

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV MONTAJ HATLARINDA MONTAJ
ÖNCESİ ARA STOK İÇERİĞİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elif Elçin GÜNAY

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ufuk KULA

Ağustos 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MONTAJ HATLARINDA MONTAJ
ÖNCESİ ARA STOK İÇERİĞİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

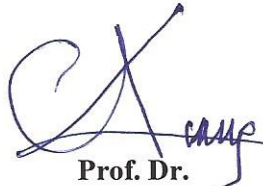
Elif Elçin GÜNAY

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ


Bu tez ^{18.8.2016} .. / .. / tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr.
Ufuk KULA
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Cemalettin KUBAT
Üye



Prof. Dr.
Erman COŞKUN
Üye



Doç. Dr.
Rifat Gürcan ÖZDEMİR
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Mustafa Ahmet Beyazıt OCAKTAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Elif Elçin GÜNAY

01.08.2016



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, motivasyonumu yükselterek çalışma şevkimi arttıran ve her zaman arkamda olduğuna inandığım kıymetli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ufuk KULA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Bugün, bu tez çalışmamı onun sabrı, gayreti ve öğreticiliği ile bitirmiş olmanın sevincini yaşamaktayım.

Tez izleme jürimde yer alan Prof. Dr. Cemalettin KUBAT ve Prof. Dr. Erman COŞKUN hocalarıma yaptıkları katkı, yorum ve yönlendirmeler için çok teşekkür ederim. Bana sundukları farklı bakış açıları, çalışmamı daha da zenginleştirmiştir.

Ayrıca doktora çalışmam süresinde verdikleri manevi destek için sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ahmet Beyazıt OCAKTAN ve meslektaşım Arş. Gör. Sena KIR'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisansüstü eğitimimin her aşamasında yanımda olan, beni her daim sabır ve anlayışla karşılayan, hiç bir konuda yardımlarını esirgemeyen değerli eşim Abdulkadir GÜNAY'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca ilgimi bir nebze de olsa esirgediğim oğlum Mustafa Erdem GÜNAY'dan beni affetmesini diliyorum.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen sevgili anneme, babama ve kardeşime çok teşekkür ederim.

Son olarak eğitimim süresince sağlamış olduğu burstan dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	vii
SUMMARY	viii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon.....	4
1.2. Problem Tanımı.....	7
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
2.1. Araç yeniden sıralama problemi ile ilgili çalışmalar	15
2.2. Ara stok kapasitesinin belirlenmesi problemi ile ilgili çalışmalar	20
2.3. Tezin diğer çalışmalardan farkı ve literatüre katkısı	22
BÖLÜM 3.	
PROBLEMİN OTOMATİK DEPOLAMA VE ÇEKME SİSTEMLERİ (AS/RS) İÇİN MODELLENMESİ.....	28
3.1. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modeli	30
3.2. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modelinin Örneklem Ortalaması Yaklaşımı (SAA) ile Çözümü	38
3.3. Sayısal Çalışma ve Modelin Uygulanması.....	47

3.3.1. SAA algoritmasının performansı	47
3.3.2. Çözümün literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması.....	48
3.3.3. Model parametrelerinin çözüme etkisi.....	52
3.3.4. Stokastik çözümün değeri (VSS)	61
3.4. Kural Tabanlı İki-aşamalı Sezgisel Model.....	65
3.4.1. Kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel model ile iki-aşamalı stokastik optimal yeniden sıralama modelin karşılaştırılması	70
3.5. Büyük Ölçekli Problemlerin Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Melez Bir Model ile Çözümü.....	78
3.5.1. İlk-aşama problemin genetik algoritma ile modellenmesi	80
3.5.2. Melez modelin performansını değerlendirmek amacıyla yapılan sayısal çalışmalar	89
BÖLÜM 4.	
PROBLEMİN YENİDEN SIRALAMA HATTI İÇİN MODELLENMESİ	91
4.1. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modeli.....	93
4.2. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modelinin Örneklem Ortalaması Yaklaşımı (SAA) ile Çözümü	100
4.3. Sayısal Çalışma ve Modelin Uygulanması.....	101
4.4. Problemin Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Melez Bir Model ile Çözümü	102
4.4.1. İlk-aşama problemin genetik algoritma ile modellenmesi	102
4.5. Sayısal Uygulama.....	107
4.5.1. Algoritmanın çözüm performansı	108
4.5.2. Model parametrelerin çözüme etkisi.....	111
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	116
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	126

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- AS/RS : Otomatik depolama ve çekme sistemi
- BGO : Boya giriş uyum oranı
- ÇSBO : Çizelgelenmiş sıra başarıım oranı
- EEV : Deterministik problemin farklı senaryolar için ortalama amaç fonksiyonu değeri
- EV : Deterministik problemin amaç fonksiyonu değeri
- FIFO : İlk giren ilk çıkar öncelik kuralı
- FS : İki-aşamalı stokastik problemin ilk aşaması
- GA : Genetik algoritma
- GB : Giga byte
- Ghz : Giga hertz
- KTP : Karma tamsayılı programlama
- NLV : Kural tabanlı yeniden sıralamada kontrol edilecek araç sayısı
- RP : Stokastik problemin amaç fonksiyonu değeri
- SS : İki-aşamalı stokastik problemin ikinci aşaması
- VSS : Stokastik çözümün değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Model 1 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler	5
Şekil 1.2. Model 2 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler	5
Şekil 1.3. Model 3 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler	5
Şekil 1.4. Araç temel üretim süreçleri.....	9
Şekil 1.5. 2013 yılı ortalama ve 2014 yılı ilk yedi ay için araç hata oranları	10
Şekil 1.6. ÇSBO'nun hesaplanması	11
Şekil 3.1. AS/RS ara stoğun doldurulması ve boşaltılması.....	28
Şekil 3.2. AS/RS ara stok aracılığı ile araçların yeniden sıralanması	29
Şekil 3.3. SAA yönteminin açıklanması	45
Şekil 3.4. İki-aşamalı stokastik model ve Inman'ın algoritması (2003) ile hesaplanan gerekli ara stok kapasitelerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 3.5. %30 BGO (solda) ve %50 BGO (sağda) seviyelerinde stok kapasitesindeki artışın ÇSBO üzerindeki etkisi.....	55
Şekil 3.6. %70 BGO (solda) ve %90 BGO (sağda) seviyelerinde stok kapasitesindeki artışın ÇSBO üzerindeki etkisi.....	56
Şekil 3.7. Melez modelin gösterimi	79
Şekil 3.8. Stokta tutulacak araç model-renk kombinasyonlarının belirlenmesi.....	82
Şekil 3.9. Melez modelde aday çözümlerin oluşturulması	83
Şekil 3.10. Melez modele ait çaprazlama örneği	87
Şekil 3.11. Melez modele ait mutasyon örneği	88
Şekil 4.1. Yeniden sıralama hattı için doldurulma ve boşaltma kuralları	92
Şekil 4.2. Yeniden sıralama hatları kullanıldığında araç montaj giriş sıralarının belirlenmesi	93
Şekil 4.3. Yeniden sıralama hatları için aday çözümün gösterimi.....	103
Şekil 4.4. Çaprazlama işlemlerinin şematik gösterimi.....	106

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı boya süreçleri için çizelgelenmiş sıra başarımları oranları	12
Tablo 2.1 Literatür özeti.....	25
Tablo 3.1. SAA algoritmasının farklı araç uzunluğu ve ara stok kapasiteleri için koşum süresi	48
Tablo 3.2. Inman (2003) ile iki-aşamalı stokastik modelin ÇSBO ve yeniden sıralama ara stok kapasitesi açısından karşılaştırılması.....	50
Tablo 3.3. Uygulama örneklerinde elde edilen ortalama ÇSBO değerleri ve %95 güven aralıkları	54
Tablo 3.4. Uygulama örneklerinde AS/RS’de tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonları ve miktarları	58
Tablo 3.5. Farklı hata oranları için stokastik çözümün değeri.....	64
Tablo 3.6. Optimal yeniden sıralama ile kural tabanlı yeniden sıralamanın ÇSBO açısından karşılaştırılması	71
Tablo 3.7. Kural tabanlı yeniden sıralama ile optimal yeniden sıralama modelinin AS/RS’de tutulan stok miktarları açısından karşılaştırılması.....	76
Tablo 3.8. Karma tamsayı programlama ve melez modelin koşum süreleri ve ÇSBO açısından karşılaştırılması	90
Tablo 4.1. SAA algoritmasının farklı araç uzunluğu ve yeniden sıralama hattı konfigurasyonları için koşum süresi.....	101
Tablo 4.2. Karma tamsayı programlama ve melez modelin koşum süreleri ve ÇSBO açısından karşılaştırılması	110
Tablo 4.3. İki-aşamalı stokastik model ve melez model için tutulan stokların karşılaştırılması.....	111
Tablo 4.4. BGO’nun ÇSBO üzerindeki etkisi.....	112
Tablo 4.5. Hata oranının ÇSBO üzerindeki etkisi.....	114
Tablo 4.6. Eklenen hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi	114

ÖZET

Anahtar kelimeler: Karma modellenli montaj hatları, araç yeniden sıralama problemi, örneklem ortalaması yaklaşımı (SAA), stokastik programlama

Karma modellenli montaj hatlarında hattın düzgün ilerlemesi, üretim kısıtları ve müşteri talepleri doğrultusunda belirlenmiş olan çizelgelenmiş sıraya uyuma bağlıdır. Fakat çizelgelenmiş sıra kasıtlı ve kasıtsız araç sıra değişiklikleri nedeniyle bozulabilmektedir. Bozulan sırayı onarmak için boyahane ile montaj departmanları arasında araç yeniden sıralanma ara stoğu bulunmaktadır. Bu ara stok bozulan sırayı üç farklı şekilde onarmaktadır: Bunlar (i) araç sıralarının değiştirilmesi, araçların yeniden sıralanması, (ii) hatalı araçların ara stokta tutulan araçlarla değiştirilmesi, (iii) son olarak da ara stok kapasitesi ve araç hatalarına bağlı olarak yeniden sıralamayla onarmanın mümkün olmadığı durumda ara stoktan montaj hattına araç beslenmesidir.

Tezde, boyahane rastgele oluşan hataları göz önünde bulunduran iki-aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin ilk aşamasında, bozulan sıranın onarılması için yeniden sıralama ara stoğunda tutulması gereken optimal model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar belirlenmektedir. İkinci aşamada ise boyahane oluşan hatalar gözlemlendikten sonra, araçların montaj giriş sıralarına karar verilmektedir. Problemin çözümü ara stok depolama sistemine bağlı olduğundan, otomatik depolama ve çekme sistemleri (AS/RS) ve yeniden sıralama hatları (mix-bank) için iki ayrı model kurulmuştur.

Geliştirilen iki-aşamalı stokastik modelin çözümü örneklem ortalaması yaklaşımı (SAA) ile yapılmış, ara stokta tutulması gereken optimal model-renk kombinasyonlarının miktarları belirlenmiştir. Ayrıca hata oranı, ara stok kapasitesi, araçların boya giriş sıralarının çizelgelenmiş sıraya uyumu gibi problem parametrelerinin çözüme etkisini incelemek için bir sayısal çalışma yapılmıştır.

Boya hatalarına bağlı araç sıra değişiklikleri anlık karar vermeye dayandığı için, araç üreticilerinin kolaylıkla uygulayabileceği kural tabanlı, sezgisel alternatif bir model kurulmuştur. Geliştirilmiş olan kural tabanlı model matematiksel modele yakın sonuçlar vermiştir. Son olarak, AS/RS ve yeniden sıralama hatlarında karşılaşılan büyük ölçekli problemleri de çözebilmek için, sunulan model genetik algoritma kullanılarak geliştirilmiştir.

DETERMINING PRE-ASSEMBLY RESEQUENCING BUFFER CONTENT IN AUTOMOTIVE ASSEMBLY LINES

SUMMARY

Keywords: Mixed-model assembly lines, car resequencing problem, sample average approximation (SAA), stochastic programming

In mixed model assembly lines, smooth operation of the line depends on adherence to the scheduled sequence which is determined according to production constraints and customer demand. However, the scheduled sequence is scrambled due to intentional and unintentional sequence alterations. A resequencing buffer between paint and final assembly is located to restore the altered sequence. Restoring the altered sequence requires three distinct operations of this buffer: (i) Changing the positions of vehicles (i.e., resequencing), (ii) replacing spare vehicles with paint defective vehicles, (iii) lastly inserting spare vehicles to final assembly from the buffer when restoring the altered sequence is not possible by resequencing due to paint defects and limited buffer capacity.

In this thesis, a two-stage stochastic programming model which considers the stochastic nature of paint defect occurrences is developed. In the first stage of the model, optimal number of model-color types placed into resequencing buffer to restore the scheduled sequence is determined. In the second stage after defect occurrences, the assembly entrance sequences of the vehicles are decided. Since the solution of the problem depends on the resequencing buffer type, two different models for automated storage and retrieval system (AS/RS) and mix-bank are built.

The developed two-stage stochastic program is solved by sample average approximation (SAA) algorithm to and the optimal number of model-color types to be placed in the buffer is found. Also a numerical study is performed to investigate the problem parameters to the solution such as paint defect rate, capacity of buffer, adherence ratio of vehicles entering paint shop to scheduled sequence.

Since vehicle resequencing due to the paint defects requires instant decision making, another heuristic rule based model to resequence vehicles easily by car manufacturers is developed. The proposed heuristic model performs as good as mathematical model. Lastly, to solve the large scale problems for both AS/RS and mix-bank resequencing buffers the purposed model is enhanced with genetic algorithm.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Karma modellenli otomobil montaj hatları, üzerinde bulunan farklı iş istasyonları sayesinde aynı hat üzerinde birbirinden farklı özellikte araçların üretilmesine imkan tanıdıkları için otomotiv sektöründe çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. 1960'lı yıllarda tezgah hazırlık zaman ve maliyetini azaltmak amacıyla Toyota üretim sistemi tarafından kullanılmaya başlanmış olup, sadece otomobil firmalarında değil beyaz eşya, elektronik, makine imalatı gibi farklı endüstri kollarında da halen yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Karma modellenli otomobil montaj hatlarında hattın dengeli ve kesintisiz akması için araçların bir sıra dahilinde üretilmesi gerekmektedir. Bu sıra araba üretiminin büyük bir bölümünü oluşturan montaj istasyonlarının kapasiteleri göz önüne alınarak oluşturulmaktadır. Montaj istasyonlarının kapasiteleri dikkate alınmadan yapılan araç üretiminde, peş peşe gelen yoğun iş yükü gerektiren araçlar işçilerin işlerini zamanında bitirememesine ve akabinde hattın yavaşlamasına, kimi zaman da durmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araçların hangi sıra ile üretileceği kararı montaj hattının düzgün ve kesintisiz ilerlemesi açısından önemlidir.

Araçların üretim sırası çizelgelenmiş sıra olarak adlandırılmaktadır. Araba üretimine kaporta departmanından bu sıra ile başlanmaktadır. Fakat bu sıra, araçlar montaj departmanına gelinceye kadar çeşitli nedenlerle kasıtlı veya kasıtsız olarak bozulmaktadır. Kasıtlı bozulma, araç sıralarının takip eden departmanın maliyet kısıtları nedeniyle değiştirilmesidir. Kasıtsız bozulma ise önceden öngörülemeyen nedenlerden dolayı, rastgele oluşan araç sıra değişiklikleridir. Bozulan sıra boyahane ile montaj departmanı arasında bulunan yeniden sıralama ara stoğu ile onarılmaktadır. Bu onarılma işlemi (i) araç sıralarının değiştirilmesi, yeniden sıralama, (ii) hatalı araçların ara stokta tutulan araçlarla değiştirilmesi, (iii) son olarak

da ara stok kapasitesi ve araç hatalarına bağılı olarak yeniden sıralamayla onarmanın mümkün olmadığı durumda, ara stokta tutulan araçların montaja beslenmesi suretiyle yapılmaktadır. Bu işlemlerden ilki olan araç sıralarının değiştirilmesi ara stoğun yeniden sıralama fonksiyonu ile yapılırken, diğer iki işlem ise ara stoğun stok tutma fonksiyonu ile gerçekleştirilmektedir.

Tezde ele alınan problem, kasıtlı ve kasıtsız olarak bozulan çizelgelenmiş sıranın onarılması için stok tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesi ve araçların montaja girmeden önce yeniden sıralanması problemidir. Tez kapsamında çalışılan firmada, ortalama %25 araç montaja çizelgelenmiş sıraya uygun olarak girmektedir [1]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Sawyer [2] yeniden sıralama ara stoğunun bulunmadığı durumda araçların %5'inin çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslendiğini raporlamıştır. Çizelgelenmiş sıraya uyumun bu kadar düşük olması ele alınan problemin önemini ortaya koymaktadır. Çizelgelenmiş sıranın onarılması ile daha fazla araç montajdan çizelgelenmiş sıraya uygun olarak çıkacak ve hattın verimliliği artırılmış olacaktır.

Ele alınan problem boyahanede oluşan hataları göz önünde bulundurduğu için, problem stokastik bir yaklaşımla modellenmiştir. Problem, araçların çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmesi için gerekli ara stok araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesini ardından araçların yeniden sıralanmasını içerdiği için iki-aşamalıdır. İlk aşamada, araçların çizelgelenmiş sıraya en yüksek uyumla montaja beslenmesi için ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları ve miktarları belirlenmektedir. İkinci aşamada ise boyahanede oluşan hatalar gözlendikten sonra ilk aşamada belirlenmiş olan stoklar altında araçların montaj giriş sıraları belirlenmektedir.

Problemin çözümü kullanılan ara stok türüne göre farklılık göstermektedir. Tezde, ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar ve yeniden sıralama problemi işletmelerde yaygın olarak kullanılan otomatik depolama

ve çekme sistemi (AS/RS) ve yeniden sıralama hattı (mix-bank, selectivity bank, paralel lanes) ara stok türleri için ayrı ayrı modellenerek çözülmüştür.

Tezin amacı,

- Araçların, çizelgelenmiş sıraya en yüksek uyumla montaja beslenmesi için ara stokta tutulacak araç model-renk kombinasyonlarına ve miktarlarına karar vermek,
- Rastgele oluşan boya hataları gözlemlendikten sonra, boyahaneden çıkan araçların montaja hangi sıra ile beslenmesi gerektiğini belirlemektir.

Bu tezde ayrıca aşağıdaki sorulara da cevap aranmaktadır.

- Ara stok kapasitesinin araçların yeniden sıralanması problemi üzerindeki etkisi nedir? Kapasitenin artırılması yeniden sıralama esnekliğini ne kadar artırır?
- Çizelgelenmiş sıra belirlerken boyahane ve montaj departmanları arasında eşgüdüm sağlanmalı mı?
- Hata oranında yapılacak iyileştirme, araçların çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmesini ne kadar etkiler?
- Yeniden sıralama hattı kullanıldığında, hat sayısındaki artışın yeniden sıralama performansı üzerindeki etkisi nedir?

Bölüm 1.1.'de tezin motivasyon kaynağı anlatılmakta, Bölüm 1.2.'de ise problem detayları ile sunulmaktadır. Bölüm 2.'de literatürdeki çalışmalar ve yapılan çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı ve katkısı yer almaktadır.

Bölüm 3.'de AS/RS ara stok türünün özellikleri anlatılmış, Bölüm 3.1.'de AS/RS ara stoğun kullanıldığı durum için problem modellenmiştir. Boyahane de oluşan hata sayısına bağlı oluşan senaryo sayısının fazlalığından dolayı Bölüm 3.2.'de problem örneklem ortalaması yaklaşımı (SAA) ile çözülmüştür. Bölüm 3.3.'te problem parametreleri ile ilgili sayısal çalışma yapılmış, yapılan sayısal çalışma

sonuçlarından yöneticilerin karar almasını kolaylaştıran çıkarımlar elde edilmiştir. Bölüm 3.4.'te, problemin uygulamada yaygınlaştırılması ve işçilerin anlık karar verebilmelerini sağlamak amacıyla işçilerin uygulayabileceği basit kuralları içeren kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel model ve bununla ilgili sayısal çalışma sunulmaktadır. Bölüm 3.5.'te büyük ölçekli problemlerin çözümünde kullanılmak üzere genetik algoritma (GA) tabanlı melez bir model geliştirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

Bölüm 4.'te bir başka depolama sistemi türü olan yeniden sıralama hattının özellikleri, Bölüm 4.1.'de ise geliştirilen iki-aşamalı model detaylarıyla anlatılmıştır. Bölüm 4.2.'de problemin SAA ile çözümü sunulmuştur. Bölüm 4.3.'te yapılan sayısal çalışmada problemin çözüm süresinin çok uzun olduğu görülmüş, bu nedenle Bölüm 4.4.'te genetik algoritma (GA) tabanlı melez bir model geliştirilmiş ve problem parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisi incelenmiştir.

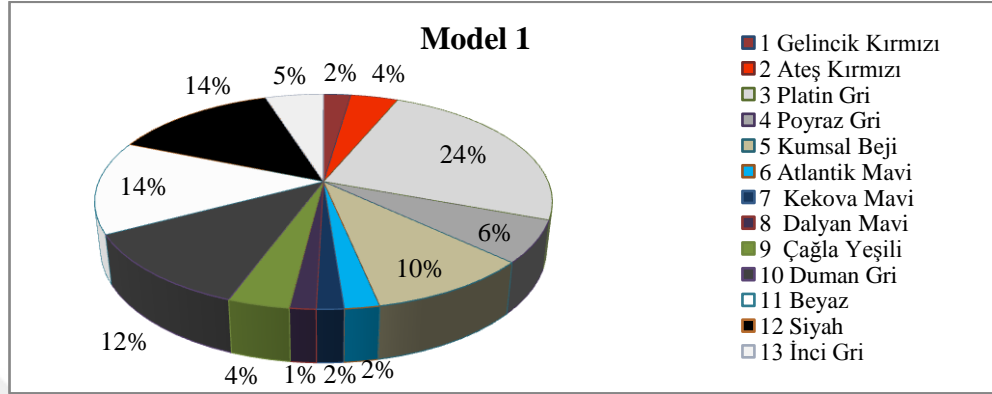
Bölüm 5.'te kullanılan depolama sistemi türüne göre geliştirilen iki ayrı modelin çözümünden elde edilen yönetsel bulgular paylaşılmıştır.

1.1. Motivasyon

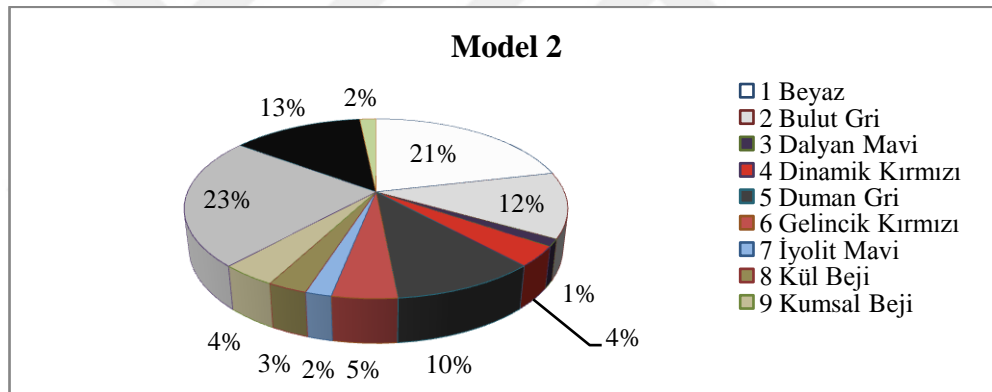
Tezde ele alınan problemin motivasyon kaynağı Avrupa'nın en büyük otomobil firmalarından birinin yaşadığı montaj öncesi operasyonlar nedeniyle bozulan sıranın onarılması için ara stokta hangi araç model-renk kombinasyonlarından stok tutulacağına belirlenmesi problemidir.

