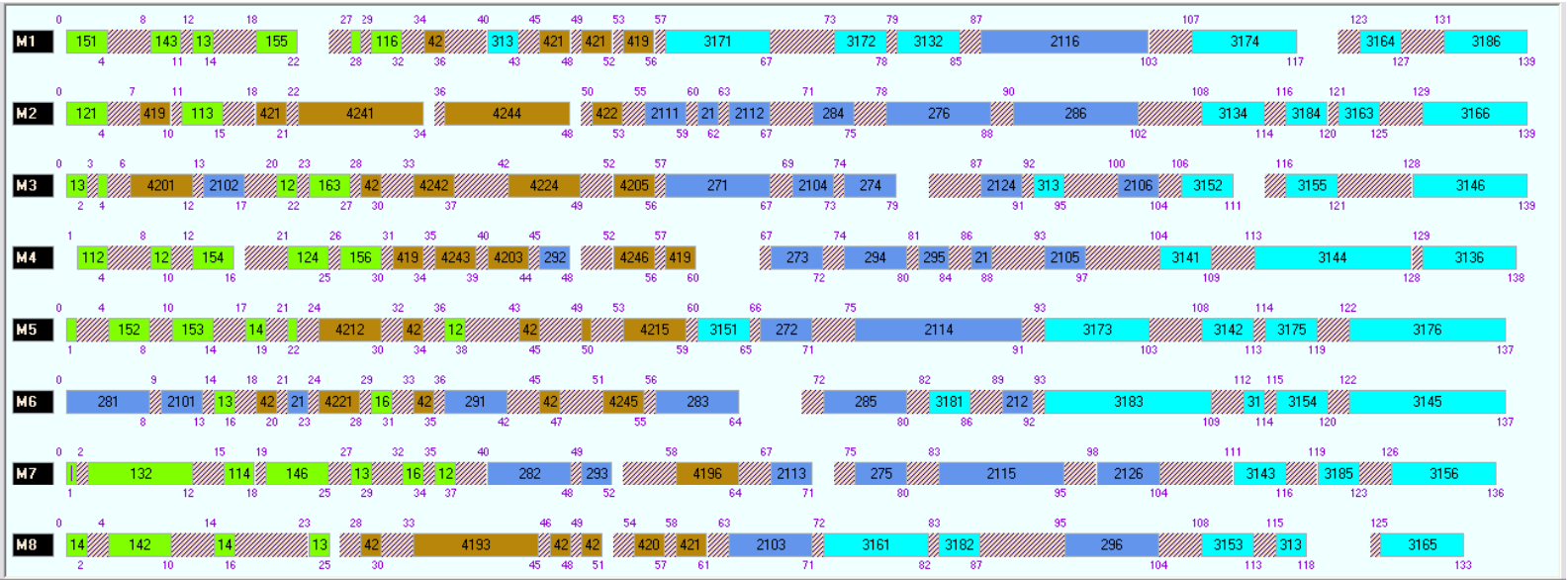
M1	112	142	133	143	4222	3172	4235	4213	4194	3131	3163	2122	3174	282	272	3136	2112	2116	
	1-3	5-11	14-16	18-20	21-23	28-33	36-38	39-42	44-48	51-54	55-61	64-66	67-77	79-91	94-99	101-107	108-116	121-137	
M2	4191	113	4241	4224	4193	4244	4226	2111	271	3184	284	286	2103	296					
	0-3	4-8	11-23	26-31	35-47	53-65	66-69	71-75	77-82	90-94	95-99	104-116	121-129	131-137					
M3	131	162	163	4232	114	134	4242	116	3161	3182	4205	3152	3155	3133	3142	3144	2124	274	2102	2106
	0-2	3-4	7-11	12-14	16-20	21-23	24-28	30-34	36-46	47-51	54-58	60-65	67-72	73-76	81-86	88-103	104-108	112-117	120-124	133-137
M4	122	123	4201	4203	154	164	4243	156	4195	3141	4245	4246	3134	3164	292	2123	273	294	295	2105
	1-3	6-8	9-13	14-18	22-26	28-34	35-39	43-47	48-51	53-58	61-66	69-73	77-80	83-87	90-93	97-99	102-107	109-115	116-119	132-136
M5	161	151	124	152	126	153	4234	145	4225	4215	3173	3154	3175	3176	3145	2115				
	0-1	2-6	8-10	12-16	17-19	20-24	29-31	33-35	37-38	41-47	51-61	65-70	74-79	82-97	98-113	117-133				
M6	121	4231	2121	4221	4233	115	4204	3181	165	3162	3183	281	2101	283	285	3146	2125	276		
	0-2	7-9	10-12	13-17	19-21	23-25	27-29	33-37	39-41	46-48	49-65	69-77	78-82	84-93	96-104	108-114	116-118	122-137		
M7	111	132	125	4211	4212	4192	136	166	3151	3132	4196	3156	3143	3185	293	3166	2113	275	2126	
	0-1	2-12	13-15	16-19	20-32	34-37	39-41	44-46	48-53	54-57	60-66	68-78	82-87	91-95	96-99	100-110	112-117	119-124	131-137	
M8	141	3171	4202	144	4223	135	155	4214	146	4216	4206	4236	3153	291	3135	3165	3186	2114	2104	
	0-2	3-8	11-15	19-21	23-26	29-31	34-38	40-43	44-48	52-55	56-59	60-62	64-69	76-79	80-83	85-93	98-106	113-129	131-135	

Şekil C.27 : Problem 7hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 137; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 3,75.



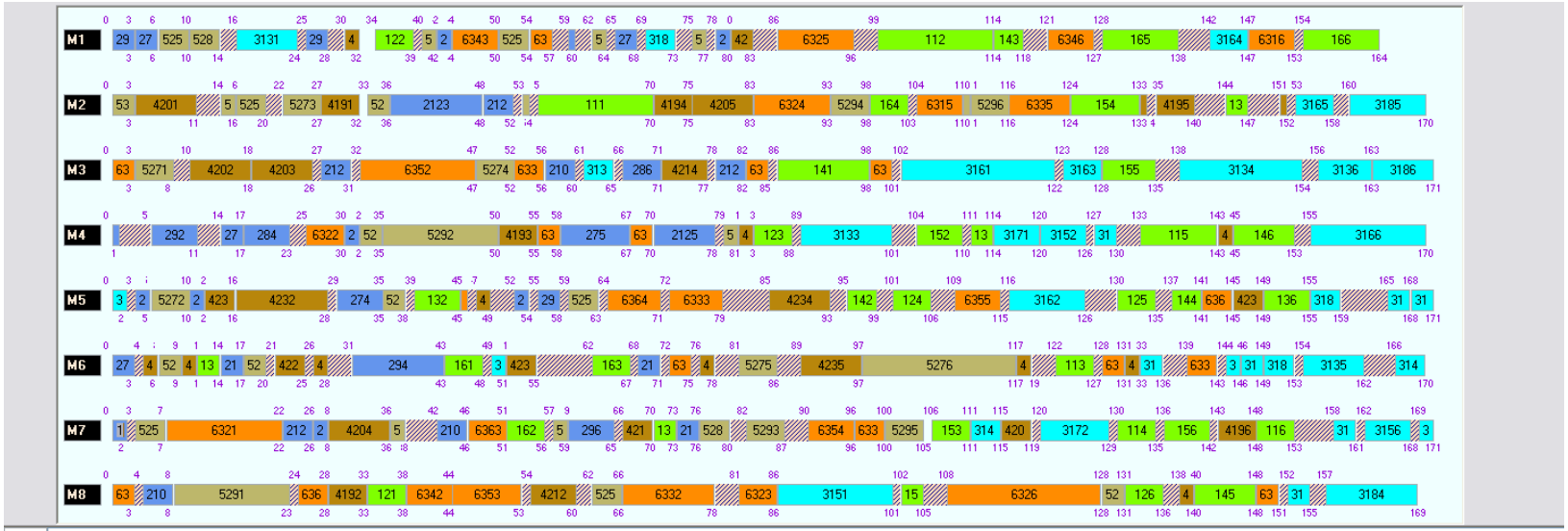
M1	151	143	4221	133	4213	163	4194	3131	4204	4224	272	2113	2116	3174	3136					
	0-4	8-13	13-17	17-19	20-23	23-26	27-30	32-35	38-42	42-48	48-53	59-71	71-87	92-102	107-113					
M2	4211	3172	4191	162	4241	2122	4244	4236	2111	2112	284	276	3173	3184	3165					
	0-3	5-10	10-13	13-19	19-31	31-33	35-47	47-51	51-55	55-59	60-67	68-78	79-99	101-105	108-118					
M3	131	132	4232	4193	4242	271	4225	3182	2104	274	3133	2106	286	3142	3152	3155	3146			
	0-2	2-14	15-17	17-29	31-35	35-45	48-51	51-55	56-60	60-65	67-70	70-74	75-87	87-92	92-97	104-109	110-122			
M4	141	111	292	4201	154	4192	156	125	4243	4203	4205	4245	4246	295	2123	2105	3161	3141	3164	3144	3166
	0-2	2-3	3-6	6-10	12-16	16-19	20-24	25-29	32-36	36-40	40-48	48-52	54-58	58-61	61-63	63-67	70-80	82-87	89-93	93-108	116-124
M5	152	113	153	4212	124	134	4233	126	4202	2102	4234	4195	4215	282	2124	296	2126	3175	3154	3176	
	1-5	7-9	11-15	16-22	22-24	24-26	26-28	29-31	35-37	37-41	44-46	46-49	50-56	57-61	62-68	68-74	80-84	94-103	103-108	109-124	
M6	2121	121	4231	122	123	115	164	165	4222	2101	281	3181	4196	4226	283	2125	285	3162	3163	3183	3145
	0-2	3-5	7-9	12-16	16-22	23-25	27-29	29-31	31-34	34-38	38-46	46-50	50-53	53-55	58-66	69-71	73-81	81-83	85-87	88-104	105-120
M7	161	112	142	114	293	116	166	136	294	3151	3132	273	275	2115	3134	3143	3185	3156			
	0-2	3-4	4-12	14-17	21-24	25-29	31-33	37-39	41-47	47-52	54-57	57-62	62-67	68-83	85-88	90-95	102-106	107-117			
M8	291	3171	144	155	145	135	146	4223	4214	4235	2103	4206	4216	2114	3153	3135	3186				
	0-3	4-9	9-14	15-19	19-21	25-27	29-33	34-37	38-41	45-47	47-55	56-58	58-61	64-80	93-98	101-104	109-117				

Şekil C.28 : Problem 7ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 124; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 13.



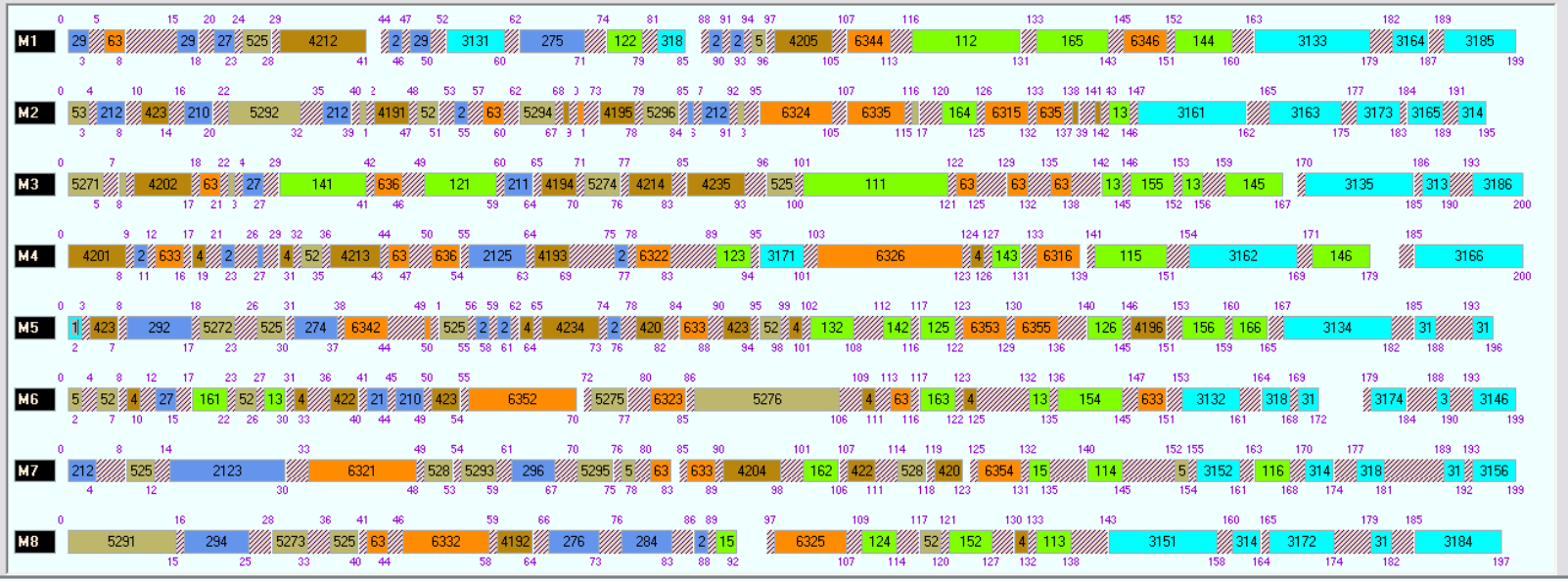
M1	151	143	133	155	164	116	4223	3131	4213	4214	4194	3171	3172	3132	2116	3174	3164	3186
	0-4	8-11	12-14	18-22	27-28	29-32	34-36	40-43	45-48	49-52	53-56	57-67	73-78	79-85	87-103	107-117	123-127	131-139
M2	121	4191	113	4211	4241	4244	4226	2111	2122	2112	284	276	286	3134	3184	3163	3166	
	0-4	7-10	11-15	18-21	22-34	36-48	50-53	55-59	60-62	63-67	71-75	78-88	90-102	108-114	116-120	121-125	129-139	
M3	131	162	4201	2102	123	163	4232	4242	4224	4205	271	2104	274	2124	3133	2106	3152	3155	3146
	0-2	3-4	6-12	13-17	20-22	23-27	28-30	33-37	42-49	52-56	57-67	69-73	74-79	87-91	92-95	100-104	106-111	116-121	128-139
M4	112	122	154	124	156	4192	4243	4203	292	4246	4195	273	294	295	2123	2105	3141	3144	3136
	1-4	8-10	12-16	21-25	26-30	31-34	35-39	40-44	45-48	52-56	57-60	67-72	74-80	81-84	86-88	93-97	104-109	113-128	129-138
M5	161	152	153	145	115	4212	4202	126	4234	4225	4215	3151	272	2114	3173	3142	3175	3176	
	0-1	4-8	10-14	17-19	21-22	24-30	32-34	36-38	43-45	49-50	53-59	60-65	66-71	75-91	93-103	108-113	114-119	122-137	
M6	281	2101	134	4231	2121	4221	165	4233	291	4204	4245	283	285	3181	2125	3183	3162	3154	3145
	0-8	9-13	14-16	18-20	21-23	24-28	29-31	33-35	36-42	45-47	51-55	56-64	72-80	82-86	89-92	93-109	112-114	115-120	122-137
M7	111	132	114	146	136	166	125	282	293	4196	2113	275	2115	2126	3143	3185	3156		
	0-1	2-12	15-18	19-25	27-29	32-34	35-37	40-48	49-52	58-64	67-71	75-80	83-95	98-104	111-116	119-123	126-136		
M8	141	142	144	135	4222	4193	4235	4236	4206	4216	2103	3161	3182	296	3153	3135	3165		
	0-2	4-10	14-16	23-25	28-30	33-45	46-48	49-51	54-57	58-61	63-71	72-82	83-87	95-104	108-113	115-118	125-133		