Firma Model 1, Model 2, Model 3 olmak üzere üç farklı tipte araç üretmektedir. Her bir model kendi içinde farklı teknik veya fiziksel özelliklere sahiptir. Örneğin her bir model için 6 farklı motor, vites kutusu ve kullanılan teknik ekipmanlara (ABS, CD çalar vb.) bağlı olarak 5 farklı versiyon bulunmaktadır. Ayrıca her bir model yine kendi içinde fiziksel özelliklerine göre üstünün açılabilme durumu (sun roof) ve rengine bağlı farklılık göstermektedir. Şekil 1.1., Şekil 1.2. ve Şekil 1.3.'te üretilen 3 farklı modelin talep edildiği renk dağılımları gösterilmektedir. Buna göre Model 1

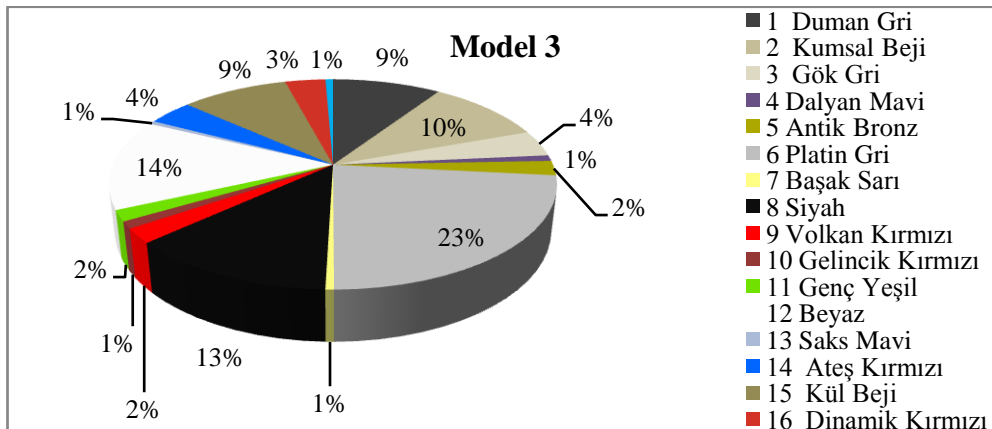
tipi araçlar 13, Model 2 tipi araçlar 12 ve Model 3 tipi araçlar da 17 farklı renge boyanmaktadır. Tüm bu teknik ve fiziksel özellikler düşünüldüğünde sadece Model 1 tipi araçtan 780 (6x5x2x13) farklı kombinasyonda üretim yapılmaktadır.



Şekil 1.1. Model 1 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler



Şekil 1.2. Model 2 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler



Şekil 1.3. Model 3 tipi aracın boyandığı renklere ait istatistikler

Montaj hattı, üretilecek tüm araçlara istenilen özelliklerin monte edilmesini sağlayacak kadar yavaş aktığında standart bir üretim zamanından bahsedilemez. Bu durumda farklı kombinasyonlardaki araçların aynı hat üzerinde önceden belirlenmiş olan bir çevrim süresinde ilerlemesi için araçların hangi sırada üretileceği belirlenmektedir. Firmanın ürettiği 3 farklı araç modelleri sırasıyla Model 1, Model 2 ve Model 3 olmak üzere, üretim kısıtlarını aşağıdaki şekilde belirlemiştir:

- Model 1 $\leq 1/3$
- Model 2 $\leq 1/3$
- Model 3 $\leq 2/3$

Bu kısıtlara göre herhangi üç araç içerisinde en fazla bir araç Model 1 veya Model 2 olabilir. Benzer şekilde herhangi üç araç içerisinde en fazla iki araç Model 3 tipi olabilir. Üretim kısıtları belirlenirken müşteri talepleri ve montaj hattında çalışan işçilerin işi yetiştirebilme süreleri göz önünde bulundurulmaktadır. Araçların üretim sıraları bu kısıtlar dahilinde belirlenmektedir.

Araba üretimine, montaj kısıtlarına uygun olarak belirlenmiş sırada, ilk olarak pres departmanından başlanmaktadır. Otomobilin kaportasını oluşturan parçalar pres hatlarında basılmaktadır. Bu aşamada düz levha sac şekil verme operasyonu ile ilk formunu almaktadır. Preste basılmış kaporta parçaları, kaporta departmanında kaynak ile birleştirilerek aracın kaportası oluşturulmaktadır.

Kaporta departmanından çıkan araçlar, boyahaneye yönlendirilmektedir. Boyahane girişinde peş peşe boyanacak araç sıra sayısının artırılması için araçların pozisyonlarında değişiklikler yapılarak araçların sıraları değiştirilmektedir. Otomotiv üretiminde önemli bir proses olan boya işlemlerinin amacı, kasayı oluşturan sac parçaların paslanmasını önlemek, bu parçaların birleşim yerlerinde sızdırmazlığı sağlamak, titreşim ile oluşabilecek sesi engellemek ve kasaya rengini vermektir. Bunların gerçekleşebilmesi için temel olarak uygulanan işlemler sırayla: yüzey işlem tüneli (yağ alma ve fosfat kaplama), kataforez banyosu, mastikleme, astar boya, son kat boya ve vernik, finisyon şeklindedir [1].

Boyahanedede hem aynı renge boyanacak araç renk sayısının arttırılması, hem de boya hataları nedeniyle çizelgelenmiş sırada bozulmalar gerçekleşmektedir. Çizelgelenmiş sıradaki bozulmalar nedeniyle zor araç modelleri peş peşe montaj departmanına girebilmektedir. Peş peşe gelen zor modellerden dolayı montaj istasyonuna ait kısıtlar sağlanamamaktadır. Montaj kısıtlarının sağlanamaması ise işçilerin işlerini zamanında yetiştirememesine ve hattın durmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan onarıldıktan sonra hatta beslenen hatalı araçların teslim zamanında gecikmeler yaşanmaktadır.

Araçların çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmesi için firma, boyahane ile montaj arasında yeniden sıralama ara stoğu tutmaktadır. Sawyer [2] çalışmasında ara stoğun olmadığı durumda araçların sadece %5'inin montaja çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada girdiğini göstermiştir. Tez kapsamında çalışılan firmada ise bu oran %11 ile %20 arasında değişmektedir. Ara stok araçları yeniden sıralayarak, hatalı araçları ara stokta tutulan araçlarla değiştirerek ve gerektiğinde ara stoktan montaj hattına araç besleyerek araçların çizelgelenmiş sıraya uyumunu arttırmaktadır. İşte bu noktada, ara stokta hangi model-renk kombinasyonundan kaç adet stok tutulacak ve araçlar hangi sıra ile montaja beslenecek problemleri ortaya çıkmaktadır. Çalışmanın motivasyonu, bozulan araç sırasının onarılması için hangi model-renk kombinasyonundan kaç adet stok tutulacağına karar verilmesi problemidir. Çok düşük sayıda aracın çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada montaja girmesi problemin önemini ortaya koymaktadır.

1.2. Problem Tanımı

Karma modelli otomobil montaj hatlarında, istasyon iş yüklerinin ve malzeme tüketiminin dengelenmesi, hattın kesintisiz bir şekilde ilerlemesi için araçların hangi sıra ile üretileceğini gösteren bir sıra belirlenmektedir. Belirlenmiş olan bu sıra “çizelgelenmiş sıra” olarak adlandırılmaktadır. Çizelgelenmiş sıraya uyumsuz gerçekleştirilen üretim, iş istasyonlarında aşırı yüklenme, kalite problemleri, uzun çevrim süreleri hatta kimi zaman da hattın durmasına neden olmaktadır [3]. Bu

nedenle günlük üretim talebinin sağlanmasında çizelgelenmiş sıraya uygun üretim yapmak, montaj hattında problem yaşanmaması açısından çok önemlidir.

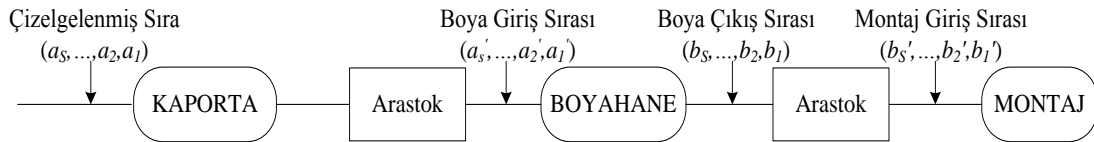
Araçların hangi sıra ile üretileceğini gösteren çizelgelenmiş sıranın belirlenmesi problemi literatürde araç sıralama problemi olarak adlandırılmaktadır. Araç sıralama problemi, ilk defa Parello ve ark. [4] tarafından ele alınmıştır. Araç sıralama probleminde amaç, montaj hattının belirlenmiş olan çevrim süresinde kesintisiz akması için her bir istasyonun kısıtları göz önünde bulundurularak araçların üretim sırasının belirlenmesidir [4-9].

Araba üretimine, kaporta departmanından çizelgelenmiş sıra ile başlanmaktadır. Çizelgelenmiş sıra, çalışmada (a_s, \dots, a_2, a_1) ile gösterilmektedir. Burada a_i , çizelgelenmiş sıradaki i 'nci pozisyondaki aracı, S ise çizelgelenmiş sırada bulunan araç sayısını göstermektedir. Kaportadan bu sıra ile çıkan araçlar, boyahane öncesinde bulunan bir ara stok sayesinde boyahanenin kısıtlarına uygun bir şekilde yeniden sıralanmaktadır. Boyahanenin kısıtlarına uygun bir şekilde belirlenmiş olan sıra boya giriş sırası olarak adlandırılmakta ve $(a'_s, \dots, a'_2, a'_1)$ ile gösterilmektedir. Burada yapılan sıra değişikliğinin amacı aynı renge boyanacak araç parti sayısının artırılarak, boya hazırlık maliyetlerinin azaltılmasıdır.

Boya işlemleri süresince, önceden öngörülemeyen sayıda ve sıradaki araçlarda hatalar oluşmaktadır. Oluşan bu belirsizlikler sonucunda boyahane giriş sırası bir kez daha bozulmaktadır. Boya hatalarından kaynaklanan sıra bozulmalarının da olduğu, araçların boyahanedен çıkış sıralarının gösterildiği sıra boya çıkış sırası olarak adlandırılmaktadır. Araçların boya çıkış sırasındaki yerleri ise (b_s, \dots, b_2, b_1) ile gösterilmektedir.

Boyahanedен (b_s, \dots, b_2, b_1) sırasıyla çıkan araçlar montaj öncesinde bulunan ara stok ile çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde yeniden sıralanmaktadır. Burada yapılan yeniden sıralamanın amacı, araçların mümkün olduğunca çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmesini sağlamaktır. Montaj öncesinde bulunan ara stokta

yeniden sıralanan araçların montaja beslendiği sıra montaj giriş sırası olarak adlandırılmakta ve $(b'_s, \dots, b'_2, b'_1)$ ile gösterilmektedir. Şekil 1.4.'te araba temel üretim prosesleri ve araba üretimi boyunca araç sıralarında meydana gelen değişiklikler gösterilmektedir.

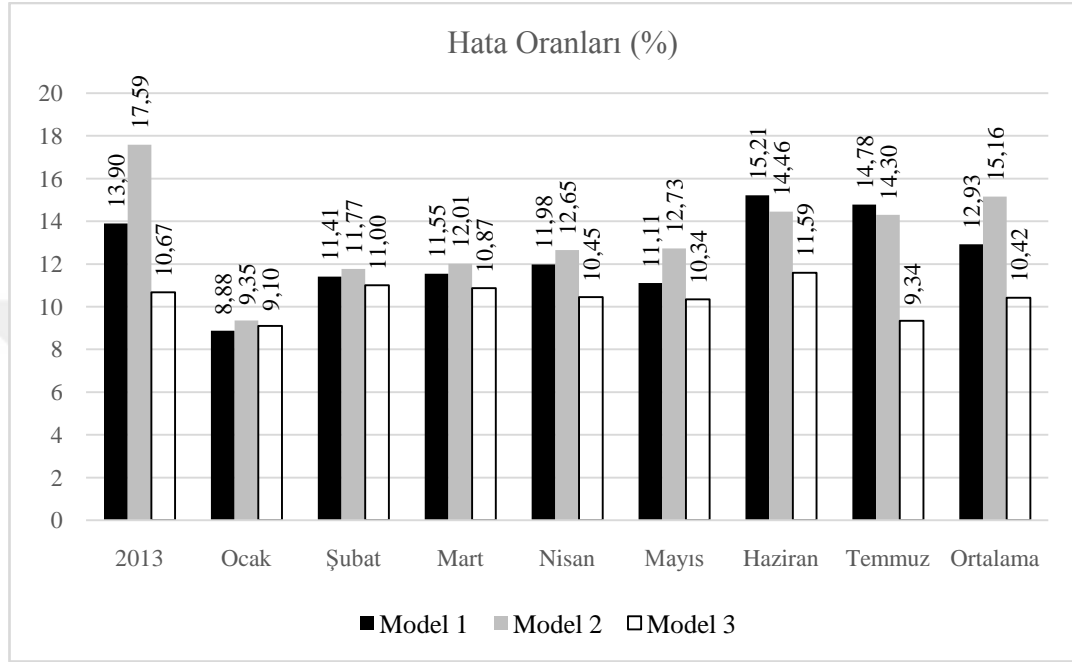


Şekil 1.4. Araç temel üretim süreçleri

Boya giriş sırasının oluşturulması için çizelgelenmiş sırada yapılan değişiklik, boyahane de oluşacak boya hazırlık süre ve maliyetlerinin azaltılması için planlanarak yapılmaktadır. Ding ve Sun [6] planlı yapılan bu sıra değişikliğini kasıtlı yeniden sıralama, Boysen ve ark. [7] ise proaktif yeniden sıralama olarak adlandırmışlardır. Boya çıkış sırasında meydana gelen araç sıralarındaki değişiklik ise boya hataları, malzeme eksikliği, makine arızaları gibi önceden ne zaman ve nasıl oluşacağı bilinmeyen nedenlerden kaynaklanmaktadır. Boya giriş sırasında meydana gelen araç sıra değişiklikleri önceden belli iken, boyahane çıkış sırasındaki araç sıra değişikliklerini önceden bilmek mümkün değildir. Önceden bilinmeyen nedenlerden dolayı boya giriş sırasında oluşan araç sıra değişikliklerini gidermek için yapılan yeniden sıralama Boysen ve ark. [7] tarafından reaktif yeniden sıralama olarak adlandırılmaktadır.

Otomobil firmalarında karşılaşılan en büyük belirsizlik boya hatalarından kaynaklanan araç sıra değişiklikleridir. Boyama öncesinde hangi sıradaki araçların hatalı boyanacağı, kaç adet aracın hatalı boyanacağı bilinmediği için boyahane de araçların hangi sıra ile çıkacağı ve kaç adet sağlam olacağını bilmek mümkün değildir. Boyahane de oluşan hatalar üretilen araç modeline ve rengine bağlı olarak değişmektedir. Boya hataları bazı renklerde %40 değerlerini bulabilmektedir. Şekil 1.5.'te Avrupa'nın en büyük otomobil firmalarından birine ait 2013 yılı ve 2014 yılının ilk yedi ayı için hata istatistikleri sunulmuştur. Şekil 1.5.'e göre, 2013 yılı için Model 1'den ortalama %13,9 araç; Model 2'den ortalama %17,59 araç ve Model

3'ten ortalama %10,67 araç yeniden boyama işlemi için boyahaneye geri gönderilmektedir. Hata oranları firmadan firmaya değişmekle birlikte, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde %85'i bulan hata oranları ile karşılaşıldığı durumlar görülmüştür [7].



Şekil 1.5. 2013 yılı ortalama ve 2014 yılı ilk yedi ay için araç hata oranları

Çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası arasındaki benzerliğin ölçülmesi için birtakım performans göstergeleri kullanılmaktadır. Tez kapsamında çalışılan firma “Çizelgelenmiş Sıra Başarım Oranı” (ÇSBO) performans göstergesini kullanmaktadır. Bu oran, montaj giriş sırasında çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada bulunan araçların toplam yeniden sıralanan araç sayısına oranlanması ile bulunmaktadır. Diğer bir deyişle montaj giriş sırasında doğru pozisyonda bulunan araç sayısının toplam araç sayısına oranıdır. Literatürde “Sıra Uyum Oranı” adıyla benzer bir performans göstergesi Meissner [8] tarafından kullanılmaktadır.

Çizelgelenmiş sıra montaj istasyonlarının kısıtları göz önüne alınarak belirlendiği için, bu sıraya uyumlu montaj giriş sırası elde etmek montaj hattının dengeli ve düzenli bir şekilde ilerlemesi için çok önemlidir. Yani yüksek ÇSBO, araçların

montaj hattına istenilen sıra ile beslenmesini sağlayacak böylelikle daha kısa çevrim süresi ile çalışabilmek mümkün olacaktır.

Şekil 1.6.'da ÇSBO'nun nasıl hesaplandığı gösterilmektedir. Şekil 1.6.'da gösterilen M1, M2 ve M3 sırasıyla Model 1, Model 2 ve Model 3 araçları; yine C1, C2 ve C3 de sırasıyla bu araçların boyanacağı renkleri Renk 1, Renk 2 ve Renk 3 göstermektedir. Buna göre M1C1, aracın Model 1 ve Renk 1'e boyalı olduğu anlamına gelmektedir. Çizelgelenmiş sıranın sağdan sola doğru M1C2-M1C1-M3C1-M1C3-M1C3-M1C1 olduğunu ve boyahanedeki oluşan hatalar sonucunda montaj giriş sırasının yine sağdan sola doğru M1C2-M1C3-M3C1-M1C1-M1C2-M2C1 şeklinde değiştiğini düşünelim. Bu durumda montaj giriş sırasında yuvarlak ile işaretlenmiş birinci, ikinci, üçüncü ve beşinci araçların (sağdan sola doğru) çizelgelenmiş sıradakinden farklı olduğu görülmektedir. Sadece dördüncü ve altıncı araçlar, çizelgelenmiş sıradaki pozisyonları ile aynı sırada yer almaktadır. Bu durumda altı araç içerisinde iki araç doğru sıralanmış olduğundan, ÇSBO %33 olarak hesaplanmaktadır.

Çizelgelenmiş Sıra	M1C2	M1C1	M3C1	M1C3	M1C3	M1C1
Montaj Giriş Sırası	M1C2	M1C3	M3C1	M1C1	M1C2	M2C1

Şekil 1.6. ÇSBO'nun hesaplanması

Tablo 1.1.'de boyahanedeki gerçekleşen farklı işlemlerdeki ÇSBO değerleri listelenmiştir. Örneğin 2013 yılı ocak ayı için ortalama her yüz araçtan 65,4 tanesi istenilen sırada boyahaneye girmektedir. Kataforez çıkışında bu oran %24,8'e; astar boya girişinde %22,3'e; son kat boya çıkışında %13,8'e ve finisyon işlemi sonucunda %11,6'ya düşmektedir. Diğer bir değişle çizelgelenmiş sıraya %65,4 oranında uyumlu gelen araçlar boyahanedeki %11,6 uyum oranı ile ayrılmaktadır. 2013 yılı ilk altı ayı için boyahanedeki çıkan ortalama her yüz araçtan sırasıyla 11,6 -

15,1 - 16,8 - 27,9 - 30,1 - 20 tanesi çizelgelenmiş sıraya uygun sıralanmıştır. Finisyon çıkışında araçların çizelgelenmiş sıra başarımlarının (ÇSBO) bu denli düşük olması ele alınan problemin işletme açısından ne kadar önemli olduğunun göstergesidir.

Tablo 1.1. Farklı boya süreçleri için çizelgelenmiş sıra başarımları

Aylar	Boya girişi	Kataforez çıkışı	Astar boya giriş	Son kat boya çıkışı	Finisyon çıkışı
2013 / 01	%65,4	%24,8	%22,3	%13,8	%11,6
2013 / 02	%81,1	%35,7	%30,7	%17,9	%15,1
2013 / 03	%70,7	%44,1	%32,3	%18,8	%16,8
2013 / 04	%81,1	%40,9	%34,1	%18,9	%27,9
2013 / 05	%81,8	%37,5	%32,4	%18,4	%30,1
2013 / 06	%60,6	%24,7	%20,9	%12,9	%20,0

Araçların çizelgelenmiş sıraya uyum oranlarının artırılması amacıyla boyahane ile montaj arasında araç yeniden sıralama ara stoğu bulunmaktadır. Bu ara stok (i) araçların sıralarının değiştirilmesi, (ii) hatalı araçların ara stokta tutulan araçlarla değiştirilmesi ve (iii) son olarak da ara stok kapasitesi ve boya hatalarına bağlı olarak yeniden sıralamayla bozulan sıranın onarılamadığı durumda, ara stoktan montaja araç beslenmesi suretiyle bozulan sırayı onarmaktadır.

Araçların çizelgelenmiş sıraya yüksek bir uyumla montaja beslenmesi için sınırlı yeniden sıralama ara stok kapasitesi etkin bir şekilde kullanılmalıdır. Yeniden sıralama ara stoğunun etkin kullanımı iki faktöre bağlıdır: (i) ara stokta hangi model ve renkten kaç adet stok tutulacağına, (ii) boyahane oluşmuş hatalar gözlemlendikten sonra, araçların montaj kısıtlarına uygun bir şekilde nasıl yeniden sıralanacağına.

Tezde ele alınan problem, araçları mümkün olan en yüksek ÇSBO ile montaja beslemek için,

- Montaj öncesinde bulunan ara stokta tutulması gereken optimum model-renk araç kombinasyonlarına ve miktarlarına,
- Boyahanedeki oluşan hatalar gözlemlendikten sonra araçların montaj giriş sıralarına karar vermektir.

Problem hem ara stokta tutulması gereken optimum model-renk araç kombinasyonlarına ve miktarlarına, hem de araçların montaj giriş sıralarına karar verilmesini içerdiği için, iki-aşamalıdır. Geliştirilen modelin ilk aşamasında ara stokta tutulması gereken optimum araç model-renk kombinasyonuna ait miktarlara karar verilmektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan stoklar altında, boyahanedeki oluşan hatalar gözlemlendikten sonra araçların maksimum ÇSBO elde etmek için hangi sıra ile montaja beslenmesi gerektiğine karar verilmektedir. Geliştirilen modelde boyahanedeki rastgele oluşan araç hataları dikkate alındığı için stokastik bir yaklaşım kullanılmıştır.