Şekil C.29 : Problem 7bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 139; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 21,5.

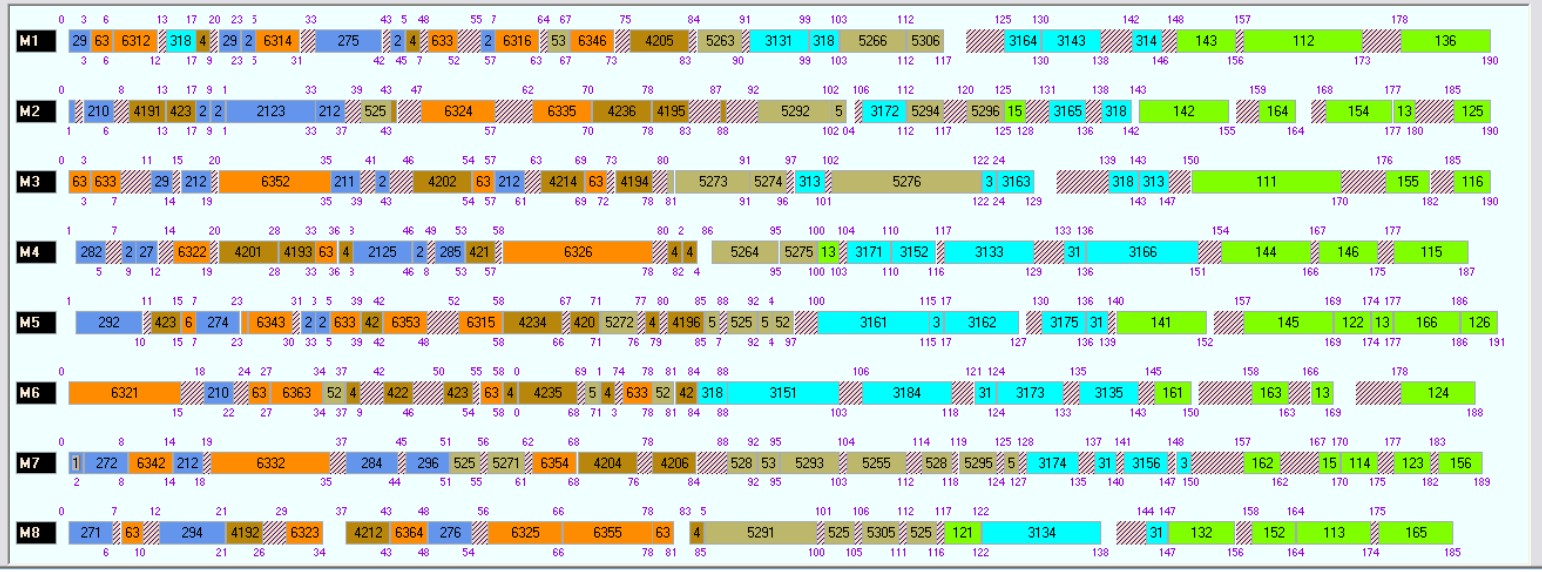


M1	291	272	5252	5281	3131	293	4223	122	5282	2112	6343	5254	6311	2113	5284	276	3181	5305	2116	4242	6325	112	143	6346	165	3164	6316	166
	0-3	3-6	6-10	10-14	16-24	25-28	30-32	34-39	40-42	42-44	44-50	50-54	54-57	59-60	62-64	65-68	69-73	75-77	78-80	80-83	86-96	99-114	114-118	121-127	128-138	142-147	147-153	154-164
M2	5301	4201	5302	5253	5273	4191	5264	2123	2124	5304	111	4194	4205	6324	5294	164	6315	5306	5296	6335	154	4245	4195	135	4246	3165	3185		
	0-3	3-11	14-16	16-20	22-27	27-32	33-36	36-48	48-52	53-54	55-70	70-75	75-83	83-93	93-98	98-103	104-110	110-111	111-116	116-124	124-133	133-134	135-140	144-147	151-152	153-158	160-170		
M3	6341	5271	4202	4203	2122	6352	5274	6331	2106	3132	286	4214	2126	6345	141	6314	3161	3163	155	3134	3136	3186							
	0-3	3-8	10-18	18-26	27-31	32-47	47-52	52-56	56-60	61-65	66-71	71-77	78-82	82-85	86-98	98-101	102-122	123-128	128-135	138-154	156-163	163-171							
M4	281	292	273	284	6322	2103	5263	5292	4193	6344	275	6312	2125	5286	4225	123	3133	152	134	3171	3152	3173	115	4216	146	3166			
	0-1	5-11	14-17	17-23	25-30	30-32	32-35	35-50	50-55	55-58	58-67	67-70	70-78	79-81	81-83	83-88	89-101	104-110	111-114	114-120	120-126	127-130	133-143	143-145	145-153	155-170			
M5	3141	282	5272	283	4231	4232	274	5265	132	6362	4224	2105	295	5255	6364	6333	4234	142	124	6355	3162	125	144	6366	4236	136	3183	3175	
	0-2	3-5	5-10	10-12	12-16	16-28	29-35	35-38	39-45	45-46	47-49	52-54	55-58	59-63	64-71	72-79	85-93	95-99	101-106	109-115	116-126	130-135	137-141	141-145	145-149	149-155	155-159	165-168	
M6	271	4241	5261	4221	131	2111	5262	4222	4211	294	161	3142	4233	163	2114	6313	4215	5275	4235	5276	4243	113	6365	4244	3153	6336	3144	3174	
	0-3	4-6	6-9	9-11	11-14	14-17	17-20	21-25	26-28	31-43	43-48	49-51	51-55	62-67	68-71	72-75	76-78	81-86	89-97	97-117	117-119	122-127	128-131	131-133	133-136	139-143	144-146	146-149	
M7	2101	5251	6321	2121	285	4204	5303	2104	6363	162	5283	296	4213	133	2115	5285	5293	6354	6334	5295	153	3143	4206	3172	114	156	4196	116	
	0-2	3-7	7-22	22-26	26-28	28-36	36-38	42-46	46-51	51-56	57-59	59-65	66-70	70-73	73-76	76-80	82-87	90-96	96-100	100-105	106-111	111-115	115-119	120-129	130-135	136-142	143-148	148-153	
M8	6351	2102	5291	6361	4192	121	6342	6353	4212	5256	6332	6323	3151	151	6326	5266	126	4226	145	6356	3154	3184							
	0-3	4-8	8-23	24-28	28-33	33-38	38-44	44-53	54-60	62-66	66-78	81-86	86-101	102-105	108-128	128-131	131-136	138-140	140-148	148-151	152-155	157-169							

Şekil C.30 : Problem 8ha için en iyi çözüm: Yayılma süresi 171; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.