Ele alınan problemin modellenmesi ve çözülmesi işletmede kullanılan yeniden sıralama depolama sistemi türüne göre farklılık göstermektedir. Uygulamada en yaygın olarak kullanılan yeniden sıralama ara stok türleri, otomatik depolama ve çekme sistemleri (AS/RS) ve yeniden sıralama hatlarıdır. Tezde, bu iki ara stok türü için problem ayrı ayrı modellenmektedir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Araç yeniden sıralama problemi ile ilgili yapılan çalışmalar Boysen ve ark. tarafından (i) yapılan sıra değişikliğinin nedenine, (ii) kullanılan depolama sistemi türüne, (iii) alınacak karara, (iv) amacına ve (v) çözüm yöntemine göre sınıflandırılmıştır. Araç sıra değişikliğinin nedenine bağlı olarak, problem reaktif veya proaktif yaklaşımla ele alınmıştır. Reaktif yeniden sıralama boya hataları, araç bozulmaları, malzeme eksikliği gibi önceden öngörülemeyen nedenlerden dolayı araç sırasında meydana gelen değişikliklerdir. Proaktif yeniden sıralama ise takip eden atölyenin kısıtlarına göre araç sıralarının kasıtlı olarak yer değiştirilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Reaktif yeniden sıralamada hangi araçların sıralarında nasıl bir bozulma meydana geleceği belli değil iken, proaktif yeniden sıralamada hangi pozisyonlarda nasıl bir değişiklik olacağı önceden bellidir. Bu nedenle ele alınan çalışmalar yeniden sıralamanın nedenine bağlı olarak farklı farklı modellenmektedir. Problem ayrıca yeniden sıralamanın yapılacağı depolama sistemine göre farklılık göstermektedir. Uygulamada en yaygın olarak kullanılan depolama sistemleri (ara stok türü) AS/RS, yeniden sıralama hattı ve araç çekme masasıdır. Depolama sistemleri farklı kurallara göre araçları depolayıp hatta beslediği için, problem kullanılan sisteme göre farklı boyutlarda ele alınmaktadır. Araçların yeniden sıralandıkları depolama sisteminin nereye kurulacağı, kapasitesinin ne olacağı, sanal yeniden sıralamanın (araçların değil sıra numaralarının değiştirilmesi) yapılıp yapılamayacağına bağlı olarak da literatürdeki çalışmalar sınıflandırılmıştır. Bir diğer sınıflandırma yeniden sıralamanın yapılma amacına göre belirlenmiştir. Buna göre çalışmalar çizelgelenmiş sıranın aynısının montaj öncesinde yeniden oluşturulması, aynı renge boyanacak araç parti sayısının artırılması, zor modellerin peş peşe gelmesinin engellenerek, istasyon yüklerinin dengelenmesi, araçlara monte edilecek donanımlara ve yalın üretime ait kısıtların sağlanması amacıyla yapılmıştır. Çözüm

yöntemine göre ise çalışmalar kesin çözüm bulan, sezgisel yaklaşımla çözüm bulan veya benzetim modeli ile çözüm bulan çalışmalar olarak üç sınıfta ele alınmıştır [7].

Tezde ele alınan problem, araçları çizelgelenmiş sıraya en uygun bir şekilde montaja beslenmek için boyahane ile montaj arasında bulunan ara stokta tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesidir. Problem hem araçların yeniden sıralanmasını hem de ara stokta tutulacak araç kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesini içerdiği için bu konuda yapılan çalışmalar farklı başlıklar altında incelenmektedir.

2.1. Araç yeniden sıralama problemi ile ilgili çalışmalar

Tezde, literatürde ele alınan araç yeniden sıralama çalışmaları, ara stoğun bulunduğu yere göre iki kategoriye ayrılmıştır. Bunlardan ilki boyahane öncesinde bulunan ara stok ile ilgili çalışmalar, ikincisi ise montaj öncesinde bulunan ara stok ile ilgili çalışmalardır. Boyahane öncesinde bulunan ara stoğun amacı, boya hazırlık zaman ve maliyetini azaltmak için aynı renge boyanacak araç sayısını arttıracak şekilde araçların yeniden sıralanmasıdır. Montaj öncesinde tutulan ara stoğun amaçları ise şu şekildedir: montaj istasyonlarında düzgün bir iş akışı sağlanmak ve iş yükünü dengelemek, araçların kaportaya giriş sırasının aynısını montaj istasyonundan önce oluşturmak, montaj kısıtlarından sapmaları azaltmak ve tedarikçiden gelen parçaları zamanında işlemek.

Boyahane öncesinde tutulan ara stok ile ilgili Lahmar ve ark. [9], araçların boyahane öncesinde yeniden sıralanması ve her bir aracın gelen talepler doğrultusunda hangi renge boyanacağını belirlemesi problemini ele almışlardır. Çözümün araç çekme masası sayısına ve boyanacak araç renk çeşitliliğine bağlı nasıl değiştiğini göstermek amacıyla sayısal çalışmalar yapılmıştır. Eklenen her yeni araç çekme masası ile yeniden sıralamadan elde edilen faydanın azalarak arttığı ve orta seviyedeki renk çeşitliliği ile yeniden sıralamadan elde edilen faydanın en fazla olduğu gösterilmiştir.

Aynı problem yeniden sıralama hatları için Epping ve Hochstattler [10] tarafından ele alınmıştır. Yeniden sıralama hatlarında, araçların ara stoğa yerleştirilmesi (ara stoğun doldurulması) ve araçların montaja beslenmesi (ara stoğun boşaltılması) olmak üzere iki problem yaşanmaktadır. Bu iki problemin ayrıntılı anlatımı Bölüm 4.'te yer almaktadır. Epping ve Hochstattler [10] ara stoğun doldurulması ve boşaltılması problemi ile ilgili dinamik programlama modeli geliştirmişlerdir. Problem, A* arama algoritması kullanarak çözülmüştür.

Spieckermann ve ark. [11] çalışmalarında, yeniden sıralama hattının doldurulması problemi ile ilgili sezgisel bir takım kurallar tanımlamışlardır. Ara stoğun boşaltılması problemi ile ilgili de karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Yaptıkları sayısal uygulamalarda boyahane çıkış sırasında yeniden sıralama için göz önünde bulundurulacak araç sayısının, araç renk dağılımının, hat sayısı ve kapasitesinin yeniden sıralama performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yeniden sıralama performansı peş peşe gelen aynı renge boyanacak araç sayısı ile ölçülmüştür.

Moon ve ark. [12] gerçekleştirdikleri çalışmada yeniden sıralama hattında yaşanan araçların doldurulması ve boşaltılması problemi ile ilgili sezgisel kurallar tanımlamışlardır. Geliştirdikleri sezgisel kuralları, simülasyon çalışması ile uygulamışlardır. Yapılan sayısal uygulamalarda renk dağılımının, hat sayısı ve kapasitesinin yeniden sıralama performansı üzerindeki etkileri ölçülmüştür. Çalışmalarında yeniden sıralama performansı, peş peşe gelen aynı renge boyanacak araç sayısı, toplam temizlik maliyeti, boya enjektörlerinin temizlenme sayısı, yeniden sıralama hattında tutulan ortalama araç sayısı ve maksimum stokta tutulma zamanını geçen araç sayısı ile ölçülmüştür. Sun ve ark. [13] yeniden sıralama hatlarında yaşanan doldurma ve boşaltma problemi ile ilgili iki sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım sezgisel kurallarla birlikte dal sınır algoritmasını kullanmakta ve literatürde sunulmuş olan algoritmalarından daha kısa sürede çözüm vermektedir.

Lahmar ve Benjaafar [14] aynı problemi, yeniden sıralama esnekliğinin kısıtlı olduğu ve sıraya bağlı değişim maliyetlerinin (changeover cost) bulunduğu durumlar için incelemişlerdir. Yeniden sıralama esnekliğinin kısıtlı olması bir işin kendi sırasının kaç sıra önüne (K_1) veya arkasına (K_2) geçebileceğinin kısıtlı olduğu durumu ifade etmektedir. Problem dinamik programlama ile çözüldükten sonra, işe bağlı sıralama kısıtları (job dependent sequencing constraints) ve değişim maliyetlerine (changeover cost) yol açan iş özellikleri (job features) göz önünde bulundurulacak şekilde geliştirilmiştir. Örnek çalışma, renk değişim maliyetlerini azaltmak için araçların boyahaneye girmeden önce yeniden sıralanması problemi üzerinde ele alınmıştır. Nümerik çalışmalarda, esneklikten (işlerin kaç sıra öne veya arkaya geçeceği) elde edilen faydanın azalan bir etkisinin olduğu gösterilmiştir. En fazla faydanın esneklikte yapılan düşük artışlarda sağlandığı gösterilmiştir. İşlerin buldukları pozisyonun önüne veya arkasına aynı miktarda geçebilmesi olan simetrik esnekliğin, asimetric esnekliğe göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Fournier ve Agard [3] hem boya öncesinde hem de boya sonrasında iki farklı yeniden sıralama hattının olduğu durum için araçların yeniden sıralanması problemini çalışmışlardır. Çalışmalarında boya öncesi ara stok peş peşe aynı renge boyanacak araç sayısının artırılması için kullanılırken, boya sonrası ara stok boyahane çıkışında araçların montaj kısıtlarına uygun bir şekilde sıralanması için kullanılmaktadır. Tanımlamış oldukları sezgisel kurallar çerçevesinde tüm otomobil üretim hattı için benzetim modeli kurmuşlardır. Geliştirdikleri model, benzer özellikli araçların sıralarının değiştirilmesi olan sanal yeniden sıralama esnekliğinden de faydalanmaktadır. Araçların fiziksel yerleri sabit kalmak koşuluyla araç sıra numaralarının değiştirildiği sistem sanal yeniden sıralama olarak adlandırılmaktadır. Sanal yeniden sıralama kavramı ilk olarak Inman ve Schemeling [15] tarafından ele alınmıştır. Sanal yeniden sıralama, araçların pozisyonlarında bir değişiklik olmaksızın, kaporta öncesinde araçlara verilen sıra numaralarının istasyonların kısıtları doğrultusunda benzer özelliklerdeki araç sıra numaraları ile değiştirilmesidir.

Fournier ve Agard [3] farklı hat sayısı ve kapasitesi ile sanal yeniden sıralamanın etkisini araştırmak için sayısal uygulama örnekleri tasarlamışlardır. Sanal yeniden

sıralamanın tanımladıkları performans göstergelerinde %39,7'lik iyileşme sağladığını, daha da önemlisi sanal yeniden sıralamanın gerekli ara stok büyüklüğünü azalttığını göstermişlerdir.

Lim ve Xu [16], Lahmar ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmayı geliştirerek daha büyük problemlerin çözümü için ışın araması (beam search) sezgisel yaklaşımını kullanmışlardır. Işın araması (beam search) sezgisel yaklaşımı ile optimal çözümler için bir üst sınır belirlenmekte, sonrasında yinelemeli arama (iterative search) yöntemi ile optimum çözüme kısa sürede ulaşılmaktadır. Çözüm yöntemlerinin kalitesi ve hızı, yaptıkları uygulama örneklerinde gösterilmiştir.

Montaj giriş öncesinde tutulan ara stok ile ilgili çalışmalardan ilki Choi ve Shin [17] tarafından yapılmıştır. Bu çalışma ayrıca literatürde, yeniden sıralama probleminin ilk ele alındığı problemdir. Boyahane sonrasında hem iş yoğunluğu fazla olan araçların peş peşe gelmesine engel olmak, hem de montaj istasyonlarında düzgün bir akış sağlamak için yeniden sıralama hattında uygulayabilecekleri otomatik dinamik sıralama sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmanın sonuçları simülasyonla test edilmiş, elle çalışan eski sisteme göre montaj hattı kısıtlarını sağlama açısından daha yüksek performans sağladığı gösterilmiştir.

Jayaraman ve ark. [18] boyahanedeki hatalı araçlara bağlı bozulan çizelgelenmiş sırayı düzeltmek için araçların yeniden sıralanması problemini ele almışlardır. Yeniden sıralama, hatlar aracılığı ile yapılmaktadır. Kurdukları simülasyon modelinde farklı hat konfigürasyonlarının, hatlarının doldurulması ve boşaltılması ile ilgili tanımladıkları sezgisel kuralların yeniden sıralama etkinliğini incelemişlerdir.

Gujjula ve Hans-Otto [19] araç sıralarının bozulmasından kaynaklı peş peşe gelen zor modelleri yetiştirebilmek adına ihtiyaç duyulan ilave işçi (utility worker) sayısını azaltmak için montaj öncesinde araçların araç çekme masası kullanılarak yeniden sıralanması problemini ele almışlardır. Problem, karma tamsayı program ile modellenmiş, geliştirdikleri sezgisel yerel arama yöntemiyle çözülmüştür. Franz ve ark. [20] tarafından yapılan çalışmada da amaç, montaj hattında işçilerin işlerini

zamanında yetiştirememesi nedeniyle kullanılan ilave işçi sayısının azaltılmasıdır. Franz ve ark. [20], Gujjula ve Hans-Otto [19]'dan farklı olarak problemi AS/RS türü ara stok kullanıldığı durum için modellemişlerdir. Problemin kısa sürede çözümü için yerel arama yöntemleri ile değişken komşu arama (variable neighborhood search), tabu arama (tabu search) ve benzetilmiş tavlama (simulated annealing) algoritmasını birleştirmişlerdir. Tabu arama algoritması ileri-sezgisel yönteminin diğer arama algoritmalarına göre daha kısa sürede daha az ilave işçi kullanımı ile problemi çözdüğünü göstermişlerdir.

Meissner [8] montaj öncesinde araçların kaportaya giriş sırasının aynısının oluşturulması amacıyla yeniden sıralama problemini ele almıştır. Çizelgelenmiş sıradan sapmaları azaltmak ve montaj hattının düzgün bir şekilde ilerlemesini sağlamak için bazı performans göstergeleri tanımlamıştır. Belirlenen performans göstergeleri, araçlarda meydana gelen sıra değişiklikleri (the sequence displacement), araçların çizelgelenmiş sıraya uygunluğu (the sequence adherence) ve çizelgelenmiş sıraya göre geciken araçlardan (the sequence backlog) oluşmaktadır. Montaj öncesinde planlanan sıranın aynısının oluşturulması için kullanılan AS/RS ve yeniden sıralama hatlarını, tanımladığı performans göstergelerine göre değerlendirmiş, AS/RS ara stoğun yeniden sıralama hattına göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Simülasyon çalışmaları ile yeniden sıralama hattının performansını, farklı ara stok doluluk oranları ve farklı hat sayılarını ele alarak incelemiştir. Yeniden sıralama hattının %50 doluluk oranında hat sayısı arttıkça AS/RS sistemleri kadar etkili olabileceğini göstermiştir.

Boysen ve ark. [21] çalışmasında, verilen bir başlangıç sırası altında araç çekme masası kullanılarak araçların montaj istasyonları kısıtlarından sapmalarını en küçükleyecek şekilde yeniden sıralanması problemini ele almıştır. Problem matematiksel olarak modellenmiş, sonrasında grafik arama (graph search) problemine dönüştürülmüş, kesin ve sezgisel yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Işın araması (beam search) yönteminin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Bir çevrimdeki sıralanacak araç sayısının, araç çekme masası sayısının ve araç opsiyon sayısının (opsiyon sayısının artması araçlarda çeşitliliğe yol açacağı için model

sayısını arttırmaktadır) çözümü nasıl etkilediğine dair örnek uygulamalar yapılmıştır. Hatta kullanılacak olan araç çekme masası sayısının, bir çevrimde yeniden sıralanacak araç sayısına ve araçlardaki opsiyon sayısına bağlı olduğu görülmüştür. Çözümün performansı üzerine etkisi çok düşük olduğu için araç çekme masası sayısının, sıralanacak araç sayısının yarısından fazla olması tavsiye edilmemiştir. Yapılan bu çalışmaya ek olarak Boysen ve ark. [22] bir alman kamyon fabrikasına kendi geliştirdikleri yeniden sıralama stratejisini, önceki çalışmanın amaç fonksiyonunu değiştirerek uygulamışlardır. Değiştirilen amaç fonksiyonu, gerçekleşen malzeme talebi ile planlanan malzeme talebi arasındaki farkın enküçüklenmesinden oluşmaktadır. Kullanılan yeniden sıralama yaklaşımı ile çözüm kalitesi eski yöntemle göre %29 arttırılmıştır.

Boysen ve Zenker [23] bir sonraki çalışmalarında aynı problemi yeniden sıralama hatlarının kullanıldığı durum için ele almıştır. Araç yeniden sıralama problemine yeniden sıralama hatlarına ait kısıtlar eklenerek matematiksel bir model kurulmuştur. Problem, diğer yeniden sıralama hatları ile ilgili yapılan çalışmalarda olduğu gibi, ara stoğun doldurulması ve boşaltılması olmak üzere iki alt problem şeklinde ele alınmıştır. Sonrasında hat sayısı ve hat kapasitesinin çözüm üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ek hat sayısı arttıkça yeniden sıralama esnekliğini ilk başta çok hızlı bir şekilde arttırdığı, sonrasında ise artışın azaldığı görülmüştür.

Valero-Herrero ve ark. [24] araçların yeniden sıralama hatlarına yerleştirilmesi ve sonrasında montaj kısıtlarından sapmaları enküçükleyecek şekilde montaja beslenmesi problemleri için benzetim modeli kurmuşlardır. Geliştirdikleri benzetim modelinde farklı doldurma, boşaltma kurallarının ve hat sayısının performansını incelemişlerdir.

2.2. Ara stok kapasitesinin belirlenmesi problemi ile ilgili çalışmalar

Ara stok kapasitesinin belirlenmesi problemi ile ilgili yapılan çalışmalar, boyahane öncesinde ve/veya boyahane sonrasında araç sıralarında yapılacak değişiklik için tutulan ara stok kapasitesini belirleye yöneliktir. Literatürdeki çalışmalar yapılan

yeniden sıralamanın amacına, kullanılan ara stoğun konumuna (boyahane öncesi veya sonrası) ve türüne göre incelenmiştir.

Inman [25], işletme tarafından önceden belirlenmiş olan hizmet düzeyinde araçların kaportaya giriş sırasının aynısının montaj istasyonlarına girmeden önce sağlanabilmesi için, AS/RS ara stok kapasitesinin ne olması gerektiği problemini ele almıştır. Araçların montaj istasyonuna önceden belirlenmiş olan sıra ile gelmesi, yanlış parçaların araçlara monte edilmesi ve bir sonraki monte edilecek olan parçanın aranması zamanını ortadan kaldırdığı için hattın düzgün ve kesintisiz işlemlerini sağlamaktadır. Çalışmasında, AS/RS'nin stok tutma fonksiyonu değil araç yeniden sıralama fonksiyonu ele alınmıştır. Araç sıra numaralarının sabit kaldığı durum ile (coupled orders) sıra numaralarının istasyon kısıtlarına göre değiştiği, sanal yeniden sıralamanın kullanıldığı sistem (decoupled orders, virtual resequencing) karşılaştırılmış, değişen sıra numaralarının bulunduğu sistemin daha az AS/RS kapasitesine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur.

Ding ve Sun [6] yeniden sıralama problemini, araçlarda meydana gelen kasıtlı ve kasıtsız sıra değişikliklerini gidermek için iki ayrı kısımda ele almıştır. Yeniden sıralama hatlarının kullanıldığı durumda kasıtlı sıra değişikliklerini gidermek için, 0-1 tamsayılı matematiksel model geliştirilmişlerdir. Fakat modelin her bir durumda yeniden çözülmesi gerektiği için, uygulamada pek kullanışlı olmadığı görülmüş, bunun yerine araçların stok alanına nasıl yerleştirileceği ve sonrasında hatta nasıl besleneceği ile ilgili çeşitli sezgisel kurallar tanımlanmıştır. Sistemin performansı, tanımlanmış oldukları kurallar ile farklı hat sayıları ve hat kapasiteleri altında simülasyon kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmanın ikinci kısımda ise kasıtsız sıra değişiklikleri ile ilgili, boyahane oluşmuş hatalı araçlara bağlı olarak araçların montaj istasyonuna girmeden önce yeniden sıralandıkları AS/RS stok alanında tutulması gereken araç sayısını hesaplayan M/M/1 kuyruk modeli geliştirilmiştir. Geliştirdikleri model, araçların tamir sürelerini, hatalı araç oranını, üretim hızını ve istenilen hizmet düzeyini göz önünde bulundurmaktadır.

Gusikhin ve ark. [26], araçların montaj hattına çizelgelenmiş sıra ile girmesi için üretime kaportadan hangi sıra ile başlanması gerektiği problemini kasıtsız araç sıra değişikliklerini göz önünde bulundurarak incelemişlerdir. Çalışmalarında (i) verili bir stok kapasitesi altında çizelgelenmiş sırayla aynı sırada montaja girecek araç sayısının artırılması ve (ii) istenilen sayıda aracın çizelgelenmiş sırayla aynı sırada montaja girmesi için gereken ara stok kapasitesinin ne olması gerektiğini simülasyonla belirlemişlerdir. Geliştirdikleri model ayrıca sanal yeniden sıralamanın yapılmasına imkân tanımaktadır.

2.3. Tezin diğer çalışmalardan farkı ve literatüre katkısı

Hem literatürde yapılan çalışmaları daha iyi anlamak, hem de ele alınan problemin literatürde yer almayan kısmını görebilmek adına bir şablon oluşturulmuştur. Bölüm 2.1. ve Bölüm 2.2.'de ele alınan literatür çalışmalarının bu şablona göre değerlendirilmesi Tablo 2.1.'de gösterilmektedir.

Kullanılan şablon ile literatürdeki çalışmalar ele alınan problemin türüne, ara stoğun bulunduğu yere, ara stok tutulma nedenine, ara stok türüne, kurulan modelin türüne ve çözüm yöntemine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda problemin hangi parametreleri ile ilgili sayısal çalışma yapıldığı da yine bu şablonda gösterilmiştir. Tablo 2.1.'deki şablonda bulunan ele alınan problem sütununda çalışmalar iki kategoriye ayrılmıştır: (i) yeniden sıralama problemi ile ilgili çalışmalar, (ii) ara stok kapasitesini belirleme problemi ile ilgili çalışmalar. İkinci adımda, yapılan çalışmalar tutulan ara stoğun konumuna göre (i) boyahane öncesi ve (ii) montaj öncesi olmak üzere sınıflandırılmıştır. Üçüncü aşamada ise çalışmalar, ilk adımda belirlenmiş problemin ne amaçla yapıldığına bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Tutulan depolama sistemi türü problemin modellenmesinde ve çözümünde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle dördüncü aşamada çalışmalar, depolama sistemi türüne göre şu şekilde üç kategoriye ayrılmıştır: (i) Araç çekme masası, (ii) Yeniden sıralama hatları, (iii) AS/RS. Problemin kesin ya da yaklaşık çözümünün belirlenmesinde kurulan model ve çözüm yöntemi önemlidir. Bu nedenle çalışmalar, şablonun beşinci ve altıncı aşamasında kurulan model ve çözüm yöntemine göre sınıflandırılmıştır. Yedinci

aşamada problemin hangi parametreleri ile ilgili sayısal çalışma yapıldığı listelenmiştir. Son aşama ise çalışmanın kim tarafından, kaç yılında yapıldığını göstermektedir.

Bu şablon aracılığı ile yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde (Ding ve Sun'ın çalışması [6] hariç), yeniden sıralamanın kasıtlı belirli bir amaç dahilinde yapıldığı görülmektedir. Kasıtsız sıra değişikliği ile ilgili çalışmaların ise yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Halbuki araç pozisyonlarında meydana gelen kasıtlı değişiklikler kadar kasıtsız değişiklikler de çizelgelenmiş sırada bozulmalara neden olmaktadır. Hatta bu sıra değişiklikleri kasıtlı sıra değişikliklerinden farklı olarak önceden planlanmadığı için sıra değişikliklerinin giderilmesi anlık ve daha zor olmaktadır.

Diğer taraftan, ara stok kapasitesinin belirlenmesi problemi ile ilgili yapılan çalışmalarda ara stoğun sadece yeniden sıralama fonksiyonu göz önünde bulundurulmuştur. Fakat ara stoğun hem yeniden sıralama, hem de stok tutma fonksiyonu bulunmaktadır. Sınırlı ara stok kapasitesi altında, tutulacak stoklar ile çizelgelenmiş sıraya daha uygun bir montaj giriş sırası elde edilebilmektedir.

Tezde ele alınan problemle yakından ilgili olan üç farklı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan ilki Inman [25] tarafından yapılmıştır. Inman [25], AS/RS türü ara stoğun yeniden sıralama fonksiyonunu kullanarak, araçların montaj öncesinde çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde sıralanması problemini ele almıştır. Fakat bu çalışmada, ara stoğun yeniden sıralama fonksiyonunun yanında stok tutma fonksiyonu da göz önünde bulundurularak, stokta tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlara karar verilmektedir. Çalışmada tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar, sadece AS/RS ara stok türü için değil, aynı zamanda yeniden sıralama hatları için de bulunmuştur.

İkinci çalışma, Ding ve Sun [6] tarafından yapılmıştır. Ding ve Sun [6] ara stoğunun stok tutma fonksiyonunu boyahanede rastgele oluşan hatalardaki rastgeleliği göz

önünde bulundurarak modelleyen ilk çalışmadır. Çalışmalarında tüm renkler için hata oranını aynı kabul ederek stok tutulması gereken araç sayısını M/M/1 kuyruk modeli ile AS/RS ara stok tipi için belirlemişlerdir. Fakat geliştirdikleri M/M/1 kuyruk modeli günlük planlanan üretimi belirli bir hizmet düzeyinde gerçekleştirmek için tutulması gereken araç sayılarını belirlemektedir. Çalışmalarında kullandıkları hizmet düzeyi, araçların çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmesini garanti etmemektedir. Tezde geliştirilen modelde ise Ding ve Sun [6]'dan farklı olarak, araçların çizelgelenmiş sıraya maksimum uyumla beslenmesi için tutulması gereken araç miktarları her model-renk kombinasyonları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Son çalışma ise Boysen ve Zenker [23] tarafından yapılmıştır. Boysen ve Zenker yeniden sıralama hatları kullanıldığında, montaj öncesinde araçların montaj kısıtlarından sapmalar minimum olacak şekilde yeniden sıralanması problemini ele almışlardır. Çalışmalarında, ara stokta tutulması gereken optimal araç kombinasyonlarına ait miktarların bulunmasını değil, sadece araç yeniden sıralama problemini ele almaktadır.

Tezde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem kasıtlı araç sıra değişikliklerini hem de boyahanedeki rastgele oluşan hatalara bağlı kasıtsız sıra değişikliklerini düzeltmek için ara stoğun yeniden sıralama ve stok tutma fonksiyonunu göz önünde bulunduran bir model geliştirilmiştir. Amaç, kasıtlı ve kasıtsız sıra değişikliklerine bağlı bozulan çizelgelenmiş sırayı ara stok aracılığı ile montaj öncesinde düzeltmektir. Bu sayede araçlar istenilen sırada montaj hattına gireceği için, istasyonlarda aşırı yükleme olmayacak, hattın düzgün ve dengeli bir şekilde akması sağlanmış olacaktır.

Tablo 2.1 Literatür özeti

ELE ALINAN PROBLEM	ARA STOK YERİ	AMAÇ	ARA STOK TÜRÜ	MODEL	ÇÖZÜM YÖNTEMİ	SAYISAL ÇALIŞMA	KAYNAK
Yeniden sıralama	Boyahane öncesinde	Boya hazırlık maliyetlerini azaltmak	Araç çekme masası	Karma tamsayı program	Dinamik programlama	Araç çekme masası sayısının etkisi, renk çeşitliliğinin etkisi	Lahmar ve ark. (2003) [9]
				Karma tamsayı program	Dinamik programlama	Simetrik yeniden sıralama esnekliğinin daha iyi olduğu gösterilmiştir	Lahmar ve ark. (2007) [14]
				Karma tamsayı program	Dinamik Programlama (A* arama algoritması)	-	Epping ve Hochstattler (2003) [10]
				Karma tamsayı program	Işın araması, yinelemeli arama sezgiselleri	Çözüm kalitesi ve hızı	Lim ve Xu (2009) [16]
Yeniden sıralama	Boyahane öncesinde	Boya hazırlık maliyetlerini azaltmak	Yeniden sıralama hatları	Karma tamsayı program, sezgisel kurallar	Dal & Sınır algoritması, Simülasyon	Sezgisel kuralların performansı, yeniden sıralamada ileriye bakılan araç sayısının etkisi, renk dağılımının etkisi, hat sayısının ve kapasitesinin etkisi	Spieckermann ve ark. (2004) [11]
				Karma tamsayı program, sezgisel kurallar	Doğrusal programlama, simülasyon	Yeniden sıralama hattı konfigürasyonlarının etkisi	Ding ve Sun (2004) [6]
				Sezgisel kurallar	Simülasyon	Renk dağılımının etkisi, hat sayısının ve kapasitesinin etkisi	Moon ve ark. (2005) [12]

Tablo 2.1. (Devamı)

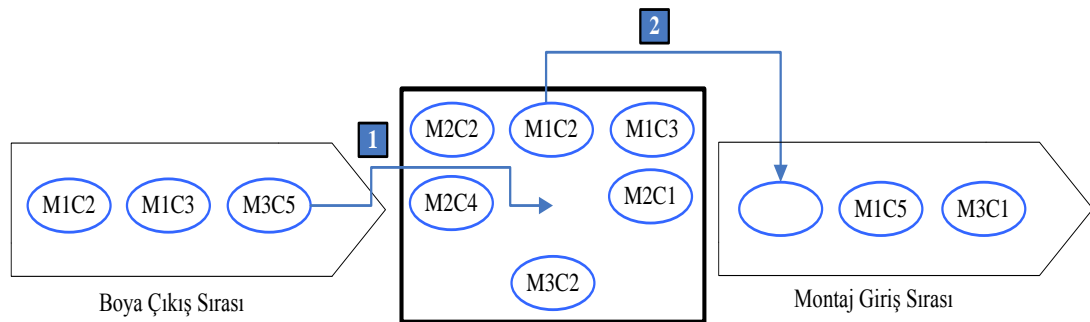
ELE ALINAN PROBLEM	ARA STOK YERİ	AMAÇ	ARA STOK TÜRÜ	MODEL	ÇÖZÜM YÖNTEMİ	SAYISAL ÇALIŞMA	KAYNAK
Yeniden sıralama	Boyahane öncesinde	Boya hazırlık maliyetlerini azaltmak	Yeniden sıralama hatları	Sezgisel kurallar, dal sınır algoritması	Simülasyon	Literatürdeki çalışmalardan daha kısa sürede çözüm bulmaktadır.	Sun ve ark. (2014) [13]
				Sezgisel kurallar	Simülasyon	Hat sayısının ve kapasitesinin etkisi, Sanal yeniden sıralamanın etkisi	Fournier ve Agard (2007) [3]
Yeniden sıralama	Montaj öncesinde	Montaj kısıtlarını sağlamak	Yeniden sıralama hatları	Sezgisel kurallar	Simülasyon	Mevcut ve önerilen sistem karşılaştırılmış	Choi ve Shin (1997) [17]
				Karma tamsayılı program	Grafik arama	Yeniden sıralanan araç sayısının etkisi, araç çekme masası sayısının etkisi, opsiyon sayısının etkisi	Boysen ve ark. (2010) [21], Boysen ve ark. (2011) [22]
				Sezgisel kurallar	Simülasyon	Hat sayısının ve kapasitesinin etkisi, doldurma ve boşaltma sezgisel kurallarının performansı	Jayaraman ve ark. (1997) [18]
				Karma tamsayılı program	Grafik arama, Işın araması, Karınca kolonisi optimizasyonu	Hat sayısının ve kapasitesinin etkisi	Boysen ve ark. (2013) [23]
				Sezgisel kurallar	Simülasyon	Farklı doldurma ve boşaltma kurallarının etkisi, Hat sayısının etkisi	Valero-Herrero ve ark. (2014) [24]

Tablo 2.1. (Devamı)

ELE ALINAN PROBLEM	ARA STOK YERİ	AMAÇ	ARA STOK TÜRÜ	MODEL	ÇÖZÜM YÖNTEMİ	SAYISAL ÇALIŞMA	KAYNAK
Yeniden sıralama	Montaj öncesinde	Montaj hattında ilave işçi kullanımını azaltmak	AS/RS	Karma tamsayı program	Değişken komşu arama, Tabu arama, Benzetilmiş tavlama	Çözüm süresi ve ilave işçi sayıları karşılaştırılmış	Franz ve ark. (2014) [20]
		Tedarikçiden gelen parçaları zamanında işlemek	AS/RS+ Yeniden sıralama hatları	Sezgisel kurallar	Simülasyon	Hat sayısının, kapasitesinin ve ara stok doluluk oranının etkisi, AS/RS ve yeniden sıralama hatları karşılaştırılmış, fiziksel ve sanal yeniden sıralama karşılaştırılmış	Meissner (2010) [8]
			Araç çekme masası	Karma tamsayı program ve sezgisel kurallar	Yerel arama algoritmaları	Optimizasyon ile sezgisel sonuçlar karşılaştırılmış	Guijula ve Günther (2009) [19]
Ara stok kapasitesinin belirlenmesi	Montaj öncesinde	Çizelgelenmiş sıranın aynısının oluşturulması	AS/RS	Sezgisel kurallar	Simülasyon	Mevcut ve önerilen sistem karşılaştırılmış	Gusikhin ve ark. (2008) [26]
				Karma tamsayı program ve sezgisel kurallar	Doğrusal programlama, Simülasyon	Fiziksel ve sanal yeniden sıralama uygulandığında AS/RS kapasitesinin nasıl değiştiği incelenmiş	Inman (2003) [25]
				Kuyruk modeli	Simülasyon	Hata oranının etkisi	Ding ve Sun (2004) [6]

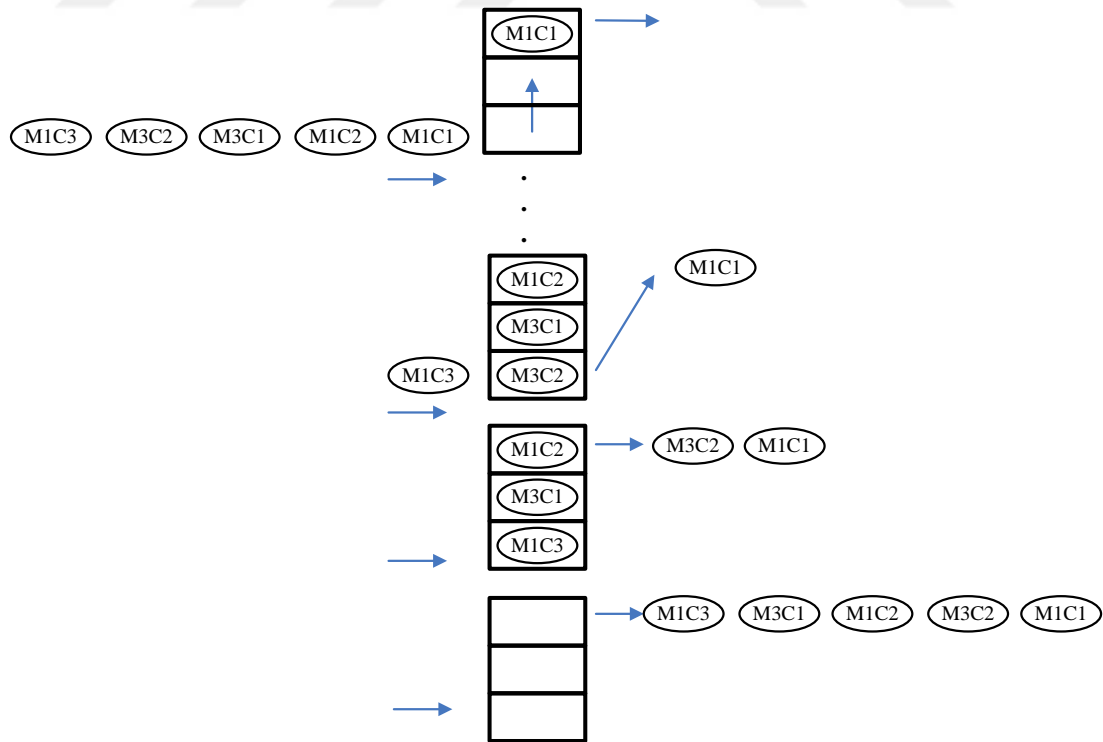
BÖLÜM 3. PROBLEMİN OTOMATİK DEPOLAMA VE ÇEKME SİSTEMLERİ (AS/RS) İÇİN MODELLENMESİ

AS/RS ara stok türü uygulamada kullanılan en yaygın stok depolama sistemlerinden biridir. AS/RS türü ara stok, her biri birbirinden ayrı ve bağımsız, çoklu stok depolama alanları içermektedir [7]. Stok depolama alanlarının birbirinden ayrı ve bağımsız olması, AS/RS ara stoğun doldurulması ve boşaltılması ile ilgili öncelik kurallarının olmamasını ifade etmektedir. Yani, boyahane çıkış sırasındaki araç b_i depolama alanındaki diğer araçların konumlarına bakılmaksızın, boş bulunan herhangi bir depolama alanına konulabilmektedir. Şekil 3.1.'e göre boyahane çıkış sırasındaki birinci araç M3C5, ara stokta "1" numaralı okla gösterilen boş depolama alanına konulabileceği gibi, bir alt sıradaki boş pozisyonlara da yerleştirilebilmektedir. Benzer durum araçların AS/RS'den montaja beslenmesinde de geçerlidir. Ara stokta bulunan herhangi bir araç istenilen sırada montaja beslenebilir. Şekil 3.1.'de bu durumla ilgili bir örnek "2" numaralı okla gösterilmektedir. Şekil 3.1.'e göre, ara stokta bulunan araç M1C2, önünde bulunan araç M1C3'den önce montaja beslenebilmektedir.



Şekil 3.1. AS/RS ara stoğun doldurulması ve boşaltılması

AS/RS ara stok kullanılarak araç pozisyonlarında yapılan değişiklik Şekil 3.2. yardımıyla açıklanmaktadır. Şekil 3.2.'ye göre araçlar AS/RS'ye boyahaneden çıkış sıralarına göre (sağdan sola doğru) M1C3-M3C2-M3C1-M1C2-M1C1 sırasıyla gelmektedir. Çizelgelenmiş sıranın M1C3-M3C1-M1C2-M3C2-M1C1 şeklinde olduğunu düşünelim. Boya çıkış sırasında 4. sırada (sağdan sola doğru) bulunan araç M3C2, 2. sıraya alındığında, çizelgelenmiş sıranın aynısı elde edilecektir. AS/RS kapasitesi 3 araç olduğunda araçların yeniden sıralanması Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi şu şekilde olmaktadır. Öncelikle boya çıkış sırasındaki ilk üç araç (sağdan sola doğru) M3C1-M1C2-M1C1 AS/RS'e alınır. Sonrasında çizelgelenmiş sıradaki ilk araç olan M1C1 montaj giriş sırasına beslenir. M1C1'in montaja beslenmesi sonucunda AS/RS'deki boşalan stok alanına boya çıkış sırasındaki dördüncü araç (sağdan sola doğru) olan M3C2 alınır. Çizelgelenmiş sırada 2. sırada bulunması gereken araç M3C2, montaj giriş sırasına beslenir. Çizelgelenmiş sıradaki diğer pozisyondaki araçlar sırasıyla M1C2, M3C1 ve M1C3 olmak üzere montaj giriş sırasına alınır. Böylelikle çizelgelenmiş sıranın aynısı montaj öncesinde oluşturularak, araçlar %100 ÇSBO ile montaja beslenmektedir.



Şekil 3.2. AS/RS ara stok aracılığı ile araçların yeniden sıralanması

Ele alınan problem araçların maksimum ÇSBO ile montaja girmeleri için, ara stokta tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarları ve araçların montaj giriş sıralarını belirlemektir. Bölüm 3.1.'de problem iki-aşamalı olarak, AS/RS ara stok türü için modellenmektedir. Bölüm 3.2.'de problemin çözümünde kullanılan Örneklem Ortalaması Yaklaşımı (SAA) algoritması anlatılmaktadır. Bölüm 3.3., uygulama örnekleri ve problem parametreleri ile ilgili çalışmalardan oluşmaktadır. Uygulama örnekleri SAA'nın hangi büyüklükteki problemleri ne kadar sürede çözebileceğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Sayısal çalışmada ise ÇSBO ve ara stokta tutulan araç miktarına etki eden problem parametreleri incelenmiştir. Ayrıca yine bu bölümde problemin stokastik formda modellenmesinden elde edilen kazançlar sunulmaktadır.

Araçların maksimum ÇSBO ile montaja beslenmeleri amacıyla problemin yeniden sıralanacak her bir blok için tekrar tekrar çözülmesi gerekmektedir. Bu, modelin kullanımının yaygınlaştırılmasında bir engel oluşturmaktadır. Bu kapsamda işçilerin montaj hattında kolaylıkla uygulayabileceği yeniden sıralama kuralları tanımlanmıştır. İşçiler araç yeniden sıralamayı, tanımlanan kurallar çerçevesinde yapacağı için problemin her bir blok için tekrar çözülmesine gerek kalmamaktadır. İşçilerin yeniden sıralamada kullanacağı kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel model Bölüm 3.4.'te ele alınmaktadır. Ayrıca kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel model ile iki-aşamalı stokastik modelin karma tamsayı programlama aracılığı ile çözüldüğü durum ara stokta tutulan stok miktarları ve ÇSBO değerleri açısından değerlendirilmiştir. Bölüm 3.5.'te ise daha büyük ölçekli problemlerin genetik algoritma (GA) ile çözümü bulunmaktadır.

3.1. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modeli

Bu bölümde, AS/RS depolama sistemlerinde maksimum ÇSBO elde etmek amacıyla tutulması gerekli stok miktarlarının hesaplanması için geliştirilen iki-aşamalı stokastik model anlatılmaktadır.

İki-aşamalı stokastik programın genel formülasyonu Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de gösterilmektedir. İki-aşamalı stokastik programda ilk aşama ve ikinci aşama değişkeni olmak üzere iki tür karar değişkeni bulunmaktadır. Problemlerle ilgili tam bilgiye sahip olunmadan önce karar verilen değişken ilk aşama karar değişkeni olarak adlandırılmakta ve genellikle x ile gösterilmektedir. Sonrasında, rassal olay oluştuktan (ξ) ve rastgele değişkenin değeri gözlemlendikten sonra $\xi(\omega)$, ikinci aşama karar değişkenine karar verilir. İkinci aşama karar değişkeni ise genellikle y ile gösterilmektedir [27].

$$\min_{x \in X} \{g(x) = c^T x + E[Q(x, \xi)]\}$$

Kısıtlar

$$Ax = b,$$

$$x \geq 0,$$

(3.1)

Denklem 3.1’de bulunan $Q(x, \xi)$, Denklem 3.2’de gösterilen ikinci aşama problemin optimum amaç fonksiyonu değerini göstermektedir.

$$Q(x, \xi) = \min \{q^T y \mid Wy = h - Tx, y \geq 0\}$$

(3.2)

Denklem 3.1’de ilk aşama karar değişkeni x ’in önünde bulunan c^T katsayısı ilk aşama kararına bağlı oluşan maliyeti göstermektedir. E ise rastgele değişken ξ ’nin aldığı değerlere bağlı $Q(x, \xi)$ fonksiyonunun beklenen değerini (ortalamasını) göstermektedir. Denklem 3.2’de bulunan q^T , h , T rastgele olay gözlemlendikten sonra elde edilen rastgele değişkenin değerlerini göstermektedir. Rastgele olay ξ , rastgele değişkenler q^T , h ve T ’den oluşan bir vektördür [27, 28].

Eğer ele alınan problem enbüyükleme problemi ise Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 de yer alan enküçükleme işlemi enbüyükleme işlemi ile değiştirilmektedir. Bu durumda Denklem 3.1’de ilk aşama karar değişkeni x ’in önünde bulunan c^T katsayısı ilk aşama kararına bağlı oluşan geliri göstermektedir.

İki-aşamalı stokastik programlama modeli sunulmadan önce kullanılmış olan parametreler, karar değişkenleri, indisler ve karar ifadeleri aşağıda tanımlanmıştır.

Parametreler

S : Yeniden sıralanacak araç blok uzunluğu

BC : Arastok kapasitesi

M : Üretilecek model sayısı

C : Boyanacak renk sayısı

$d_{ijk}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{boya çıkış sırasında } i. \text{ pozisyon} \text{daki model } j \text{ renk } k \text{ araç hatalı ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$

H_j : S_j uzunluğundaki bir blokta en fazla sayıda bulunabilecek model j sayısı

$sc_{jkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{çizelgelenmiş sırada } h. \text{ pozisyona atanan araç model } j \text{ renk } k \text{ ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$

BM : Çok büyük bir sayı

ε : Çok küçük bir sayı

İndisler

i : Boya çıkış sırasındaki araçların pozisyonu $i = 1, \dots, S$

h : Montaj giriş sırasındaki araçların pozisyonu $h = 1, \dots, S$

j : Araç model numarası $j = 1, \dots, M$

k : Araç renk numarası $k = 1, \dots, C$

Karar değişkenleri

x_{jk} : Arastokta tutulan model j , renk k özellikli araç sayısı

$$y_{ijkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{boya çıkış sırasında } i. \text{ pozisyonda bulunan model } j \text{ renk } k \text{ araç} \\ & \text{montaj giriş sırasında } h. \text{ pozisyona atanmış ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$z_{jkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{arastokta bulunan model } j \text{ renk } k \text{ araç montaj giriş sırasında} \\ & h. \text{ pozisyona atanmış ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$w_{ijk}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{boya çıkış sırasında } i. \text{ pozisyonda bulunan model } j \text{ renk } k \text{ araç} \\ & \text{arastokta depolanacak ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Karar İfadeleri

$$f_{jkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{model } j \text{ renk } k \text{ araç montaj giriş sırasında } h. \text{ pozisyona} \\ & \text{atanmış ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$\Delta_{jkh}(\xi) = \begin{cases} -1, & h. \text{ pozisyon için sahte model, renk farklılığı oluşmuş ise} \\ 0, & h. \text{ pozisyon için çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası aynı ise} \\ 1, & h. \text{ pozisyon için çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası farklı ise} \end{cases}$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası arasında model veya} \\ & \text{renk farklılığı varsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Geliştirilen modelde ilk aşama karar değişkeni ara stokta tutulması gereken model j , renk k araç sayısının, $x = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{jk}, \dots, x_{MC})$, belirlenmesidir. Burada M üretilen farklı model sayısını, C ise üretilen farklı renk sayısını göstermektedir. Ara stok kapasitesi BC 'yi geçmeyecek şekilde en yüksek ÇSBO değerini sağlayan optimum ara stok miktarının (x) bulunmasını sağlayan ilk aşama problemi (FS), Denklem 3.3'de gösterilmektedir.

$$(FS) \begin{cases} z = \max_{x \in X} \{E[Q(x, \xi)]\} \\ \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} \leq BC, \end{cases} \quad (3.3)$$

Burada $E[Q(x, \xi)]$, rastgele değişken ξ 'nin aldığı değerlere göre hesaplanan ortalama ÇSBO'yu göstermektedir. Rastgele değişken ξ , S boyutunda bir vektör olup, i 'nci aracın sağlam veya hatalı olduğunu göstermektedir. Genellikle ilk aşama (FS) kararına bağlı bir kazanç/maliyet oluşmakta ve "c" ile gösterilmektedir. Böyle

bir durumda Denklem 3.3, $\max_{x \in X} \{cx^T + E[Q(x, \xi)]\}$ şeklinde yazılmaktadır. Fakat geliştirilen modelde ilk aşama karar değişkenine bağlı bir kazanç oluşmadığı için cx^T değişkeni modelden atılmıştır.