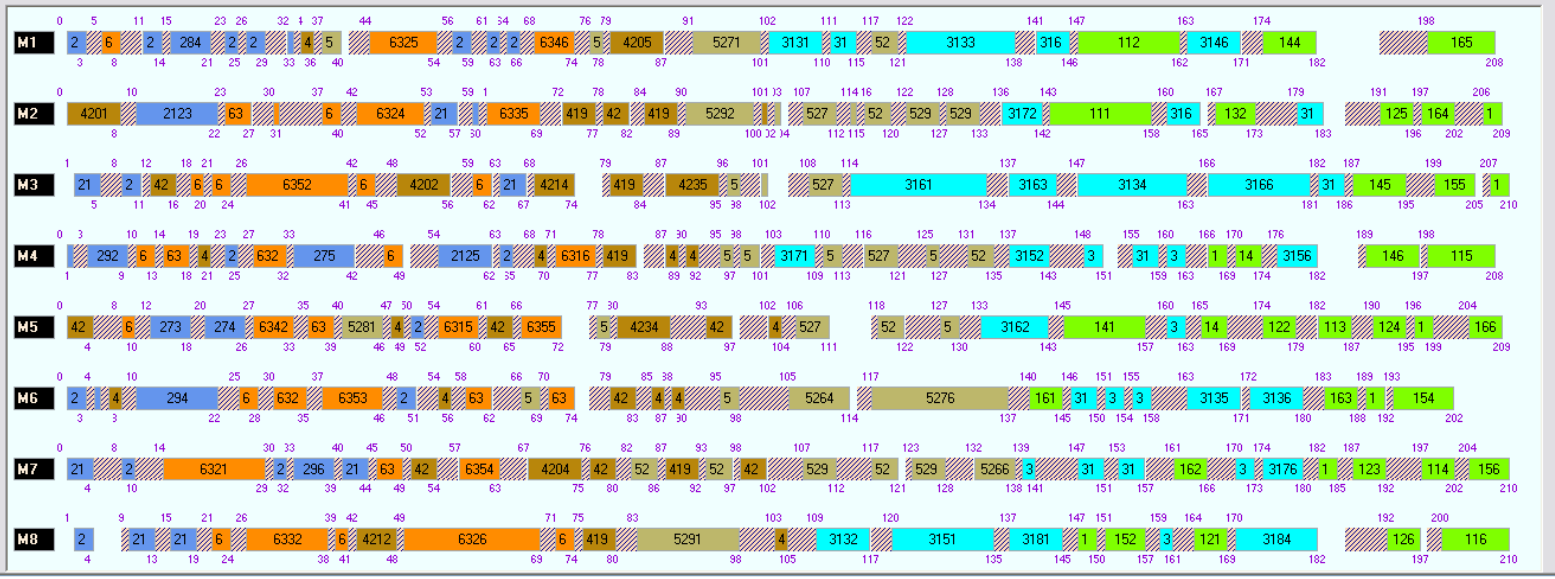


| | | |



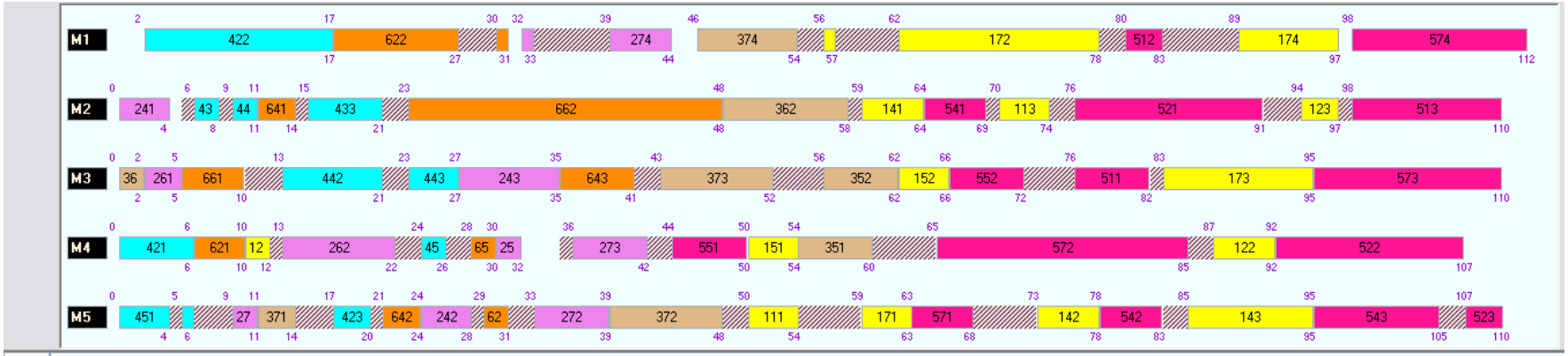
M1	291	6311	6312	3181	4241	295	2112	6314	275	2116	4223	6334	286	6316	5301	6346	4205	5263	3131	3183	5266	5306	3164	3143	3144	143	112	136
	0-3	3-6	6-12	13-17	17-19	20-23	23-25	25-31	33-42	43-45	45-47	48-52	55-57	57-63	64-67	67-73	75-83	84-90	91-99	99-103	103-112	112-117	125-130	130-138	142-146	148-156	157-173	178-190
M2	281	2102	4191	4232	2111	283	2123	2124	5251	4243	6324	6335	4236	4195	4246	5292	5284	3172	5294	5296	151	3165	3185	142	164	154	135	125
	0-1	2-6	8-13	13-17	17-19	19-21	21-33	33-37	39-43	43-44	47-57	62-70	70-78	78-83	87-88	92-102	102-104	106-112	112-117	120-125	125-128	131-136	138-142	143-155	159-164	168-177	177-180	185-190
M3	6341	6331	293	2122	6352	2114	2115	4202	6345	2126	4214	6366	4194	5302	5273	5274	3132	5276	3142	3163	3186	3136	111	155	116			
	0-3	3-7	11-14	15-19	20-35	35-39	41-43	46-54	54-57	57-61	63-69	69-72	73-78	80-81	81-91	91-96	97-101	102-122	122-124	124-129	139-143	143-147	150-170	176-182	185-190			
M4	282	2103	273	6322	4201	4193	6344	4211	2125	2106	285	4213	6326	4216	4225	5264	5275	131	3171	3152	3133	3154	3166	144	146	115		
	1-5	7-9	9-12	14-19	20-28	28-33	33-36	36-38	38-46	46-48	49-53	53-57	58-78	80-82	82-84	86-95	95-100	100-103	104-110	110-116	117-129	133-136	136-151	154-166	167-175	177-187		
M5	292	4231	6361	274	6362	6343	2105	2113	6333	4242	6353	6315	4234	4203	5272	4224	4196	5303	5253	5283	5265	3161	3141	3162	3175	3176	141	145	122	134	166	126
	1-10	11-15	15-17	17-23	23-24	24-30	31-33	33-35	35-39	39-42	42-48	52-58	58-66	67-71	71-76	77-79	80-85	85-87	88-92	92-94	94-97	100-115	115-117	117-127	130-136	136-139	140-152	157-169	169-174	174-177	177-186	186-191
M6	6321	2104	6313	6363	5261	4221	4222	4233	6365	4244	4235	5281	4215	6336	5262	4245	3182	3151	3184	3153	3173	3135	161	163	133	124		
	0-15	18-22	24-27	27-34	34-37	37-39	42-46	50-54	55-58	58-60	60-68	69-71	71-73	74-78	78-81	81-84	84-88	88-103	106-118	121-124	124-133	135-143	145-150	158-163	166-169	178-188		
M7	2101	272	6342	2121	6332	284	296	5252	5271	6354	4204	4206	5282	5304	5293	5255	5285	5295	5286	3174	3155	3156	3146	162	153	114	123	156
	0-2	2-8	8-14	14-18	19-35	37-44	45-51	51-55	56-61	62-68	68-76	78-84	88-92	92-95	95-103	104-112	114-118	119-124	125-127	128-135	137-140	141-147	148-150	157-162	167-170	170-175	177-182	183-189
M8	271	6351	294	4192	6323	4212	6364	276	6325	6355	6356	4226	5291	5254	5305	5256	121	3134	3145	132	152	113	165					
	0-6	7-10	12-21	21-26	29-34	37-43	43-48	48-54	56-66	66-78	78-81	83-85	85-100	101-105	106-111	112-116	117-122	122-138	144-147	147-156	158-164	164-174	175-185					

Şekil C.32 : Problem 8ba için en iyi çözüm: Yayılma süresi 191; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 12,83.



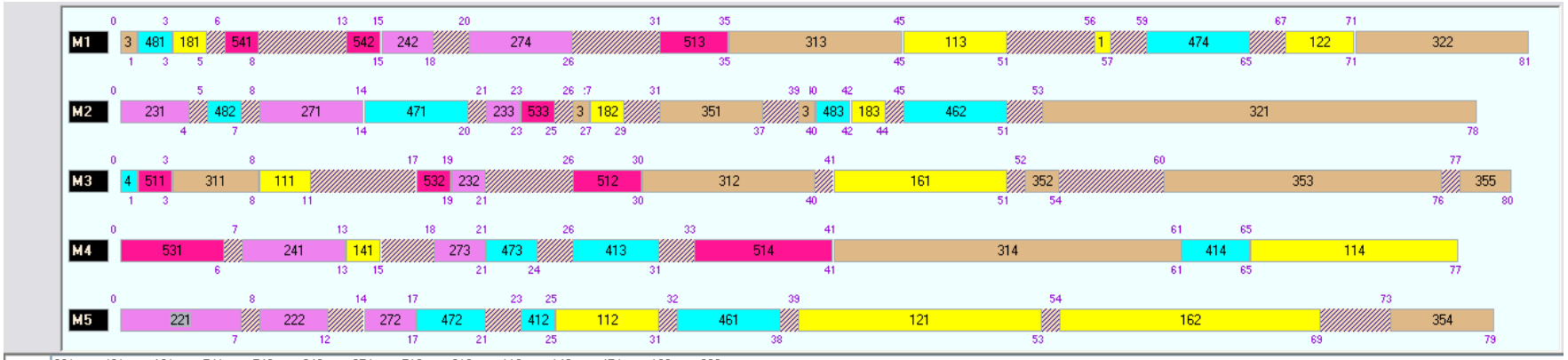
M1	291	6311	272	284	2112	295	2113	4223	5301	6325	276	286	2116	6346	5282	4205	5271	3131	3141	5254	3133	3164	112	3146	144	165			
	0-3	5-8	11-14	15-21	23-25	26-29	32-33	34-36	37-40	44-54	56-59	61-63	64-66	68-74	76-78	79-87	91-101	102-110	111-115	117-121	122-138	141-146	147-162	163-171	174-182	198-208			
M2	4201	2123	6363	6364	6343	6324	2124	2115	6335	4191	4232	4195	5292	4245	5304	5273	5306	5253	5294	5296	3172	111	3165	132	3185	125	164	135	
	0-8	10-22	23-27	30-31	37-40	42-52	53-57	59-60	61-69	72-77	78-82	84-89	90-100	101-102	103-104	107-112	114-115	116-120	122-127	128-133	136-142	143-158	160-165	167-173	179-183	191-196	197-202	206-209	
M3	2122	293	4222	6362	6341	6352	6314	4202	6345	2126	4214	4194	4235	5284	5303	5274	3161	3163	3134	3166	3186	145	155	136					
	1-5	8-11	12-16	18-20	21-24	26-41	42-45	48-56	59-62	63-67	68-74	79-84	87-95	96-98	101-102	108-113	114-134	137-144	147-163	166-181	182-186	187-195	199-205	207-210					
M4	281	292	6312	6331	4211	2103	6322	275	6344	2125	2106	4242	6316	4193	4244	4216	5302	5263	3171	5305	5275	5286	5256	3152	3173	3144	3154	131	143	3156	146	115
	0-1	3-9	10-13	14-18	19-21	23-25	27-32	33-42	46-49	54-62	63-65	68-70	71-77	78-83	87-89	90-92	95-97	98-101	103-109	110-113	116-121	125-127	131-135	137-143	148-151	155-159	160-163	166-169	170-174	176-182	189-197	198-208	
M5	4231	6361	273	274	6342	6333	5281	4224	2105	6315	4203	6355	5283	4234	4236	4246	5272	5255	5265	3162	141	3175	142	122	113	124	134	166					
	0-4	8-10	12-18	20-26	27-33	35-39	40-46	47-49	50-52	54-60	61-65	66-72	77-79	80-88	93-97	102-104	106-111	118-122	127-130	133-143	145-157	160-163	165-169	174-179	182-187	190-195	196-199	204-209					
M6	271	283	4221	294	6313	6323	6353	2114	4241	6366	5261	6336	4233	4243	4215	5262	5264	5276	161	3182	3153	3174	3135	3136	163	133	154					
	0-3	4-5	6-8	10-22	25-28	30-35	37-46	48-51	54-56	58-62	66-69	70-74	79-83	85-87	88-90	95-98	105-114	117-137	140-145	146-150	151-154	155-158	163-171	172-180	183-188	189-192	193-202					
M7	2121	2101	6321	285	296	2104	6334	4213	6354	4204	4225	5251	4196	5252	4206	5293	5285	5295	5266	3142	3183	3143	162	3155	3176	153	123	114	156				
	0-4	8-10	14-29	30-32	33-39	40-44	45-49	50-54	57-63	67-75	76-80	82-86	87-92	93-97	98-102	107-112	117-121	123-128	132-138	139-141	147-151	153-157	161-166	170-173	174-180	182-185	187-192	197-202	204-210				
M8	282	2102	2111	6351	6332	6365	4212	6326	6356	4192	5291	4226	3132	3151	3181	151	152	3145	121	3184	126	116											
	1-4	9-13	15-19	21-24	26-38	39-41	42-48	49-69	71-74	75-80	83-98	103-105	109-117	120-135	137-145	147-150	151-157	159-161	164-169	170-182	192-197	200-210											

Şekil C.33 : Problem 8bx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 210; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 26,50.