İkinci aşama problem (SS) ise, rastgele değişkenin aldığı değerler $\xi(\omega)$ gözlemlendikten sonra optimum ara stok miktarları altında $x = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{jk}, \dots, x_{MC})$ maksimum ÇSBO sağlayan montaj giriş sırasının belirlenmesidir. $\xi(\omega)$, rastgele olay ξ 'nin gerçekleşmesine bağlı olarak boya çıkış sırasında i 'nci pozisyonda bulunan aracın sağlam veya hatalı olduğunu gösteren Bernoulli rastgele değişkeninden oluşan S büyüklüğünde bir vektördür. Örneğin $\xi(\omega) = (0, 1, 1, 0)$ vektörü, dört araçtan oluşan boya çıkış sırasında 1. ve 4. pozisyondaki/sıradaki (sağdan sola doğru) araçların hatalı olduğunu, 2. ve 3. pozisyondaki araçların sağlam olduğunu göstermektedir.

Hatalar gözlemlendikten sonra $\xi(\omega)$, boya çıkış sırasındaki (b_1, b_2, \dots, b_S) i 'nci araç, ara stokta bulunan boş depolama alanlarına yerleştirilmektedir. Sonrasında ikinci aşama kararı aşağıdaki şekilde verilmektedir;

- Boya çıkış sırasından alınıp ara stoğa yerleştirilen araç, montaj giriş sırasındaki $(b'_S, \dots, b'_2, b'_1)$ h 'inci pozisyona atanmalı mı yoksa ara stokta mı depolanmalı?
- Ara stokta yeniden sıralama öncesi depolanmış olan x_{jk} adet araç içerisinde uygun olan araç, montaj giriş sırasındaki h 'inci pozisyona mı atanmalı?
- Montaj istasyonu kısıtlarından sapma olmaması için montaj giriş sırasındaki h 'inci pozisyon boş mu bırakılmalı?

Boya çıkış sırasındaki her araç AS/RS'ye alındıktan sonra, ikinci aşama kararı sırasıyla S uzunluğundaki tüm araçlar için tekrarlanmalıdır.

Rastgele değişken ξ , gözlemlendikten sonra oluşan ikinci aşama problem aşağıda Denklem 3.4 - 3.17 arasında gösterilmektedir. $Q(x, \xi)$, ikinci aşama probleminin amaç fonksiyonunu göstermektedir.

$$\max Q(x, \xi) = 1 - \frac{1}{S} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S \gamma_{jkh}(\xi) \quad (3.4)$$

Denklem 3.4 ile gösterilen amaç fonksiyonuna göre kısıtlar Denklem 3.5 - 3.17 arasında verilmiştir.

$$f_{jkh}(\xi) = \sum_{i=1}^S y_{ijkh}(\xi) + z_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.5)$$

$$\Delta_{jkh}(\xi) = sc_{jkh} - f_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.6)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \leq 1 + \Delta_{jkh}(\xi) + BM(\Delta_{jkh}(\xi) + 1) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.7)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \geq \Delta_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.8)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \leq 1 + \Delta_{jkh}(\xi) - \varepsilon(\Delta_{jkh}(\xi) + 1) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.9)$$

$$d_{ijk}(\xi) = \sum_{h=1}^S y_{ijkh}(\xi) + w_{ijk}(\xi) \quad \forall i = 1, \dots, S; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.10)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C f_{jkh}(\xi) \leq 1 \quad \forall h = 1, \dots, S \quad (3.11)$$

$$x_{jk} \geq \sum_{h=1}^S z_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.12)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C y_{ijkh}(\xi)(i-h) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} \leq B \quad \forall i > h; i = 2, \dots, S; h = 1, \dots, S-1 \quad (3.13a)$$

$$\sum_{h=1}^{S-1} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{i=h+1}^S y_{ijkh} \geq 1 \quad (3.13b)$$

$$\sum_{k=1}^C \sum_{h=h}^{\min\{h+S_j-1, S\}} f_{jkh}(\xi) - (1 - \sum_{k=1}^C f_{jkh}(\xi))BM \leq H_j \quad \forall j = 1, \dots, M; h = 1, \dots, S \quad (3.14)$$

$$y_{ijkh}(\xi), z_{jkh}(\xi), \gamma_{jkh}(\xi), w_{ijk}(\xi) \in \{0, 1\} \quad (3.15)$$

$$\forall i = 1, \dots, S; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S$$

$$\Delta_{jkh}(\xi) \in \mathbb{Z} \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.16)$$

$$x_{jk} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.17)$$

Denklem 3.4 ile ifade edilen amaç fonksiyonu, çizelgelenmiş sıra başarım oranını (ÇSBO) enbüyüklemektir. Denklem 3.5, montaj giriş sırasında h 'ncü pozisyona model j renk k özellikli aracın atanıp atanmadığını göstermektedir. Montaj giriş sırasında h 'ncü pozisyona atanan araç ya boya çıkış sırasından gelen ya da yeniden sıralama öncesinde AS/RS'de tutulan araçlardan biridir. Denklem 3.5'teki eşitlik bunu ifade etmektedir. Denklem 3.6'daki kısıt çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırasını karşılaştırmaktadır. Denklem 3.6'da bulunan Δ_{jkh} tamsayı değişken -1, 0, 1 değerlerini almaktadır. Δ_{jkh} değişkeninin 0 değerini alması h 'ncü pozisyonda çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası arasında fark olmadığını, yani aynı renk ve modelde araçların olduğunu göstermektedir. Eğer Δ_{jkh} değişkeni 1 değerini almışsa, bu h 'ncü pozisyonda montaj giriş sırası ile çizelgelenmiş sıra arasında model ve/veya renk farklılığı olduğunu göstermektedir. Δ_{jkh} değişkeninin -1 değerini aldığı durumda ise, h 'ncü pozisyonda sahte model ve/veya renk farklılığı oluşmaktadır. Bu durum çizelgelenmiş sırada h 'ncü pozisyonda model j renk k özellikli aracın olmadığı, fakat montaj giriş sırasında model j renk k özellikli aracın olduğu durumda gerçekleşmektedir. Yani Δ_{jkh} değişkenin -1 değerini alması, çizelgelenmiş sırada bakılan model ve/veya renkte olmayan bir aracın montaj giriş sırasında bulunmasıyla oluşmaktadır. Bu durum sahte model ve/veya renk değişikliği olarak adlandırılmaktadır. Toplam model ve/veya renk değişikliğinin hesaplanmasında -1 değeri çizelgelenmiş sıradan sapmaların hesaplanmasında yanlışığa sebep olduğu için, γ_{jkh} değişkeni tanımlanmıştır. Bu değişken, Δ_{jkh} değişkeninin 1 değerini aldığı durumda 1, Δ_{jkh} değişkeninin -1 ve 0 aldığı durumda ise 0 değerini alarak model ve/veya renk farklılıklarının doğru hesaplanmasını denklem 3.7 - 3.9'deki kısıtlar ile sağlamaktadır.

Denklem 3.10'da ifade edilen kısıt hatalı araca montaj giriş sırasında bir pozisyon atanmasını engellemektedir. Denklem 3.11'deki kısıt montaj giriş sırasında h 'inci pozisyona en fazla bir tane araç atanabileceğini, gerekirse araç model kısıtlarını sağlamak için h 'inci pozisyonun boş kalabileceğini ifade etmektedir. Denklem 3.12'deki kısıt ara stoktan montaj giriş sırasına beslenen model j , renk k özellikli araç sayısının ara stokta tutulan araç sayısı x_{jk} 'dan fazla olamayacağını belirtmektedir.

Boya çıkış sırasında i 'nci pozisyonda olan bir araç, montaj giriş sırasında ara stokta bulunan boş depolama alanı kadar öne geçebilir. Burada öne geçmek boya çıkış sırasında i 'nci pozisyondaki araca montaj giriş sırasında daha düşük numaralı bir pozisyonun (sıranın) atandığı durumu ifade etmektedir. Boya çıkış sırasında i 'nci pozisyonda olan bir aracın, montaj giriş sırasında ara stokta bulunan boş depolama alanı kadar öne geçebilmesi şartı Denklem 3.13a'daki kısıt ile sağlamaktadır. Diğer taraftan en az bir tane aracın montaj giriş sırasının boya sonrası sıradan daha büyük olması koşulu ile yani $h > i$ olmak üzere, aracın atanacağı son pozisyon numarası için bir kısıtlama bulunmamaktadır. Araç istenildiği kadar arka sıraya atılabilir. Denklem 3.13b ile ifade edilen kısıt en az bir aracın montaj giriş sırasının boya sonrası sıradan daha büyük olmasını garanti altına almak için yazılmıştır.

Araçların montaj giriş sıralarının oluşturulmasında firmanın her bir araç modeli için belirlemiş olduğu kısıtlar bulunmaktadır. Bu kısıtlara göre, herhangi S_j uzunluğundaki bir blokta bulunan model j sayısı, H_j 'yi geçemez ($H_j : S_j$). Bu kısıtlardan sapma, peş peşe gelen zor araç modellerinden dolayı işçilerin işlerini zamanında yetiştirememesine ve hattın durdurulmasına neden olmaktadır. Bu durumun yaşanmaması için montaj istasyonu kısıtları göz önüne alınarak belirlenen araç model kısıtlarından sapmalara izin verilmemektedir. Benzer bir durum araç sıralama probleminde de yaşanmaktadır. Araç sıralama probleminde amaç, araçlara monte edilen her bir opsiyon için belirlenmiş olan $H : S$ oranlarından sapmaları en küçüklemektir [4-9]. Literatürde bu sapmaları saymak için yaygın olarak kayan pencere (sliding window) yaklaşımı kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem bazı durumlarda sapmaları fazla saymaktadır [5]. Flidner ve Boysen [29], geliştirdikleri

yaklaşım ile kayan pencere kısıtında yaptıkları değişikliklerle, sapmaları doğru bir şekilde saymaktadırlar. Çalışmada, Fliedner ve Boysen'in [29] opsiyon kısıtlarından sapmada önerdiği kısıt kullanılmıştır. Kısıttaki opsiyonlar yerine, araç modelleri kullanılmış ve $H_j : S_j$ oranlarından sapmaya izin verilmeyecek şekilde güncellenmiştir. Denklem 3.14 ile ifade edilen kısıt, her bir araç modeli için belirlenmiş olan $H_j : S_j$ oranından sapmanın mümkün olamayacağını ifade etmektedir.

Denklem 3.15 - 3.17 modelde kullanılan değişken türleri ile ilgili kısıtları içermektedir. Buna göre $y_{ijk}(\xi)$, $z_{ijk}(\xi)$, $\gamma_{ijk}(\xi)$, $w_{ijk}(\xi)$ değişkenleri ikili (0-1) değişkendir. Değişken $\Delta_{ijk}(\xi)$ 'nin tanım aralığı tüm tamsayılarıdır. Değişken x_{jk} ise pozitif tamsayı değerler almaktadır.

3.2. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modelinin Örnek Ortalaması Yaklaşımı (SAA) ile Çözümü

Stokastik programlamada, rastgele değişkenlerin aldığı her bir değer sonucu oluşan yeni problemler senaryo olarak adlandırılmaktadır. Stokastik problemleri çözmeye karşılaşılan en büyük zorluk oluşan senaryo sayısının fazla olmasıdır. Problemin ölçeği artan senaryo sayısına bağlı büyüyeceği için, geleneksel yöntemlerle çözülmesi mümkün olmamaktadır.

Modelde $|\Omega|$ ile gösterilen senaryo sayısı $(2MC)^S$ dir. Burada S yeniden sıralanacak araç sayısını, M üretilen farklı tür model sayısını ve C de üretilen farklı renk sayısını göstermektedir. Örneğin 3 farklı modelde, 10 farklı renkte 100 blok uzunluğunda bir partide hata sayılarına bağlı 60^{100} adet farklı senaryo oluşmaktadır. Bu büyüklükteki senaryo sayısında, p_k senaryonun gerçekleşme olasılığını göstermek üzere, Denklem 3.18 ile gösterilen amaç fonksiyonunun beklenen değerinin hesaplanması imkansızdır.

$$E[Q(x, \xi)] = \sum_{k=1}^{|\Omega|} p_k Q(x, \xi^k) \quad (3.18)$$

Örnekleme ortalaması yaklaşımı (SAA), simülasyon tabanlı bir yöntem olup Kleywegt ve ark. [30] tarafından iki-aşamalı stokastik problemlerin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

SAA yönteminde, Denklem 3.18'de gösterilen stokastik problemin amaç fonksiyonu değeri, aynı ve bağımsız dağılmış (independent and identically distributed) N büyüklüğünde alınan örneklemin ortalama amaç fonksiyonu değeri kullanılarak tahmin edilmektedir [31]. Böylece SAA problemin tahmini amaç fonksiyonu Denklem 3.19'daki gibi olmaktadır. Denklem 3.18 ile gösterilen gerçek problem, Denklem 3.19 ile gösterilen ise SAA problem olarak ifade edilmektedir.

$$z_N = \max_{x \in X} \left(c^T x + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(x, \xi^n) \right) \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'da bulunan x , ilk aşama karar değişkeni x 'in alabileceği değerler kümesini göstermektedir. SAA problemin optimal çözüm değeri (amaç fonksiyonu) ve bu çözümün sağlandığı ilk aşama karar değişkeni sırasıyla \hat{z}_N ve \hat{x} olarak gösterilmektedir. SAA problemin optimal çözüm değeri \hat{z}_N ve karar değişkeni \hat{x} , Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de gösterilen stokastik problemin gerçek optimal çözümü z^* 'in ve karar değişkeni x^* 'in tahmincisidir. Gerçek problemin çözüm değeri z^* 'in, SAA problemin çözüm değeri \hat{z}_N 'ye 1 olasılığı ile yakınsadığı Kleywegt ve ark. [30] tarafından gösterilmiştir ($N \rightarrow \infty$ 1 olasılığı ile $\hat{z}_N \rightarrow z^*$). N sonsuza giderken mevcut tüm senaryolar göz önünde bulundurularak çözüm yapılacağı için $\hat{z}_N - z^* \leq \varepsilon$ olacaktır. Buradaki ε çok küçük bir sayıyı ifade etmektedir. Bu durumda problemin herhangi bir çözümü için bu fark hesaplanılarak, çözümün optimal olup olmadığı, optimale ne kadar yaklaştığı hesaplanabilir. Hem \hat{z}_N , hem de z^* bilinmediği için, iki çözüm değeri arasındaki fark tahmincileri kullanılarak bulunmaktadır.

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'nin çözümünden elde edilen z^* 'in tahmincisi, R adet çözüm içerisinde elde edilen en yüksek amaç fonksiyonuna sahip çözümün ilk aşama karar değişkenleri kullanıldığında elde edilen ortalama amaç fonksiyonu değeridir. R adet çözüm içerisinde, en yüksek amaç fonksiyonuna sahip çözümün ilk aşama karar değişkenleri \hat{x}^* , ile gösterilmek üzere z^* 'in tahmincisi $\hat{z}_N(\hat{x}^*)$, şu şekilde hesaplanmaktadır: Öncelikle SAA problemin çözümünden R tane \hat{z}_N^r ve \hat{x}_N^r değerleri elde edilir. Burada \hat{z}_N^r ve \hat{x}_N^r sırasıyla N büyüklüğündeki r . problemin çözümünden elde edilen çözüm değerini (amaç fonksiyonunu) ve bu çözümün sağlandığı karar değişkenini göstermektedir. Sonra en büyük amaç fonksiyonu değerine sahip olan çözüm belirlenir, $\hat{x}^* = \arg \max_x \{\hat{z}_N^1, \hat{z}_N^2, \dots, \hat{z}_N^r\}$. En yüksek amaç fonksiyonun elde edildiği ilk aşama karar değişkeni \hat{x}^* için senaryo sayısı artırılarak ortalama amaç fonksiyonu değeri $\hat{z}_N(\hat{x}^*) = c^T \hat{x}^* + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(\hat{x}^*, \xi^n)$ hesaplanır.

Benzer şekilde enküçükleme problemlerinde ise R adet çözüm içerisinde en düşük amaç fonksiyonuna sahip çözümün ilk aşama karar değişkeni $\hat{x}^* = \arg \min_x \{\hat{z}_N^1, \hat{z}_N^2, \dots, \hat{z}_N^r\}$ olarak belirlenecek ve $\hat{z}_N(\hat{x}^*)$ ona göre hesaplanacaktır.

Denklem 3.19'deki SAA problemin optimal çözümünün tahmincisi $E[\hat{z}_N]$, R adet optimal sonuçların ortalamasıdır. Problemin her bir r . çözümden elde edilen optimal çözümler \hat{z}_N^r ile gösterilmek üzere, optimal çözümlerin ortalaması \bar{z}_N şu şekilde

hesaplanır, $\bar{z}_N = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \hat{z}_N^r$. SAA problemin optimal çözümünün tahmincisi $E[\hat{z}_N]$,

enbüyükleme problemi için maksimum amaç fonksiyonuna sahip R adet çözümün ortalama amaç fonksiyonu değerini gösterirken, en küçükleme probleminde minimum amaç fonksiyonuna sahip R adet çözümün ortalama amaç fonksiyonu değerini göstermektedir.

Enbüyükleme problemi için $E[\hat{z}_N] \geq z^*$ eşitliğinin doğru olduğu Mak ve ark. tarafından [32] gösterilmiştir. Enbüyükleme problemi için $E[\hat{z}_N]$ 'nin tahmincisi \bar{z}_N , N farklı senaryo altında en yüksek amaç fonksiyonu değerlerinin elde edildiği R adet çözümün ortalama amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Diğer taraftan z^* 'in tahmincisi olan $\hat{z}_N(x^*)$ 'in hesaplanmasında kullanılan ilk aşama karar değişkeni, N farklı senaryo için ortalamada en yüksek amaç fonksiyonu değerini veren optimal çözümdür. Senaryo sayısı arttığında N senaryo için optimal olan çözüm, daha büyük senaryo için optimal olmayabilir. Bu nedenle \bar{z}_N optimal amaç fonksiyonu için üst limit, $\hat{z}_N(x^*)$ ise alt limittir.

Yine Mark ve ark. [32], enküçükleme problemi için de $E[\hat{z}_N] \leq z^*$ eşitliğinin doğru olduğunu göstermektedir. Enküçükleme probleminde $E[\hat{z}_N]$ 'nin tahmincisi \bar{z}_N optimal çözümler arasından en küçük olan çözümün beklenen amaç fonksiyonu değerini (ortalamasını) göstermektedir. \bar{z}_N , optimal çözümler arasından en küçük olan için hesaplandığından optimal çözüme bir alt sınır oluşturmaktadır. z^* 'in tahmincisi olan $\hat{z}_N(x^*)$ ise N senaryo içerisinde ortalamada en düşük amaç fonksiyonunu veren ilk aşama karar değişkenlerine göre hesaplanmaktadır. Fakat senaryo sayısı arttırıldığında N senaryo için optimal olarak belirlenen çözüm artık optimal olmayabilir. Bu durumda daha yüksek amaç fonksiyonu değeri elde edileceği için $\hat{z}_N(x^*)$ optimal çözüme bir üst sınır oluşturmaktadır.

SAA yönteminin ana fikri, “gerçek problemin ortalama amaç fonksiyonu değerini, SAA problemin (Denklemler 3.19 ile gösterilmiş olup, aynı dağılmış, birbirinden bağımsız rastgele seçilen N büyüklüğündeki bir örneklemeden oluşmaktadır) amaç fonksiyonu değeri kullanılarak tahmin etmektir”. Bu işlem, SAA probleminden elde edilen amaç fonksiyonu değeri, durdurma kuralını sağlayıncaya kadar tekrar edilir.

Bu çalışmada amaçlanan, ortalamada en yüksek ÇSBO elde edilen en iyi araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesidir. Problemden hataların

oluşacağı pozisyonlara bağlı oluşan senaryo sayısı fazla olduğu için, problemin çözümünde SAA yöntemi kullanılmaktadır. SAA yöntemi ile ilk aşamada tutulması gereken optimal ara stok miktarları her model-renk kombinasyonu için belirlenmektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan optimal ara stok miktarlarına bağlı araçların montaj giriş sıralarına karar verilmektedir.

Denklem 3.19’da gösterilen c^T katsayısı, enbüyükleme probleminde birinci aşama kararına bağlı oluşan geliri, enküçükleme problemi için ise birinci aşama kararına bağlı oluşan maliyeti göstermektedir. Geliştirilen modelde ilk aşama kararına bağlı bir gelir olmadığı için, ilk aşama kararına bağlı gelir katsayısı c^T sıfır olarak alınmıştır. Bu durumda SAA problem Denklem 3.20’deki gibi ifade edilir.

$$z_N = \max_{x \in X} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(x, \xi^n) \right), \quad (3.20)$$

Denklem 3.20’de amaç fonksiyonu tanımlanmış olan SAA algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1: N büyüklüğünde R adet birbirinden bağımsız örneklem al $(\xi_r^1, \dots, \xi_r^N)$. Her bir r için ($r = 1, 2, \dots, R$), Denklem 3.20’deki problemi çöz.

$$\hat{z}_N^r = \max_{\hat{x} \in X} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(\hat{x}_n^r, \xi_n^r) \right)$$

\hat{z}_N^r , r problemin optimal amaç fonksiyonu değerini; \hat{x}_N^r ise bu amaç fonksiyonunun elde edildiği stok kombinasyonlarına ait miktarları göstermektedir. ξ_n^r , r . problemdeki araçların boya çıkış sırasındaki hatalı pozisyonları gösteren vektördür.

Adım 2: Adım 1’de hesaplanan R adet ortalama ÇSBO değerlerinin ortalamasını al

$$\bar{z}_N = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \hat{z}_N^r.$$

Adım 1’de bulunan en yüksek amaç fonksiyonu değerini veren optimal birinci aşama karar değişkeninin değerini (ara stokta tutulması gereken stok kombinasyonlarına ait

$$\text{miktarlar) bul } \hat{x}^* = \arg \max_x \{ \hat{z}_N^1, \hat{z}_N^2, \dots, \hat{z}_N^r \}$$

Adım 3: Örneklem büyüklüğünü $N' \gg N$ olacak şekilde arttır. Adım 2’de bulunan en yüksek ortalama ÇSBO değerini veren birinci aşama karar değişkenlerini kullanarak N' büyüklüğündeki bir başka örneklem için problemi çöz. $\hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)$, adım 2’de bulunan \hat{x}^* değerine karşılık elde edilen ortalama ÇSBO değerini göstermektedir.

$$\hat{z}_{N'}(\hat{x}^*) = \frac{1}{N'} \sum_{n=1}^{N'} Q(\hat{x}^*, \xi^n)$$

Adım 4: N ve N' büyüklüğünde oluşturulan iki farklı örneklemden elde edilen ortalama ÇSBO farkını $\bar{z}_N - \hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)$ hesapla. Bu farka ait varyansı $\hat{\sigma}_{\bar{z}_N - \hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)}^2$

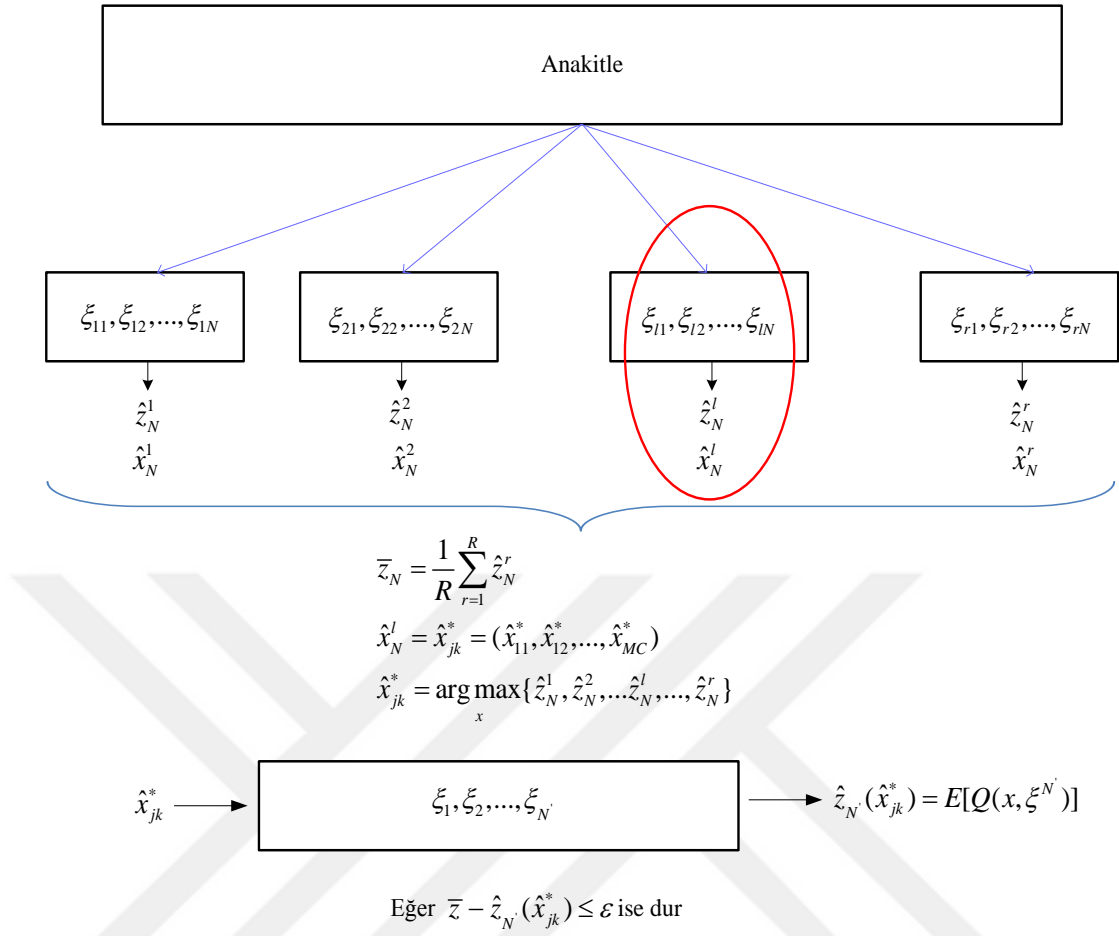
hesapla. $\hat{\sigma}_{\bar{z}_N - \hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)}^2 = \hat{\sigma}_{\bar{z}_N}^2 + \hat{\sigma}_{\hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)}^2$ olmak üzere, $\hat{\sigma}_{\bar{z}_N}^2 = \frac{1}{R(R-1)} \sum_{r=1}^R (z_N^r - \bar{z}_N)^2$,

$$\hat{\sigma}_{\hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)}^2 = \frac{1}{N'(N'-1)} \sum_{n=1}^{N'} (Q(\hat{x}^*, \xi^n) - \hat{z}_{N'}(\hat{x}^*))^2$$

Adım 5: Eğer N ve N' büyüklüğünde oluşturulan iki farklı örneklemden elde edilen ortalama ÇSBO farkı $\bar{z}_N - \hat{z}_{N'}(\hat{x}^*)$ ve bu farka ait varyans yeterince küçük ise algoritma durdurulur. Aksi halde adım 1’den başlayarak R , N ve N' değerleri arttırılıp çözüm tekrarlanır. Burada farkın yeterince küçük olması ile kastedilen ne kadar hassas bir çözüm bulunmak istediği ile ilgilidir. R , N ve N' değerleri arttırılması ile çözümün hassasiyeti artırılabilir, fakat bu durumda artan R , N ve N' ye bağlı algoritmanın koşum süresi artmaktadır.

Algoritmanın ilk adımında N farklı senaryo için araçların boya sonrası sıradaki hatalı veya sağlam olduklarını gösteren rastgele değişken vektörünün ξ_r^n aldığı değerlere bağlı olarak, optimal amaç fonksiyonu değeri \hat{z}_N hesaplanır. Bu işlem R kez tekrarlanır. İkinci adımda ilk adımda hesaplanmış olan R adet ortalama ÇSBO değerlerinin beklenen değeri ve en yüksek ortalama ÇSBO değerinin elde edildiği ilk aşama karar değişkeni \hat{x}_{jk}^* bulunur. \hat{x}_{jk}^* değişkeni R adet çözüm içerisinde en yüksek ortalama ÇSBO değerini veren ara stokta tutulması gerekli model j renk k özellikli araç sayısını göstermektedir. Ele alınan problemde, \hat{x}_{jk}^* bir vektör olup stok tutulan her bir model-renk kombinasyonuna ait miktarları göstermektedir. Adım 3'te, adım 2'de belirlenmiş olan \hat{x}_{jk}^* adet model j renk k özellikli aracın ara stokta tutulması ile elde edilen ortalama ÇSBO, bu kez daha büyük örneklem N' için hesaplanır. Adım 4'de N ve N' büyüklüğünde oluşturulan iki farklı örneklemden elde edilen ortalama ÇSBO farkı ve bu farka ait varyans hesaplanır. Eğer hesaplanmış olan fark yeteri kadar küçükse durulur; aksi halde adım 1'den başlanarak devam edilir.

Örneklem büyüklüğü N değerinin belirlenmesi ile ilgili iki önemli nokta bulunmaktadır. Bunlardan ilki örneklem sayısının fazla olduğu durumda gerçek problemin amaç fonksiyonu değerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Yani örneklem sayısı arttıkça, SAA problem ile daha doğru çözümler elde edilmiş olacaktır. Böylece, N ve N' büyüklüğünde oluşturulan iki farklı örneklemden elde edilen ortalama amaç fonksiyonu farkı daha düşük olacaktır. Diğer taraftan, artan örneklem sayısı SAA problemin hesaplama karmaşıklığını (computational complexity) arttırmaktadır. Bu durumda problemin koşum süresi ve çözümün kalitesi arasında bir seçim yapılmalıdır. Aynı problem N' ve R değerlerinin belirlenmesinde de yaşanmaktadır. R değerinin belirlenmesinde $1/(R+1)$ değerinin yeterince küçük olması istenmektedir. N' değerinin belirlenmesinde ise $\hat{z}_N(\hat{x})$ 'ın varyans değeri olan $S_N^2(\hat{x})/N'$ 'nin yeterince küçük olması istenmektedir [30].



Şekil 3.3. SAA yönteminin açıklanması

Şekil 3.3., SAA yöntemin daha kolay anlaşılmasını sağlamak amacıyla çizilmiştir. Buna göre her biri N adet örnekten oluşan R adet örneklem alınır ve hepsi için SAA problem çözülür, optimal ÇSBO değeri $(\hat{z}_N^1, \hat{z}_N^2, \dots, \hat{z}_N^r)$ ve karar değişkenleri $(\hat{x}_N^1, \hat{x}_N^2, \dots, \hat{x}_N^r)$ bulunur.

Bir sonraki aşamada, R adet örneklem içinde ortalamada en yüksek ÇSBO değerinin elde edildiği çözüm (\hat{z}_N^l) ve bu değer elde edildiği karar değişkeni (\hat{x}_N^l) seçilir. Şekil 3.3.'te en yüksek ÇSBO değeri l . çözümden elde edilmiş ve yuvarlağa alınarak gösterilmiştir. Bu aşamada ortalamada en yüksek ÇSBO değerini elde ettiğimiz ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar optimum miktarlar olarak belirlenir (\hat{x}_{jk}^*) .

Takip eden aşamada, ortalama en yüksek ÇSBO değerinin elde edildiği araç model-renk kombinasyonlarına ait miktar \hat{x}_{jk}^* için örneklem sayısı artırılarak (N') ikinci aşama problemi yeniden çözülür ve ortalama ÇSBO değeri hesaplanır. Eğer $\bar{z}_N - \hat{z}_N(\hat{x}^*)$ arasındaki fark yeterince küçük ise durulur, aksi halde R , N ve N' artırılarak algoritma tekrarlanır.

Çalışmada SAA algoritmasının durdurma kuralı (adım 5) $\bar{z}_N - \hat{z}_N(\hat{x}^*)$ arasındaki farkın 0,01'den küçük olması olarak tanımlanmıştır. Eğer fark 0,01'den küçük ise algoritma durdurulmakta, aksi halde daha büyük örneklem ve senaryo için algoritma yeniden çalıştırılmaktadır.

Problemin çözümü ile ortalama en yüksek ÇSBO değerinin elde edildiği model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar ve bu ÇSBO değeri bulunmaktadır. Fakat problem stokastik bir yapıda olduğu için her bir çözümde farklı optimal ÇSBO değerleri elde edilmektedir. Çalışmada optimal ÇSBO değeri için, en kötü senaryo düşünülerek belirlenmiş olan alt sınır $\hat{z}_N(\hat{x}_{jk}^*)$ kullanılmaktadır. Hesaplanmış olan bu alt sınır, optimal ÇSBO değeri için bir nokta tahmini vermektedir. Problem rastgelelik içerdiği için optimal ÇSBO değerinin nokta tahminden elde edilen sonuca eşit olması neredeyse imkansızdır. Ayrıca, nokta tahmini optimal ÇSBO'ya ne kadar yakın olduğumuz hakkında hiçbir bilgi vermemektedir. Bu durumda optimal ÇSBO için bir aralık tahmini kullanılmış ve güven aralığı hesaplanmıştır.

Optimal ÇSBO değeri için belirlenmiş olan güven aralığı $[\hat{z}_N(\hat{x}_{jk}^*) - z_{\alpha/2} \times \sigma_{\hat{z}_N(\hat{x}_{jk}^*)}; \hat{z}_N(\hat{x}_{jk}^*) + z_{\alpha/2} \times \sigma_{\hat{z}_N(\hat{x}_{jk}^*)}]$ dir. Bu aralıkta α anlam düzeyini, $z_{\alpha/2}$ ise $P(Z < z_{\alpha/2}) = \alpha/2$ olasılığına karşılık gelen z değeri göstermektedir. Güven düzeyi $1-\alpha$ olduğunda hesaplanmış olan aralığın gerçek optimal çözümü kapsayacağına $\%(1-\alpha)100$ güvenilmektedir. Diğer bir deyişle deneyin 100 defa tekrarlanması sonucunda hesaplanmış olan 100 aralıktan ortalama $\%(1-\alpha)100$ 'ü gerçek optimal değeri içermektedir. Çalışmada %95 güven düzeyi kullanılarak alt

güven sınırı $\hat{z}_{N'}(\hat{x}_{jk}^*) - 1,96\sigma_{\hat{z}_{N'}(\hat{x}_{jk}^*)}$, üst güven sınırı da $\hat{z}_{N'}(\hat{x}_{jk}^*) + 1,96\sigma_{\hat{z}_{N'}(\hat{x}_{jk}^*)}$ olarak belirlenmiştir.

3.3. Sayısal Çalışma ve Modelin Uygulanması

Bu bölümde üç farklı alanda uygulama örnekleri tasarlanmıştır. Yapılan ilk uygulama örnekleri SAA algoritmasının performansını test etmek amacıyla yapılmıştır. Farklı büyüklüklerde araç uzunlukları ve ara stok kapasiteleri altında problemin koşum süresi (run time) incelenmiştir. İkinci yapılan uygulama örnekleri ise, ÇSBO'ya etki eden problem parametreleri ile ilgili araştırma yapmak için tasarlanmıştır. Son uygulama örnekleri ise, stokastik model kurmanın sağladığı faydayı ölçmek amacıyla yapılmıştır. Diğer bir deyişle, geliştirilen modelin deterministik değil, stokastik olarak ele alınmasının problemin çözümü üzerindeki etkisini ölçülmüştür.

3.3.1. SAA algoritmasının performansı

SAA algoritmasının performansını değerlendirmek için farklı araç uzunlukları (S) ve ara stok kapasiteleri belirlenerek algoritmanın ortalama çözüm süresi ölçülmüştür. Bu uygulama örneklerinin amacı, SAA algoritması ile hangi büyüklükteki problemlerin ne kadar sürede çözülebileceğinin belirlenmesidir. Model, CPLEX çözücü kullanılarak, GAMS 23.5.2 (versiyon 18.08.2010) programında çözülmüştür. Tasarlanmış olan deneyler Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.67 GHz CPU, 2 GB hafıza özellikli bilgisayarda çözülmüştür. Model 1, Model 2 ve Model 3 olmak üzere üç farklı türde modelin 5 farklı rengin olduğu 90, 180, 270, 360 ve 450 araç uzunluğundaki bloklar için model çalıştırılmıştır. Ara stok kapasiteleri, blok uzunluğunun %3'ü, %6'sı ve %13'ü olacak şekilde belirlenmiştir. Elde edilen koşum süreleri (run time) Tablo 3.1.'de raporlanmıştır.

Bu projede çalışılan otomobil firmasının boyahane kapasitesi vardiya başına 360 araçtır. Boyahane günde 2 vardiya, montaj ise 3 vardiya çalışmaktadır. Firma üç farklı modelde, yaygın olarak da beş farklı renkte araç üretimi gerçekleştirmektedir.

Tablo 3.1. SAA algoritmasının farklı araç uzunluğu ve ara stok kapasiteleri için koşum süresi

Araç Uzunluğu (S)	Ara stok Kapasitesi(BC)	Koşum süresi (dk)
90	3	4,60
	6	11,03
	12	15,53
180	6	22,03
	12	46,47
	24	49,37
270	9	47,17
	18	48,43
	36	87,33
360	12	97,47
	24	99,90
	48	104,9
450	15	174,2
	30	181,24
	60	204,25

Tablo 3.1.'e göre, 60 araç kapasiteli ara stokta tutulması gereken model-renk sayılarını belirlemek ve araçları çizelgelenmiş sıraya uygun olacak şekilde yeniden sıralamak, 450 araç uzunluğuna sahip bir blok için ortalama 3,5 saat sürmektedir. Uygulamada, çizelgelenmiş sıra üretime başlanmadan 10-15 gün önce belirlenmektedir. Belirlenmiş olan çizelgelenmiş sıra malzeme tedarikçisinde sorun yaşanmaması için tedarikçilerle paylaşılmaktadır. 10-15 günlük bir süre ara stokta tutulacak araçların belirlenmesi, bunların kaporta ve boyahane ile paylaşılarak önceden üretilmesi için yeterli bir süredir.

3.3.2. Çözümün literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Literatürdeki çalışmalar ara stoğun sadece yeniden sıralama fonksiyonu üzerinde durmuş, stok tutma fonksiyonunu göz önünde bulundurmamıştır. Bu bölümde yeniden sıralama ara stoğunun stok tutma fonksiyonu ile gereken ara stok kapasitesinin azaltılabileceğini göstermek için bir takım deneyler tasarlanmıştır.

Yeniden sıralama ara stoğunun kapasitesinin belirlenmesi ile ilgili Inman [25] araçların çizelgelenmiş sıra ile boya çıkış sırası arasındaki sıra farklarına bağlı bir

algoritma geliştirmiştir. Inman çizelgelenmiş sıranın aynısının montaj öncesinde oluşturulması için ara stoğun kapasitesinin en az en düşük sıra farkı (izelgelenmiş sıra-boya çıkış sırası) kadar olması gerektiğini göstermiştir.

Tezde geliştirilen iki-aşamalı stokastik model, ara stoğun yeniden sıralama fonksiyonu yanında stok tutma fonksiyonunu da göz önünde bulundurmaktadır. İki-aşamalı stokastik modelden elde edilen sonuçlar ile Inman'ın algoritmasından elde edilen sonuçları karşılaştırmak için 56 araçtan oluşan rastgele bir blok seçilmiştir. Hem Inman'ın algoritmasından elde edilen sonuçlar, hem de iki-aşamalı stokastik modelin üzümünden elde edilen sonuçlar Tablo 3.2.'de listelenmiştir.

Inman boya hatalarını göz önünde bulundurmamaktadır. Geliştirilen iki-aşamalı stokastik modelden elde edilen sonuçları Inman ile karşılaştırabilmek için 4 farklı hata oranı seviyesi (%1, %5, %10 ve %20) belirlenmiştir. %1 hata oranı uygulamada neredeyse 0 hataya karşılık gelmesine rağmen Inman'ın deterministik modeli ile karşılaştırma yapabilmek için ele alınmıştır. Tablo 3.2.'de Inman'ın algoritmasının kullanıldığı durumda 56 araç içerisinden 55 aracın istenilen sırada montaja beslenmesi için, (%98,21 SBO) 50 araç kapasiteli ara stoğa ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat tezde geliştirilen model %1 hata oranında aynı SBO seviyesini 20 araç kapasiteli ara stokta 5 araç stok tutulduğunda sağlamaktadır. Tablo 3.2.'de iki-aşamalı stokastik modelde hata oranı arttıķa hem gereken ara stok kapasitesinin, hem de tutulan stoğun arttığı görülmektedir.

Tablo 3.2.'deki sonuçlar incelendiğinde, ara stokta bulunan depolama alanının bir kısmı stok tutmak için ayrıldığında daha düşük ara stok kapasiteleri ile aynı SBO değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni geliştirilen iki-aşamalı stokastik modelin yeniden sıralama ara stoğunun hem yeniden sıralama, hem de stok tutma fonksiyonunu birlikte ele almasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan hata oranı arttıķa stok tutmadan elde edilen faydanın azaldığı görülmektedir. Örneğin %20 hata oranında iki-aşamalı stokastik model, Inman'ın modelinden daha yüksek ara stok kapasitesine ihtiyaç duymaktadır.

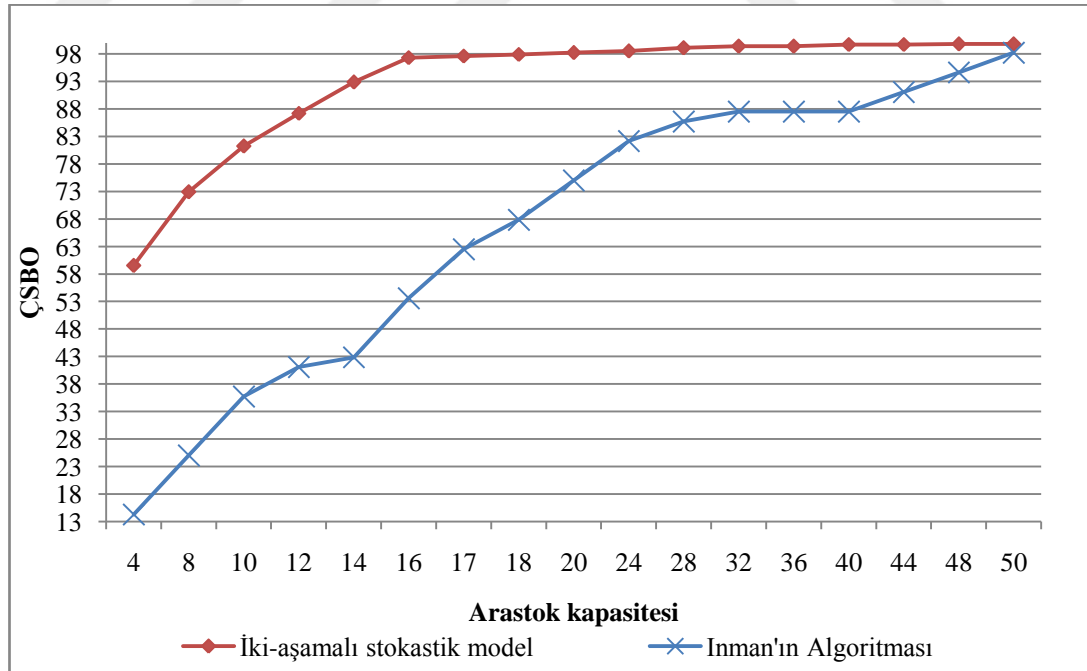
Tablo 3.2. Inman (2003) ile iki-aşamalı stokastik modelin ÇSBO ve yeniden sıralama ara stok kapasitesi açısından karşılaştırılması

Inman'ın Algoritması			İki-aşamalı stokastik model											
Çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada olan araç sayısı (a)*	ÇSBO($\frac{a}{S}$)%*	Ara stok kapasitesi	%1 Hata oranı			%5 Hata oranı			%10 Hata oranı			%20 Hata oranı		
			ÇSBO	Ara stok kapasitesi	Stok sayısı	ÇSBO	Ara stok kapasitesi	Stok sayısı	ÇSBO	Ara stok kapasitesi	Stok sayısı	ÇSBO	Ara stok kapasitesi	Stok sayısı
55	98,21	50	98,21	20	5	98,21	26	8	97,91	50	10	96,36	55	17
54	96,43	49	97,32	16	5	96,97	21	8	96,43	25	9	95,83	50	17
53	94,64	46	95,88	15	5	95,83	20	8	95,33	24	9	94,34	46	16
52	92,86	45	94,34	14	4	94,14	19	8	94,04	24	9	91,66	45	16
51	91,07	43	91,25	13	4	91,15	18	7	91,07	23	8	90,95	44	15
50	89,29	43	91,25	13	4	90,67	18	7	90,33	23	8	89,88	44	15
49	87,50	30	87,95	11	2	87,62	16	4	87,53	22	6	87,47	31	11
48	85,71	26	87,95	11	2	87,13	15	3	86,42	20	6	86,33	28	10
45	80,36	22	81,25	10	2	81,12	14	3	80,95	17	4	80,64	26	8

* a ve S sırasıyla çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada olan araç sayısı ve yeniden sıralanacak araç blok uzunluğunu göstermektedir, $S=56$.

Farklı yeniden sıralama ara stok kapasiteleri altında Inman'ın algoritması ve geliştirilen iki-aşamalı stokastik modelden elde edilen ÇSBO değerleri Şekil 3.4.'te bulunmaktadır. Şekil 3.4.'e göre ara stok kapasitesi 4 araç olduğunda Inman'ın algoritması ile elde edilen ÇSBO değeri yaklaşık %15 iken, iki-aşamalı stokastik model ile %60 ÇSBO elde edilmiştir. İki-aşamalı stokastik modelde ara stok kapasitesi 16 araç olduğunda %98 ÇSBO değerine ulaşılırken, Inman'ın modelinde aynı ÇSBO değerine 50 araç kapasiteli ara stok ile ulaşılmaktadır.

İki-aşamalı stokastik modelde ara stok kapasitesini 16 araçtan fazla olacak şekilde arttırmanın sağladığı marjinal fayda oldukça azalmakta, neredeyse hiç ÇSBO artışı sağlanmamaktadır. Inman'ın modelinde ise ÇSBO ara stok kapasitesindeki artışa bağlı neredeyse lineer olarak artmaktadır. İki modelden elde edilen ÇSBO değerleri arasındaki fark, artan ara stok kapasitesine bağlı olarak azalmaktadır. Bunun nedeni artan ara stok kapasitesi ile daha fazla sayıda aracın pozisyonunun (sırası) değiştirilebilmesi, yani daha fazla aracın çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada montaja girişinin sağlanmasıdır.