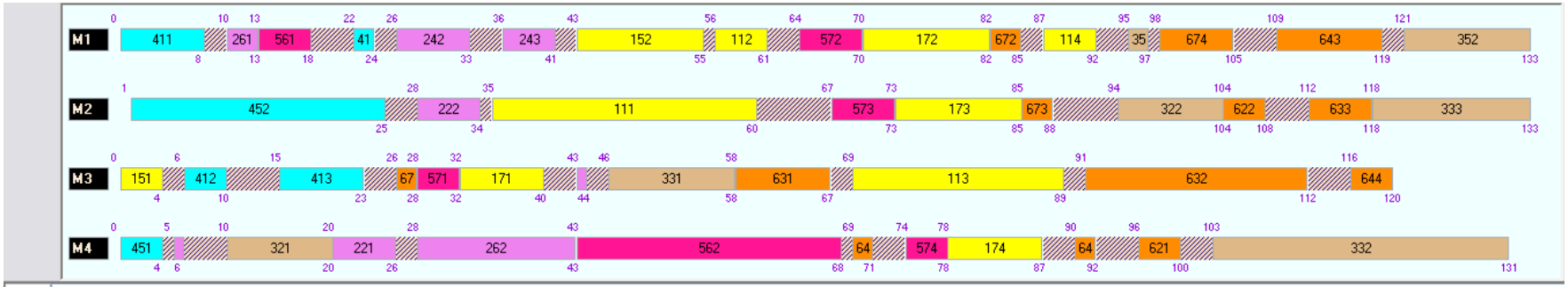
M1	422	622	652	252	274	374	112	172	512	174	574		
	2-17	17-27	30-31	32-33	39-44	46-54	56-57	62-78	80-83	89-97	98-112		
M2	241	432	441	641	433	662	362	141	541	113	521	123	513
	0-4	6-8	9-11	11-14	15-21	23-48	48-58	59-64	64-69	70-74	76-91	94-97	98-110
M3	361	261	661	442	443	243	643	373	352	152	552	511	173	573
	0-2	2-5	5-10	13-21	23-27	27-35	35-41	43-52	56-62	62-66	66-72	76-82	83-95	95-110
M4	421	621	121	262	452	651	251	273	551	151	351	572	122	522
	0-6	6-10	10-12	13-22	24-26	28-30	30-32	36-42	44-50	50-54	54-60	65-85	87-92	92-107
M5	451	431	271	371	423	642	242	623	272	372	111	171	571	142	542	143	543	523
	0-4	5-6	9-11	11-14	17-20	21-24	24-28	29-31	33-39	39-48	50-54	59-63	63-68	73-78	78-83	85-95	95-105	107-110

Şekil C.34 : Problem 9hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 112; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,67.



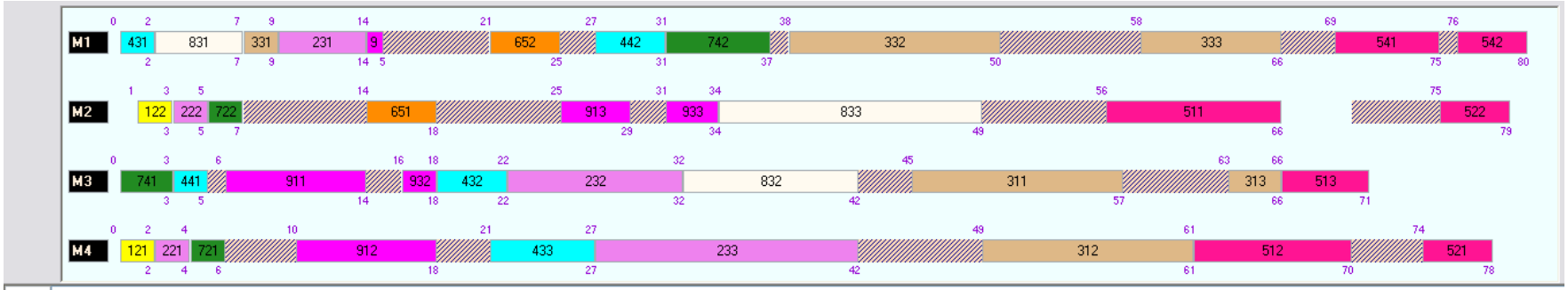
M1	381	481	181	541	542	242	274	513	313	113	142	474	122	322
	0-1	1-3	3-5	6-8	13-15	15-18	20-26	31-35	35-45	45-51	56-57	59-65	67-71	71-81
M2	231	482	271	471	233	533	382	182	351	383	483	183	462	321
	0-4	5-7	8-14	14-20	21-23	23-25	26-27	27-29	31-37	39-40	40-42	42-44	45-51	53-78
M3	411	511	311	111	532	232	512	312	161	352	353	355		
	0-1	1-3	3-8	8-11	17-19	19-21	26-30	30-40	41-51	52-54	60-76	77-80		
M4	531	241	141	273	473	413	514	314	414	114				
	0-6	7-13	13-15	18-21	21-24	26-31	33-41	41-61	61-65	65-77				
M5	221	222	272	472	412	112	461	121	162	354				
	0-7	8-12	14-17	17-21	23-25	25-31	32-38	39-53	54-69	73-79				

Şekil C.35 : Problem 10hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 81; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0.



M1	411	261	561	414	242	243	152	112	572	172	672	114	351	674	643	352
	0-8	10-13	13-18	22-24	26-33	36-41	43-55	56-61	64-70	70-82	82-85	87-92	95-97	98-105	109-119	121-133
M2	452	222	111	573	173	673	322	622	633	333						
	1-25	28-34	35-60	67-73	73-85	85-88	94-104	104-108	112-118	118-133						
M3	151	412	413	671	571	171	244	331	631	113	632	644				
	0-4	6-10	15-23	26-28	28-32	32-40	43-44	46-58	58-67	69-89	91-112	116-120				
M4	451	241	321	221	262	562	641	574	174	642	621	332				
	0-4	5-6	10-20	20-26	28-43	43-68	69-71	74-78	78-87	90-92	96-100	103-131				

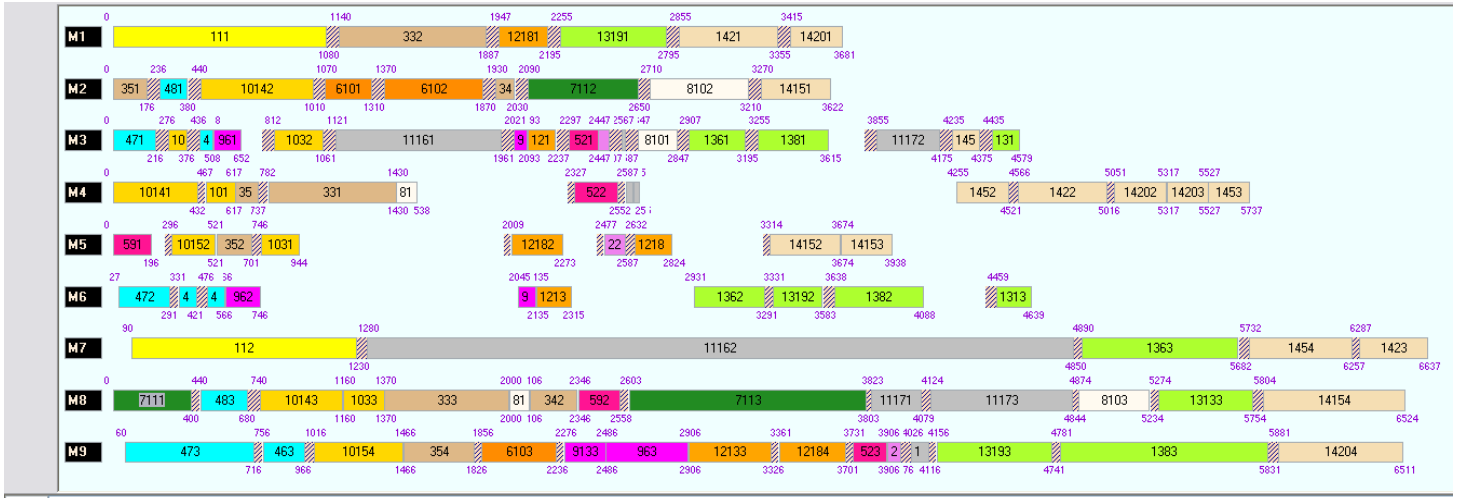
Şekil C.36 : Problem 11hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 133; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,5.