Şekil 3.4. İki-aşamalı stokastik model ve Inman'ın algoritması (2003) ile hesaplanan gerekli ara stok kapasitelerinin karşılaştırılması

3.3.3. Model parametrelerinin çözüme etkisi

Bu bölümde yapılan sayısal çalışmalarının amacı problem parametrelerinin çizelgelenmiş sıra başarımlarının (ÇSBO) artırılmasında nasıl ve ne büyüklükte etki ettiğini incelemektir. ÇSBO'nun artırılması, diğer bir değişle montaj giriş sırasının çizelgelenmiş sıraya uyumlu hale getirilmesi;

- Ara stok kapasitesine ve burada tutulan araçların model-renk kombinasyonlarına,
- Çizelgelenmiş sıra ile (a_s, \dots, a_2, a_1) boya giriş sırası $(a'_s, \dots, a'_2, a'_1)$ arasındaki benzerliğe,
- Her bir renkte oluşan hata oranlarına,

bağlı olarak değişmektedir. ÇSBO'ya etki eden faktörlerden ikincisi olan çizelgelenmiş sıra (a_s, \dots, a_2, a_1) ile boya giriş sırası $(a'_s, \dots, a'_2, a'_1)$ arasındaki benzerlik “boya giriş uyum oranı” (BGO) ile ölçülmektedir. BGO, boyahaneye girecek olan araçların yüzde kaçının çizelgelenmiş sıraya uygun olarak girdiğini göstermektedir. Yüksek BGO, araçların boya giriş sıralarının çizelgelenmiş sıraya uyumunun yüksek olduğunu ifade etmektedir. Düşük BGO ise araçların boya giriş sıralarının boyahanenin kısıtları ön planda tutularak belirlendiğini göstermektedir. Bu durumda düşük BGO'ya sahip bir boya giriş sırasında, az sayıda araç çizelgelenmiş sırada olması gereken pozisyonda bulunmaktadır.

Deneyle, 50 araç uzunluğunda üç farklı model ve beş farklı renkten oluşan bir blok için yapılmıştır. Çizelgelenmiş sıranın literatürde bulunan araç sıralama algoritmalarına göre belirlendiği varsayılmaktadır. Bu deneylerde; (i) ara stok kapasitesi 5, 10, 15 araç, (ii) boya giriş uyum oranı (BGO) %30, %50, %70 ve %90, (iii) boya hata oranı %10, %20 ve %30 seviyelerinde ele alınmıştır.

Araç montaj giriş sıraları belirlenirken firma tarafından istasyon kapasitelerini göz önünde bulundurarak oluşturulan montaj giriş kısıtları şu şekildedir: $H_1 : S_1 = 1/3$,

$H_2 : S_2 = 1/3$ ve $H_3 : S_3 = 2/3$. Bu kısıtlara göre, çizelgelenmiş sıra (a_s, \dots, a_2, a_1) belirlenirken iki kurala dikkat edilmelidir. Bunlardan ilki herhangi üç araç içerisinde Model 1 veya Model 2 araç sayısının biri geçmemesidir. İkincisi ise herhangi üç araç içerisindeki Model 3 sayısının iki adetten fazla olmamasıdır. SAA algoritması parametreleri ise $R = 10, N = 100$ ve $N' = 200$ olarak belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama ÇSBO değerleri, %95 güven aralığı ile Tablo 3.3.'de sunulmaktadır. Bu ÇSBO değerlerinin elde edilmesi için ara stokta tutulması gereken optimal araç model-renk sayıları ise Tablo 3.4.'de bulunmaktadır. Tablo 3.3.'e göre, %30 BGO seviyesinde, ara stok kapasitesi 5 araç olduğunda, %10, %20 ve %30 hata oranları için sırasıyla %53,63-%49,8 ve %43,17 ortalama ÇSBO değerleri elde edilmiştir. Bu ÇSBO değerleri için belirlenmiş olan %95 güven aralıkları yine sırasıyla [%52,9-%54,4], [%48,8-%50,8], ve [%41,9-%44,4] olmaktadır.

Tablo 3.3.'deki ortalama ÇSBO değerlerine göre, (i) kapasite artışının, (ii) BGO'daki artışın ve son olarak (iii) hata oranındaki azalışın ÇSBO üzerindeki etkileri sırasıyla incelenmektedir.

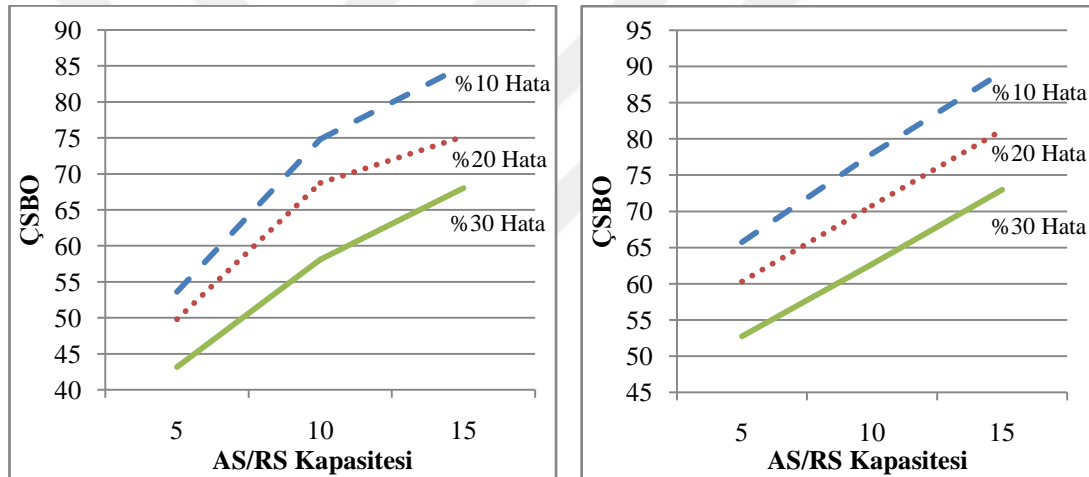
Tablo 3.3. Uygulama örneklerinde elde edilen ortalama ÇSBO değerleri ve %95 güven aralıkları*

	AS/RS kapasitesi, $BC=5$			AS/RS kapasitesi, $BC=10$			AS/RS kapasitesi, $BC=15$		
	Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları		
BGO	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30
%30	53,63 [52,9-54,4]	49,8 [48,8-50,8]	43,17 [41,9-44,4]	74,83 [74,2-75,5]	68,73 [67,7-69,7]	58,1 [56,9-59,3]	85,03 [84,2-85,9]	75,2 [74,3-76,1]	68,03 [66,7-69,3]
%50	65,73 [64,9-66,6]	60,3 [59,3-61,3]	52,73 [51,5-54,0]	77,93 [77,1-78,8]	70,77 [69,8-71,8]	62,7 [61,4-64,0]	89,2 [88,5-89,9]	81,2 [80,1-82,3]	72,97 [71,7-74,3]
%70	71 [70,3-71,8]	63,8 [62,7-64,9]	55,23 [53,7-56,5]	83 [82,1-84,0]	72,83 [71,7-74,0]	64,97 [63,8-66,2]	90,3 [89,6-91,0]	84,2 [83,2-85,2]	76,9 [75,7-78,1]
%90	89,07 [88,2-90,0]	80,07 [79,0-81,2]	70,58 [69,7-71,4]	93 [92,2-93,9]	85,4 [84,0-86,9]	78,02 [77,1-79,0]	95,9 [95,2-96,6]	90,7 [89,7-91,7]	83,07 [81,7-84,4]

*Parantez içinde yazılan değerler ortalama ÇSBO için elde edilen %95 güven aralığını göstermektedir.

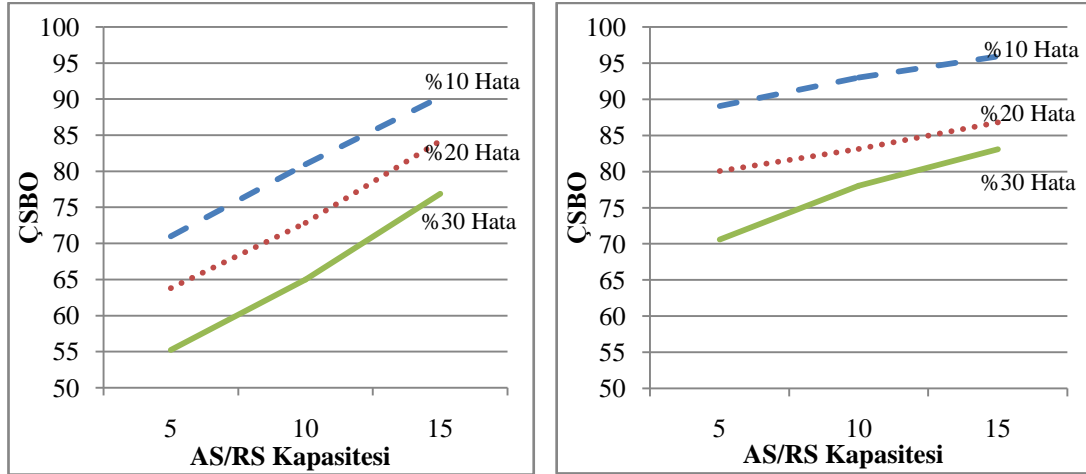
3.3.3.1. Kapasite artışının ÇSBO üzerindeki etkisi:

Deneyleerde ele alınan her BGO seviyesi için kapasite artışına bağlı olarak ÇSBO'nun nasıl değiştiği Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da gösterilmektedir. %30 BGO seviyesinde, stok kapasitesi 5 araçtan 10 araca çıkartıldığında, ÇSBO'daki artış miktarı %10 hata oranında 21,2 (74,83-53,63); %20 hata oranında 18,93 (68,73-49,8) ve %30 hata oranında 14,93 (58,1-43,17) birim olmaktadır. Aynı koşullar altında stok kapasitesi 10 araçtan 15 araca çıkartıldığında, %10 hata oranında 10,2 (85,03-74,83); %20 hata oranında 6,47 (75,2-68,73) ve %30 hata oranında 9,93 (68,03-58,1) birim ÇSBO artışı sağlanmaktadır. BGO seviyesi %30 iken, stok kapasitesini arttırmanın marjinal etkisi, stok kapasitesi 10 araçtan 15 araca çıkarıldığında azalmaktadır.



Şekil 3.5. %30 BGO (solda) ve %50 BGO (sağda) seviyelerinde stok kapasitesindeki artışın ÇSBO üzerindeki etkisi

BGO değeri %50 ve %70 seviyelerinde iken stok kapasitesindeki artışın ÇSBO artışı üzerindeki etkisinin neredeyse lineer olduğu görülmektedir. Yani stok kapasitesini 5 araçtan 10 araca çıkartmak ile stok kapasitesini 10 araçtan 15 araca çıkartmak ÇSBO üzerinde neredeyse aynı etkiyi göstermektedir.



Şekil 3.6. %70 BGO (solda) ve %90 BGO (sağda) seviyelerinde stok kapasitesindeki artışın ÇSBO üzerindeki etkisi

Şekil 3.6.'da (sağda), %90 BGO seviyesinde artan stok kapasitesine bağlı ÇSBO artışının çok az olduğu görülmektedir. Tablo 3.3.'de, hata oranı %10, stok kapasitesi 5 araç olduğunda %89,07 ÇSBO elde edilmiştir. Stok kapasitesi üç katına çıkarıldığında ise ÇSBO sadece 6,83 birim artarak %95,9 olmaktadır. Hata oranı %20 iken stok kapasitesini üç katına çıkartmak ÇSBO'yu 10,63 (90,7-80,07) birim arttırmaktadır. Hata oranı %30 olduğunda aynı artış 12,49 (83,07-70,58) birim olmaktadır. Bu deney sonuçlarına göre, yüksek BGO seviyelerinde stok kapasitesindeki artışın etkisi hata oranına bağlı değişmektedir. Kapasite artışının ÇSBO'yu arttırıcı etkisi, yüksek hata oranında çalışıldığında daha fazla olmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Yüksek BGO seviyelerinde araçlar çizelgelenmiş sıraya oldukça uygun bir şekilde sıralanmışlardır ve montaj öncesinde araçların sıralarında yapılacak değişikliğin büyük bir kısmı boyahanedeki hatalardan kaynaklı olmaktadır. Kapasite artışı, ara stokta tutulacak araç sayısının arttırılmasını sağlayacağı için en yüksek etki yüksek hata oranında gözükmektedir. Böylelikle, artan stok miktarı hata oranının ÇSBO'yu azaltıcı negatif etkisini ortadan kaldırmaktadır.

Ara stok kapasitesinin ÇSBO artışı üzerindeki etkisi BGO değerinin artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Yani BGO arttıkça, ara stok kapasitesinin ÇSBO üzerinde oluşturduğu arttırıcı etki azalmaktadır. Bu durumda yüksek BGO seviyeleri ile

çalışıldığında ara stok kapasitesini arttırarak ÇSBO artışı sağlamak hem sınırlı hem de maliyetli olmaktadır.

3.3.3.2. Boya giriş uyum oranındaki artışın ÇSBO üzerindeki etkisi

Tablo 3.3.'e göre, yüksek BGO değerleri ile çizelgelenmiş sıraya uyumu yüksek montaj giriş sıraları elde edilmektedir. Fakat yüksek BGO değerlerinde, araçların boya giriş sıraları montaj kısıtları göz önüne alınarak oluşturulduğu için boya hazırlık zaman ve maliyetlerinde iyileştirme yapılmamaktadır. Bu durumda boya hazırlık zaman ve maliyetlerinde yapılacak iyileştirme ile ÇSBO'nun arttırılması sonucu elde edilen kazanç karşılaştırılmalıdır.

Tablo 3.3.'de %10 hata oranında ara stok kapasitesi 5 araç iken, BGO %50'den %70'e çıkartıldığında 5,27 (71-65,73) birim ÇSBO artışı elde edilmiştir. Aynı koşullar altında ara stok kapasitesi 10 araç iken BGO %50'den %70'e çıkartıldığında, 3,03 (80,96-77,93) birim ÇSBO artışı sağlanmıştır. Ara stok kapasitesi 15 araç olduğunda ise BGO'nun %50'den %70'e çıkartılması ile 1,1 (90,3-89,2) ÇSBO artışı elde edilmiştir.

BGO değerinin %50 olduğu durumda, %70 olduğu duruma göre daha fazla araç boyahanenin kısıtlarına uygun bir şekilde boyahaneye girmektedir. Yani %50 BGO değerinde ortalama 50 araç (1-BGO) boyahanenin kısıtlarına uygun bir şekilde boyahaneye girerken, %70 BGO değerinde ortalama 30 araç (1-BGO) boyahanenin kısıtlarına göre boyahaneye girmektedir. Her iki durumda elde edilen ÇSBO değerleri karşılaştırıldığında %70 BGO değerinde fazladan ortalama 3,13 $((5,27+3,03 +1,1)/3)$ birimlik ÇSBO artışı görülmektedir. Boyahanede yapılacak %20'lik bir iyileşme, ÇSBO'da 3,13 birimlik bir azalmaya neden olmaktadır. Buna göre: araçların boya giriş sıralarını belirlerken sadece montaj kısıtları değil aynı zamanda boyahane kısıtlarını da göz önünde bulundurmak, ÇSBO üzerinde önemli bir azalışa neden olmamaktadır. Ayrıca bu durumda boyahanede yapılacak maliyet eniyilemesinden de yararlanılabilmektedir. Buna göre boyahane ile montaj

departmanının eşgüdümü ile belirlenen boya giriş sırasında hem boyahane maliyetlerinde azalma hem de yüksek ÇSBO elde etmek mümkün olmaktadır.

3.3.3.3. Hata oranındaki azalışın ÇSBO üzerindeki etkisi

Tablo 3.3.'e göre hata oranında yapılacak iyileştirmenin yüksek BGO ile çalışıldığında önemli olduğu görülmektedir. BGO %30, ara stok kapasitesi 5 araç iken hata oranını %30'dan %10'a düşürmek ortalama 10,46 (53,63-43,17) birimlik ÇSBO artışı sağlamaktadır. Buna karşın aynı durumda %90 BGO ile çalışıldığında elde edilen ÇSBO artışı 18,49 (89,07-70,58) birim olmaktadır. Düşük BGO, boyahane ile montajın birbirinden ayrı, kendi kısıtlarına göre sıralandığı, aralarında eşgüdümün bulunmadığı durumda oluşmaktadır. Boyahane ve montaj arasındaki eşgüdüm eksikliği hata oranlarında yapılan iyileştirmenin etkisini azaltmaktadır. Bu durumda hata oranlarında yapılacak iyileştirmenin etkisi boyahane ile montaj arasında sağlanan eşgüdüm sayesinde istenilen seviyelerde olacaktır.

Kapasite artışının, BGO'daki artışın ve hata oranındaki azalışın ÇSBO üzerindeki etkileri incelendikten sonra şimdi de bu faktörlere bağlı olarak AS/RS'de tutulan stok miktarının nasıl değiştiği incelenecektir. Tablo 3.3.'de bulunan ÇSBO değerlerinin elde edildiği durumda ara stokta tutulan model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar Tablo 3.4.'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Uygulama örneklerinde AS/RS'de tutulması gereken optimal araç model-renk kombinasyonları ve miktarları*

	AS/RS Kapasitesi, BC=5			AS/RS Kapasitesi, BC=10			AS/RS Kapasitesi, BC=15		
	Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları		
BGO	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30
%30	-	-	-	-	-	-	M2C4(2)	M1C2(1)	M1C3(1)
							M3C1(2)	M2C1(1)	M3C1(2)
							M3C2(1)	M3C2(3)	M3C3(2)
								M3C3(1)	M3C4(1)
								M3C4(1)	M3C5(2)
								M3C5(1)	

Tablo 3.4. (Devamı)

BGO	AS/RS Kapasitesi, BC=5			AS/RS Kapasitesi, BC=10			AS/RS Kapasitesi, BC=15		
	Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları		
	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30
%50	-	-	-	M1C3(1) M1C4(1)	M1C4(1) M2C5(1) M3C1(1) M3C3(1)	M1C4(1) M1C5(1) M2C3(1) M3C1(1)	M1C3(1) M2C1(1) M2C5(1) M3C1(2) M3C2(1) M3C4(1)	M1C3(1) M1C5(1) M2C1(1) M3C1(2) M3C2(2) M3C3(1)	M1C5(1) M2C3(1) M2C5(1) M3C1(2) M3C3(3) M3C4(1)
%70	M3C3(2) M3C5(1)	M2C2(1) M3C1(1) M3C5(1)	M2C2(1) M3C3(1) M3C4(1)	M2C1(1) M2C3(1) M3C2(1) M3C3(1) M3C3(1)	M1C4(1) M2C3(1) M3C1(2) M3C1(2)	M2C3(1) M3C2(1) M3C3(1) M3C4(1) M3C5(2)	M2C1(1) M2C2(1) M2C3(1) M3C1(3) M3C2(1) M3C4(1) M3C5(1)	M2C1(1) M2C2(1) M2C3(1) M3C1(1) M3C3(2) M3C3(2) M3C4(2) M3C5(1)	M1C2(1) M2C1(1) M2C1(1) M3C1(2) M3C3(2) M3C4(2) M3C5(2)
%90	M1C3(1) M2C4(1) M2C5(1) M3C1(1)	M1C3(1) M2C4(1) M2C5(1) M3C1(1)	M3C3(3) M3C4(1)	M1C2(1) M2C1(1) M2C4(1) M3C1(1) M3C2(1) M3C3(1)	M1C4(1) M2C1(1) M2C3(1) M2C4(1) M3C1(1) M3C1(1) M3C3(2) M3C3(2) M3C4(1)	M1C4(1) M2C1(1) M2C4(1) M3C1(1) M3C2(1) M3C3(2) M3C4(2)	M2C1(1) M2C3(1) M2C4(1) M3C1(3) M3C2(1) M3C3(1) M3C5(1)	M2C1(1) M2C4(1) M2C2(1) M3C2(2) M3C4(2) M3C5(2) M3C3(1) M3C4(1) M3C5(2)	M1C2(1) M2C1(1) M2C2(1) M2C4(1) M3C1(1) M3C2(1) M3C3(1) M3C4(1) M3C5(2)

*Parantez içindeki sayılar o model ve renkteki araçtan kaç adet stok tutulduğunu göstermektedir.

3.3.3.4. Kapasite artışının AS/RS’de tutulan stok miktarına etkisi

Tablo 3.4.’e göre düşük BGO değerlerinde, belli bir kapasitenin altında stok tutulmadığı görülmektedir. Örneğin, ara stok kapasitesi 10 araçtan az olmak üzere, BGO %30 seviyesinde iken hata oranına bakmaksızın AS/RS’yi boş bırakmak en uygun karardır. Bunu şu şekilde açıklayabiliriz: %30 BGO, araçların boya giriş sırasının yüksek oranda boya kısıtları gözetilerek oluşturulduğunu göstermektedir. Boya giriş sırasının montaj kısıtlarına uygun olmadığı durumda, montaj öncesinde, çok fazla sayıda aracın pozisyonu değiştirilecektir. Bu durumda, AS/RS’nin stok tutma fonksiyonundan ziyade araç yeniden sıralama fonksiyonu ön plana çıkacağı için AS/RS’yi boş bırakmak en optimal karar olmaktadır. Araçların pozisyonlarında yapılacak değişiklik miktarı AS/RS’de bulunan boş stok depolama alanına bağlı

olduğu için, AS/RS'nin yeniden sıralama esnekliği boş depolama alanı sayısına bağlı olarak artmaktadır.

Diğer taraftan %30 BGO ve %10 hata oranında, AS/RS kapasitesi 15 araca çıkarsa iki adet Model 2, Renk 4 (M2C4); iki adet Model 3, Renk 1(M3C1) ve bir tane Model 3, Renk 2 araç stokta tutulmaktadır. Düşük BGO seviyelerinde, artan stok kapasitesi öncelikle yeniden sıralama esnekliğini arttırmak için kullanılmaktadır. Belli bir kapasite artışından sonra, stok depolama alanı sayısının arttırılması tek başına ÇSBO'yu arttırmada etkili olmamaktadır. Bu durumda stok depolama alanlarının bir kısmı hatalı araçlardan kaynaklanan ÇSBO azalışını telafi etmek için ayrılmaktadır.

3.3.3.5. Boya giriş uyum oranındaki artışın AS/RS'de tutulan stok miktarına etkisi

Tablo 3.4.'e göre, BGO arttıkça AS/RS'de tutulan stok miktarının arttığı görülmektedir. Araçlar çizelgelenmiş sıraya yüksek uyum oranı ile boyahaneye girdiklerinde daha az sayıda aracın pozisyonlarında değişiklik yapılmaktadır. Bu durumda AS/RS depolama alanının bir kısmı hatalı araçların yerine beslenecek araçlar için ayrılmaktadır.