M1	431	831	331	231	931	652	442	742	332	333	541	542
	0-2	2-7	7-9	9-14	14-15	21-25	27-31	31-37	38-50	58-66	69-75	76-80
M2	122	222	722	651	913	933	833	511	522			
	1-3	3-5	5-7	14-18	25-29	31-34	34-49	56-66	75-79			
M3	741	441	911	932	432	232	832	311	313	513		
	0-3	3-5	6-14	16-18	18-22	22-32	32-42	45-57	63-66	66-71		
M4	121	221	721	912	433	233	312	512	521			
	0-2	2-4	4-6	10-18	21-27	27-42	49-61	61-70	74-78			

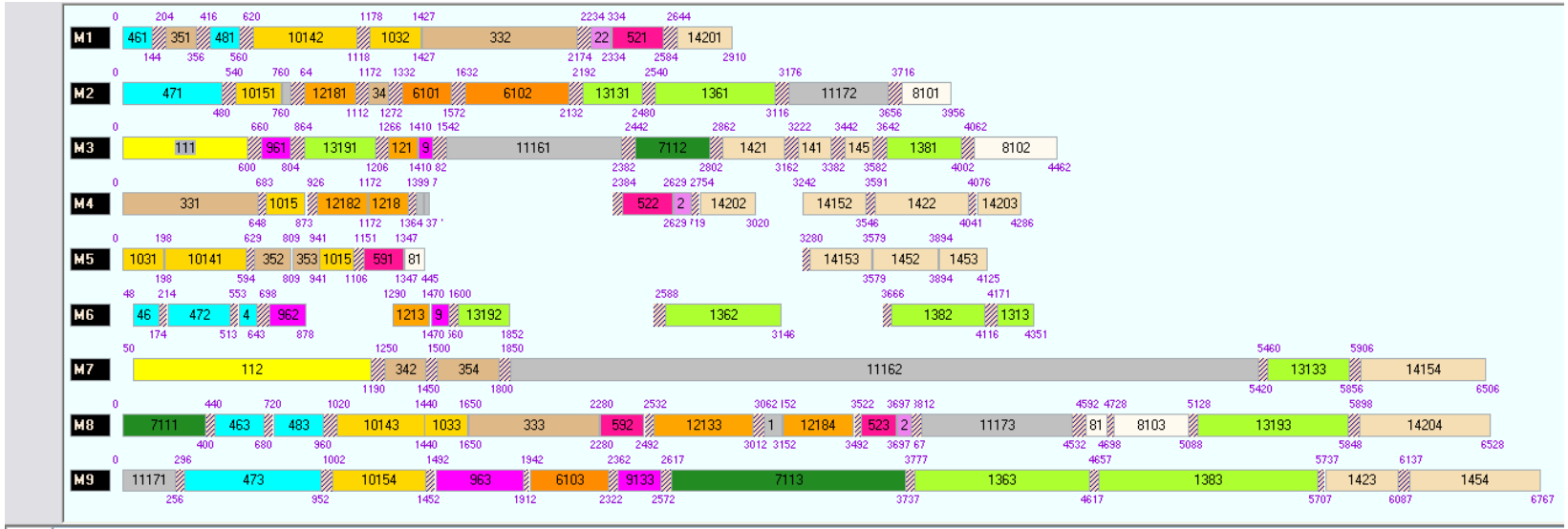
Şekil C.37 : Problem 12hx için en iyi çözüm: Yayılma süresi 80; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 0,22.

EK D: Uygulama sonuçları



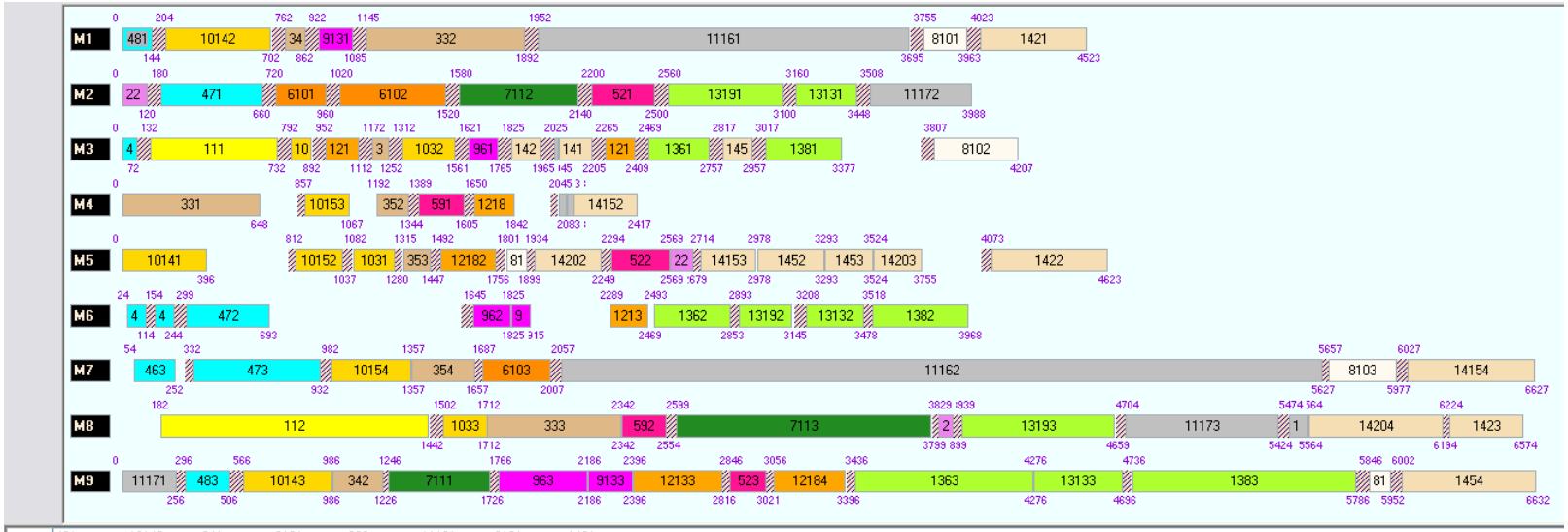
M1	111	332	12181	13191	1421	14201											
	0-1080	1140-1887	1947-2195	2255-2795	2855-3355	3415-3681											
M2	351	481	10142	6101	6102	341	7112	8102	14151								
	0-176	236-380	440-1010	1070-1310	1370-1870	1930-2030	2090-2650	2710-3210	3270-3622								
M3	471	10151	461	961	1032	11161	9131	12131	521	221	11151	8101	1361	1381	11172	1451	13131
	0-216	276-376	436-508	508-652	812-1061	1121-1961	2021-2093	2093-2237	2297-2447	2447-2507	2567-2587	2647-2847	2907-3195	3255-3615	3855-4175	4235-4375	4435-4579
M4	10141	10153	353	331	8121	522	11152	11153	1452	1422	14202	14203	1453				
	0-432	467-617	617-737	782-1430	1430-1538	2327-2552	2587-2625	2625-2655	4255-4521	4566-5016	5051-5317	5317-5527	5527-5737				
M5	591	10152	352	1031	12182	222	12183	14152	14153								
	0-196	296-521	521-701	746-944	2009-2273	2477-2587	2632-2824	3314-3674	3674-3938								
M6	472	482	462	962	9132	12132	1362	13192	1382	13132							
	27-291	331-421	476-566	566-746	2045-2135	2135-2315	2931-3291	3331-3583	3638-4088	4459-4639							
M7	112	11162	1363	1454	1423												
	90-1230	1280-4850	4890-5682	5732-6257	6287-6637												
M8	7111	483	10143	1033	333	8122	342	592	7113	11171	11173	8103	13133	14154			
	0-400	440-680	740-1160	1160-1370	1370-2000	2000-2106	2106-2346	2346-2558	2603-3803	3823-4079	4124-4844	4874-5234	5274-5754	5804-6524			
M9	473	463	10154	354	6103	9133	963	12133	12184	523	223	11154	13193	1383	14204		
	60-716	756-966	1016-1466	1466-1826	1856-2236	2276-2486	2486-2906	2906-3326	3361-3701	3731-3906	3906-3976	4026-4116	4156-4741	4781-5831	5881-6511		

Şekil D.1 : Uygulama probleminin önerilen algoritma ile çözümü: Yayılma süresi 6637; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 36,78.



M1	461	351	481	10142	1032	332	221	521	14201									
	0-144	204-356	416-560	620-1118	1178-1427	1427-2174	2234-2334	2334-2584	2644-2910									
M2	471	10151	11151	12181	341	6101	6102	13131	1361	11172	8101							
	0-480	540-760	760-804	864-1112	1172-1272	1332-1572	1632-2132	2192-2480	2540-3116	3176-3656	3716-3956							
M3	111	961	13191	12131	9131	11161	7112	1421	14151	1451	1381	8102						
	0-600	660-804	864-1206	1266-1410	1410-1482	1542-2382	2442-2802	2862-3162	3222-3382	3442-3582	3642-4002	4062-4462						
M4	331	10152	12182	12183	11152	11153	522	222	14202	14152	1422	14203						
	0-648	683-873	926-1172	1172-1364	1399-1437	1437-1467	2384-2629	2629-2719	2754-3020	3242-3546	3591-4041	4076-4286						
M5	1031	10141	352	353	10153	591	8121	14153	1452	1453								
	0-198	198-594	629-809	809-941	941-1106	1151-1347	1347-1445	3280-3579	3579-3894	3894-4125								
M6	462	472	482	962	12132	9132	13192	1362	1382	13132								
	48-174	214-513	553-643	698-878	1290-1470	1470-1560	1600-1852	2588-3146	3666-4116	4171-4351								
M7	112	342	354	11162	13133	14154												
	50-1190	1250-1450	1500-1800	1850-5420	5460-5856	5906-6506												
M8	7111	463	483	10143	1033	333	592	12133	11154	12184	523	223	11173	8122	8103	13193	14204	
	0-400	440-680	720-960	1020-1440	1440-1650	1650-2280	2280-2492	2532-3012	3062-3152	3152-3492	3522-3697	3697-3767	3812-4532	4592-4698	4728-5088	5128-5848	5898-6528	
M9	11171	473	10154	963	6103	9133	7113	1363	1383	1423	1454							
	0-256	296-952	1002-1452	1492-1912	1942-2322	2362-2572	2617-3737	3777-4617	4657-5707	5737-6087	6137-6767							

Şekil D.2 : Uygulama probleminin fabrika plânlama programı ile çözümü: Yayılma süresi 6767; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 85,92.



M1	481	10142	341	9131	332	11161	8101	1421
	0-144	204-702	762-862	922-1085	1145-1892	1952-3695	3755-3963	4023-4523
M2	221	471	6101	6102	7112	521	13191	13131	11172
	0-120	180-660	720-960	1020-1520	1580-2140	2200-2500	2560-3100	3160-3448	3508-3988
M3	461	111	10151	12181	351	1032	961	14201	11151	14151	12131	1361	1451	1381	8102
	0-72	132-732	792-892	952-1112	1172-1252	1312-1561	1621-1765	1825-1965	2025-2045	2045-2205	2265-2409	2469-2757	2817-2957	3017-3377	3807-4207
M4	331	10153	352	591	12183	11152	11153	14152							
	0-648	857-1067	1192-1344	1389-1605	1650-1842	2045-2083	2083-2113	2113-2417							
M5	10141	10152	1031	353	12182	8121	14202	522	222	14153	1452	1453	14203	1422	
	0-396	812-1037	1082-1280	1315-1447	1492-1756	1801-1899	1934-2249	2294-2569	2569-2679	2714-2978	2978-3293	3293-3524	3524-3755	4073-4623	
M6	462	482	472	962	9132	12132	1362	13192	13132	1382					
	24-114	154-244	299-693	1645-1825	1825-1915	2289-2469	2493-2853	2893-3145	3208-3478	3518-3968					
M7	463	473	10154	354	6103	11162	8103	14154							
	54-252	332-932	982-1357	1357-1657	1687-2007	2057-5627	5657-5977	6027-6627							
M8	112	1033	333	592	7113	223	13193	11173	11154	14204	1423				
	182-1442	1502-1712	1712-2342	2342-2554	2599-3799	3829-3899	3939-4659	4704-5424	5474-5564	5564-6194	6224-6574				
M9	11171	483	10143	342	7111	963	9133	12133	523	12184	1363	13133	1383	8122	1454
	0-256	296-506	566-986	986-1226	1246-1726	1766-2186	2186-2396	2396-2816	2846-3021	3056-3396	3436-4276	4276-4696	4736-5786	5846-5952	6002-6632

Şekil D.3 : Uygulama probleminin rassal TB algoritması ile çözümü: Yayılma süresi 6632; ortalama sipâriş teslim gecikmesi süresi 164,57.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hakan TEKBAŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: 05/05/1979 - İstanbul

Lisans Üniversite: İTÜ Makina Mühendisliği, 2001

Yüksek Lisans Üniversite: İTÜ Makina Mühendisliği, 2004

Yayın Listesi:

- **Tekbaş, H.**, Baskak, M, 2010. Müşteri sipârişlerinin çizelgeleme problemin esnek atölye tipi çizelgeleme problemine uyumlandırılması ve tavlama benzetimi ile çözümü, *10. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 16-18 Eylül, Girne Amerikan Üniversitesi
- **Tekbaş, H.**, Baskak, M, 2010. Esnek atölye tipi çizelgeleme probleminin melez-tavlama benzetimi algoritması ile çözümü, *10. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 16-18 Eylül, Girne Amerikan Üniversitesi