Düşük BGO seviyesinde AS/RS'nin yeniden sıralama fonksiyonu ön planda bulunurken, yüksek BGO'da AS/RS'nin stok tutma fonksiyonu öne çıkmaktadır. Bunun nedeni şu şekilde açıklayabiliriz: BGO seviyesi %70 veya %90 iken, araçların montaj kısıtlarına yani çizelgelenmiş sıraya uyumu yüksek olduğundan, daha az sayıda araç için pozisyon değişikliği yapılmaktadır. Araçlar çizelgelenmiş sıraya uygun geldiği için, ÇSBO'yu arttırmak hatalı araçların yerine yenilerinin konulması ile mümkün olmaktadır. Bu durumda AS/RS'nin araç sıralama fonksiyonundan ziyade araç depolama fonksiyonu ön plana çıkmaktadır ve AS/RS'de tutulan araç sayısı BGO seviyesindeki artışa bağlı olarak artmaktadır. Örneğin %70 BGO seviyesi ve 5 araçlık ara stok kapasitesi altında, hata oranına bakılmaksızın AS/RS doluluk oranı %60 (3/5) olmaktadır. Ara stok kapasitesi 10 araç olduğunda, %10 ve

%20 hata oranı için %40; %30 hata oranı için %60 AS/RS doluluk oranları gerçekleşmektedir. Ara stok kapasitesi 15 araca çıkartıldığında %10, %20 ve %30 hata oranları için sırasıyla %60 (9/15), 60% (9/15), ve 66,67% (10/15) AS/RS doluluk oranları gerçekleşmektedir.

BGO seviyesi %90 olduğunda, araçların çok yüksek bir kısmı çizelgelenmiş sıraya uygun geldiği için AS/RS araç depolama oranı en yüksek seviyededir. AS/RS doluluk oranı tüm hata oranları ve ara stok kapasitelerinin ortalaması alındığında %71,85 olmaktadır.

3.3.3.6. Hata oranındaki azalışın tutulan stok miktarına etkisi

Tüm BGO ve farklı ara stok kapasitelerinde hata oranında yapılan iyileşme sonucunda tutulan stok sayısı azalmaktadır. Ara stokta stok tutulan araçlar, hatalı araçların yerine konulmak üzere depolandığı için hata oranındaki artış stok ihtiyacını arttırmaktadır.

3.3.4. Stokastik çözümün değeri (VSS)

Bu bölümde, geliştirilen modeli stokastik yapıda kurmuş olmanın sağladığı fayda incelenmektedir. Stokastik problemlerin modellenmesinde yaşanan güçlük nedeniyle problemler basitleştirilerek deterministik hale getirilmektedir. Problem deterministik bir forma sokulurken, yapısındaki rastgele değişkenler ortalamaları ile değiştirilmektedir. Bu da çözümün kalitesini düşürmektedir.

Stokastik çözümün değeri (VSS), stokastik modellerin deterministik modellere göre öneminin ölçülmesi için kullanılmaktadır. Stokastik modelden elde edilen sonuç ile problemin deterministik halinin çözülmesi ile elde edilen sonucun karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Stokastik modelleri kurmak için harcanan çabanın gereksiz olmadığını göstermek için geliştirilmiştir [27, 33, 34].

$$EV = \max_x z(x, \bar{\xi}) \quad (3.21)$$

Denklem 3.21’de bulunan EV , deterministik problemin çözümünü göstermektedir. Deterministik modelde rastgele değişkenlerin değerini gösteren ξ vektörü, ortalamasını gösteren $\bar{\xi}$ ile yer değiştirmiştir. Rastgele değişkenlerin ortalama değeri $\bar{\xi}$, şu şekilde hesaplanmaktadır: $E(\xi) = \bar{\xi}$.

Denklem 3.22’de bulunan $\bar{x}(\bar{\xi})$, deterministik çözümün optimal değerini göstermektedir ve “beklenen değer çözümü” olarak adlandırılmaktadır. EEV , deterministik modelden elde edilen çözümün farklı senaryolar altında çözülmesi ile elde edilen ortalama amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Diğer bir ifade ile EEV , $\bar{x}(\bar{\xi})$ ’ye bağlı olarak elde edilen deterministik modelin beklenen (ortalama) amaç fonksiyonu değerini göstermektedir.

$$EEV = E_{\xi}(z(\bar{x}(\bar{\xi}), \xi)) \quad (3.22)$$

Geliştirilen modelde EEV , şu şekilde bulunmaktadır:

Adım 1: Hata sayısı rastgele değişkeni yerine ortalama hata sayısı değerini kabul ederek iki-aşamalı problemi çöz (Denklem 3.21). Burada rastgele değişken $\bar{x}(\bar{\xi})$, hata sayısı rastgele değişkeni yerine ortalama hata sayısının kullanılması sonucunda ara stokta tutulması gereken optimum araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarı gösteren ilk aşama karar değişkenidir.

Adım 2: İlk aşama karar değişkeni $\bar{x}(\bar{\xi})$ ’yi sabitle. İkinci aşama kararı olan montaj giriş sıralarının belirlenmesi problemini hataların oluşacağı pozisyonlara bağlı farklı senaryolar için çöz.

Adım 3: Tüm bu senaryolardan elde edilen optimal ÇSBO değerlerinin ortalamasını hesapla. Elde edilen ortalama, EEV değerini göstermektedir.

Denklem 3.23’te bulunan RP , stokastik modelin SAA ile çözümünden elde edilen ortalama ÇSBO değerini göstermektedir. VSS, Denklem 3.23’te görüldüğü gibi,

stokastik model ile deterministik modelden elde edilen beklenen optimal çözümler (ÇSBO) arasındaki farka eşittir.

$$VSS = RP - EEV \quad (3.23)$$

3.3.4.1. EEV'nin hesaplanması

Boyahanede oluşan hata oranı p , boya giriş sırası a'_s, \dots, a'_2, a'_1 ile gösterilmek üzere, i 'nci sırada bulunan aracın hatalı olup olmadığı gösteren I_i gösterge rastgele değişkeni tanımlanmıştır.

$$I_i = \begin{cases} 0, & \text{boya giriş sırasındaki araç } a_i \text{ hatalı ise} \\ 1, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Rastgele değişken I_i , parametresi p olan Bernoulli rastgele değişkendir. Böylece, S uzunluğundaki araç sırasındaki hatalı araç sayısı ND , Binom rastgele değişkendir. Hatalı araç sayısının dağılımı şu şekilde gösterilebilir: $ND \sim Binom(S, p)$. Denklem 3.22'de bulunan $\bar{\xi}$ yerine, hatalı araç sayısının beklenen değeri Denklem 3.24'deki gibi hesaplanarak konulmuştur.

$$E[ND] = S \times p \quad (3.24)$$

Stokastik çözümün değerini ölçmek amacıyla yapılan uygulama örneklerinde, yeniden sıralanacak araç blok uzunluğu 50 araç olarak alınmıştır. Boyahanede oluşan hata oranları da %10, %20, %30 ve %40 olarak alındığı için beklenen hata sayısı her zaman tamsayı değer olmaktadır.

Hataların oluşacağı pozisyonlar göz önüne alındığında, aynı hata sayısında bile çok fazla sayıda senaryo oluşmaktadır. Örneğin 50 araç uzunluğunda hataların oluşabileceği 2^{50} farklı senaryo bulunmaktadır. Senaryo sayısı bu kadar fazla olduğu için, deterministik modelin beklenen değeri, simülasyon yardımıyla bulunmuştur. Kurulan simülasyonda aynı hata sayısı için hataların oluşacağı pozisyonlar rastgele

belirlenmiştir. Ortalama ÇSBO değeri belli bir değere yakınsayınca kadar model çok defa çözülmüştür.

Çalışmada stokastik çözümün değerinin ölçülmesi amacıyla deneyler farklı BGO seviyelerinde %10, %20, %30 ve %40 hata oranı için tekrarlanmıştır. Deterministik model yerine stokastik model kullanılmasından elde edilen kazançlar Tablo 3.5.'te listelenmiştir.

Tablo 3.5. Farklı hata oranları için stokastik çözümün değeri

BGO	Hata oranı	Stokastik çözüm (RP)	Deterministik çözüm (EEV)	VSS	Yüzde fark (%) $\frac{RP-EEV}{EEV} \times 100$
%30	%10	74,83	73,73	1,10	1,49
	%20	68,73	66,92	1,81	2,70
	%30	58,10	56,27	1,83	3,25
	%40	49,80	47,90	1,90	3,96
%50	%10	77,93	76,78	1,15	1,50
	%20	70,77	69,07	1,70	2,46
	%30	62,70	60,86	1,84	3,02
	%40	56,30	54,15	2,15	3,97
%70	%10	83,00	81,80	1,20	1,47
	%20	72,83	71,02	1,81	2,55
	%30	64,97	63,07	1,90	3,01
	%40	55,78	53,68	2,10	3,91
%90	%10	93,00	91,32	1,68	1,84
	%20	85,40	83,52	1,88	2,25
	%30	78,02	75,79	2,23	2,94
	%40	71,67	67,94	3,73	5,49

Tablo 3.5.'e göre, %30 BGO seviyesinde %10 hata oranında deterministik model ile %73,73 ÇSBO elde edilirken stokastik modelde %74,83 ÇSBO elde edilmiştir. İki çözüm arasında ortalama 1,1 birim fark bulunmaktadır. Deterministik modelde ortalama her yüz araç içerisinde 73,73'ü montaj hattından istenilen sırada çıkarken; stokastik modelde 74,83 tanesi istenilen sırada çıkmaktadır. Firma günde üç vardiya

çalışmakta, ortalama 960 araç üretmektedir. Stokastik modelin kullanılması sonucunda %10 hata oranında, ortalama her yüz araçta fazladan 1,1 araç istenilen sırada üretilmektedir. Bu da bir günde fazladan yaklaşık 10 aracın istenilen sırada üretilmesini sağlamaktadır.

Tablo 3.5.'te görüldüğü gibi stokastik modelden elde edilen fayda, hata oranı arttıkça artmaktadır. %30 BGO seviyesinde, hata oranı %40 olduğunda stokastik modelden elde edilen fayda 1,9 birim olmaktadır. Diğer BGO seviyelerinde de durum aynıdır. Ayrıca BGO seviyesi arttıkça stokastik modelden elde edilen faydanın da arttığı görülmektedir. %90 BGO seviyesinde tüm hata oranlarında diğer BGO seviyelerine kıyasla daha yüksek VSS elde edilmiştir. Bu durumu şu şekilde açıklanabilir. Düşük BGO seviyesinde değişkenliğin nedeni, boyahanedeki yapılacak maliyet eniyilemesidir ve araç sıralarında yapılacak değişiklik önceden bellidir. Diğer taraftan yüksek BGO seviyesinde araçların sıralarındaki değişkenliğin nedeni, boyahanedeki rastgele oluşan hatalardan kaynaklanmaktadır. Stokastik model, boyahanedeki oluşan hatalardaki rastgeleliği dikkate aldığı için deterministik modele göre daha iyi çözümler vermektedir.

Tablo 3.5.'te bulunan son sütunda stokastik modelin kullanılması ile ÇSBO'da meydana gelen artış yüzde cinsinden gösterilmektedir. Örneğin %30 BGO seviyesinde stokastik model ile ÇSBO değeri %10 hata oranında %1,49; %20 hata oranında %2,7; %30 hata oranında %3,25 ve son olarak %40 hata oranında %3,96 arttırılmıştır.

3.4. Kural Tabanlı İki-aşamalı Sezgisel Model

Bölüm 3.1.'de sunulan iki-aşamalı stokastik modelin, ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların ve araçların montaj giriş sıralarının belirlenmesi için her S büyüklüğünde araç için yeniden çözülmesi gerekmektedir. Problemin tekrar tekrar çözülmesi, modelin işletmeler tarafından kullanımının yaygınlaştırılmasına engel olmaktadır.

Ayrıca hatta önceden öngörülemeyen nedenlerden kaynaklanan (reaktif) araç sıra değişiklikleri sıklıkla yaşanmaktadır. Böyle bir durumla her karşılaşıldığında optimal ÇSBO değerini elde etmek için problemin yeniden çözülmesi mümkün olmamakta, işçilerin sırası değişen aracın yerine hangi aracın konulması gerektiği kararını anlık vermesi gerekmektedir.

Tezin bu bölümünde iki-aşamalı modele alternatif olabilecek kural tabanlı bir başka model oluşturulmuştur. Bu model, işçilerin araç montaj giriş sıralarının oluşturulmasında kullanacakları yeniden sıralama politikalarından oluşmaktadır. Sezgisel kurallar işçilerin montaj hattında kolaylıkla uygulayabileceği kurallardır. Bu kurallar sayesinde yeniden sıralama kararlarını anlık verilebilmektedir. Böylece her S uzunluğundaki araç bloğu için yeniden sıralama probleminin çözülmesi gerekmemektedir.

İşletmede uygulanması planlanan yeniden sıralama kuralları AS/RS'de $\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk}$ adet araç varken, şu şekilde tanımlanmıştır:

Kural 1: Eğer boyahaneden çıkan araç hatalı ise, o aracı tekrar boyanmak üzere boyahaneye geri gönder.

Kural 2: Yeniden sıralamaya başlamadan önce, boyahaneden çıkan araçlardan ilk NLV tanesini AS/RS'ye yerleştir. NLV , işçilerin yeniden sıralama yaparken kontrol edebileceği araç sayısını göstermektedir. Çizelgelenmiş sıradaki i 'nci araç, AS/RS'de bulunan $\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} + NLV$ adet araç içerisinde varsa aracı montaja besle. AS/RS'de bulunan toplam araç sayısının aynı kalması için, montaja beslenen araç yerine boyahaneden çıkan ilk sağlam aracı yerleştir. Eğer çizelgelenmiş sıradaki i 'nci araç, AS/RS'de bulunan $\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} + NLV$ adet araç içerisinde yoksa Kural 3'ü uygula.

Kural 3: Geri kalan araçları Model 1, Model 2 ve Model 3 kısıtlarından sapma olmayacak şekilde rastgele yerleştir. Eğer mümkün olmazsa, model kısıtlarından sapmaların önüne geçmek için, iki araç arasında boş pozisyon bırak.

Yukarıda tanımlanmış olan Kural 2 ile ilgili birtakım açıklama yapılması gerekmektedir. Kural 2 de bahsedilen, $\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} + NLV$ adet araç, işçinin yeniden sıralama yaparken kontrol edebileceği araç sayısını göstermektedir. Bu sayının fazla olması yeniden sıralama esnekliği arttırmaktadır. Diğer taraftan belli bir büyüklükten sonra işçi yeniden sıralama yapmakta zorlanacağı için, çok yüksek *NLV* değerleri ile çalışılmamaktadır. *NLV* belirlenirken iki faktöre dikkat edilmiştir. İlk işçilerin yeniden sıralama yaparken kontrol edebilecekleri araç sayısıdır. İkincisi de Bölüm 3.1.'de kurulan modelin sonuçları incelendiğinde araçların pozisyonlarında yapılan değişiklik miktarıdır.

Bölüm 3.1.'deki modelde belirlenmiş olan ara stokta tutulması gereken model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar, yeniden sıralamanın optimal yapıldığı durum için hesaplanmıştır. Yeniden sıralamanın yukarıda tanımlanmış olan kurallar çerçevesinde yapılması durumunda ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar tekrar hesaplanmalıdır.

Yeniden sıralamanın tanımlanmış olan kurallar çerçevesinde yapılması sonucunda gerekli stok miktarlarının belirlenmesi problemi iki-aşamalı bir problemdir. İlk aşamada AS/RS'de tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları ve miktarları belirlenmektedir. İkinci aşamada ise AS/RS'de tutulan stoklar ve tanımlanmış olan kurallar doğrultusunda araçların montaj giriş sıralarına karar verilmektedir.

İlk aşama problem, Denklem 3.25 - 3.26 ile gösterilmektedir. İlk aşama problemi için amaç fonksiyonu (Denklem 3.25) tanımlanmış olan yeniden sıralama kurallarına uygun bir atamanın yapılmasını sağlamak üzere oluşturulmuş yalancı bir fonksiyondur (pseudo objective function). Yalancı amaç fonksiyonu, kuralların tanımlanmış olduğu doğrusal kısıtlara uygun atamanın yapılması için gerekli olup,

bir anlamı bulunmamaktadır [35]. Kısıtlardan sapmanın enküçüklenmesini ifade etmektedir. Denklem 3.26 deki kısıt ara stokta tutulacak stok miktarının ara stok kapasitesi BC 'yi geçmemesini sağlamaktadır.

$$\min_x f(x) = E[Q(x, \xi)] \quad (3.25)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} \leq BC \quad (3.26)$$

Denklem 3.25'de bulunan yalancı amaç fonksiyonu $Q(x, \xi)$, sezgisel yeniden sıralama kurallarının doğrusal hale getirilmesi ile Denklem 3.27'deki gibi yazılmış olup, Denklem 3.28-3.39 arasında yer aralan ikinci aşama probleminin amaç fonksiyonunu göstermektedir.

$$\min Q(x, \xi) = S - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S y_{ijkh}(\xi) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S \gamma_{jkh}(\xi) \quad (3.27)$$

Buna göre ikinci aşama problem,

$$d_{ijk}(\xi) = \sum_{h=1}^S y_{ijkh}(\xi) + w_{ijk}(\xi) \quad \forall i = 1, \dots, S; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.28)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C y_{ijkh}(\xi) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, S; h < \max\{1, i - NLV\} \quad (3.29)$$

$$f_{jkh}(\xi) = \sum_{i=1}^S y_{ijkh}(\xi) + z_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.30)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \geq sc_{jkh} - f_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (3.31)$$

$$\sum_{k=1}^C \sum_{h=h}^{\min\{h+S_j-1, S\}} f_{jkh}(\xi) - (1 - \sum_{k=1}^C f_{jkh}(\xi))BM \leq H_j \quad \forall j = 1, \dots, M; h = 1, \dots, S \quad (3.32)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C f_{jkh}(\xi) \leq 1 \quad \forall h = 1, \dots, S \quad (3.33)$$

$$\sum_{i=1}^{S-1} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=i+1}^S y_{ijkh} \geq 1 \quad (3.34)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C y_{ijkh}(\xi)(i-h) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{jk} \leq BC \quad \forall i > h; i = 2, \dots, S; h = 1, \dots, S-1 \quad (3.35)$$

$$x_{jk} \geq \sum_{h=1}^S z_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.36)$$

$$SSAR = 1 - \frac{1}{S} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S \gamma_{jkh}(\xi) \quad (3.37)$$

$$y_{ijkh}(\xi), z_{jkh}(\xi), w_{ijk}(\xi), \gamma_{jkh}(\xi) \in \{0, 1\} \quad (3.38)$$

$$\forall i = 1, \dots, S; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S$$

$$x_{jk} \in \{\mathbb{Z}^+\} \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (3.39)$$

Rastgele değişken $d_{ijk}(\xi)$ boya çıkış sırasındaki araçların sağlam veya hatalı olduğunu göstermektedir. Boya hataları (ξ) gözlemlendikten sonra, boya çıkış sırasındaki i 'nci araç için, değişken $d_{ijk}(\xi)$ 1 değerini alırsa bu o aracın sağlam olduğunu; 0 değerini alırsa aracın hatalı olduğunu göstermektedir. Boyahaneden çıkan i 'nci araç hatalı ise, boyahaneye tekrar boyanmak üzere geri gönderileceği için ara stoğa alınmaz. Bu kural, kural 1 ile tanımlanmıştır. Kural 1 doğrusal halde Denklem 3.28 şeklinde yazılmıştır. Bu kısıt sayesinde boyahaneden çıkan hatalı araçlar AS/RS'ye alınmamaktadır.

Denklem 3.29'daki kısıt herhangi bir aracın en fazla "NLV" kadar ön sıraya geçebileceğini ifade etmektedir. Denklem 3.30'da bulunan f_{jkh} ikili değişkeni, montaj giriş sırasındaki h 'nci pozisyona atanan model j ve renk k özellikli aracın, ya yeniden sıralama öncesinde depolanan araçlardan ya da boyahane çıkış sırasındaki araçlardan biri olacağını ifade etmektedir. Denklem 3.30, montaj giriş sırasındaki araçların gösterimini sağlamak amacıyla yazılmıştır. Böylece Denklem 3.31'deki kısıtta görüldüğü gibi çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırasının karşılaştırılması kolaylıkla yapılabilmektedir.

Denklem 3.32 ile ifade edilen kısıt, montaj giriş sırasının Model 1, Model 2 ve Model 3 kısıtlarından sapma olmayacak şekilde belirlenmesini sağlamaktadır.

Denklem 3.33'teki kısıt, montaj giriş sırasında araçlar arasında gerektiği durumda boş pozisyonlar bırakılabileceğini ifade etmektedir. Denklem 3.32 ve 3.33, amaç fonksiyonu sayesinde Kural 3'e uygun atamanın yapılmasını sağlamaktadır.

Denklem 3.34 - 3.39'da bulunan kısıtlar kural tabanlı sezgisel yeniden sıralama modelinin çalıştırılması için gerekli olup, işçilere tanımlanması gereken kuralları içermemektedir. Denklem 3.34'e göre en az bir tane aracın montaj giriş sırasındaki pozisyonu boya çıkış sırasındaki pozisyonundan daha büyük olmalıdır. Boya giriş sırasındaki i 'nci araç, montaj giriş sırasında ara stokta bulunan boş depolama alanı kadar öne geçebilir. Yani boya giriş sırasındaki i 'nci araca, montaj giriş sırasında daha düşük numaralı bir pozisyon atanabilir ($h < i$). Fakat bu koşulun sağlanması için en az bir tane aracın montaj giriş sırasındaki pozisyonunun boya giriş sırasındaki pozisyonundan daha büyük olması gerekmektedir ($h > i$).

Denklem 3.35'teki kısıt AS/RS'nin kapasite şartını sağlamak için yazılmıştır. Buna göre AS/RS hem stok tutma hem de yeniden sıralama fonksiyonlarını yerine getirebilecek büyüklükte olmalıdır. Denklem 3.36'da bulunan kısıt, AS/RS'de bulunmayan bir aracın montaj giriş sırasına beslenemeyeceğini ifade etmektedir. Denklem 3.37 ÇSBO'nun nasıl hesaplandığını göstermektedir. Modelde kullanılan değişkenlerin türleri, Denklem 3.38-3.39 ile tanımlanmıştır. Buna göre $y_{ijkh}(\xi)$, $z_{jkh}(\xi)$, $w_{ijk}(\xi)$, $\gamma_{jkh}(\xi)$ değişkenleri ikili (0-1) değişkendir. Değişken x_{jk} ise pozitif tamsayı değerler almaktadır.

3.4.1. Kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel model ile iki-aşamalı stokastik optimal yeniden sıralama modelin karşılaştırılması

Bu bölümde, geliştirilen kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel yeniden sıralama modeli ile iki-aşamalı stokastik optimal yeniden sıralama modelinin performansları karşılaştırılmaktadır. Farklı BGO, hata oranı ve ara stok kapasitesi için iki model arasında ÇSBO açısından %95 güven düzeyinde istatistiksel açıdan bir fark olup olmadığı araştırılmaktadır. Deney sonuçları Tablo 3.6.'da her iki model için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 3.6.'da bulunan ÇSBO değerlerinin elde

edildiği stok kombinasyonları ve miktarları da her iki model için Tablo 3.7.'de listelenmiştir.

Yapılan nümerik çalışmalarda kural tabanlı sezgisel yeniden sıralama için *NLV*, 5 araç olarak belirlenmiştir. Buna göre herhangi bir araç en fazla 5 araç öne atlayabilmektedir. *NLV*'nin büyüklüğü firma çalışanlarının görüşleri ve optimal yeniden sıralama sonuçları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Diğer taraftan optimal yeniden sıralama yapıldığında, AS/RS'de araç pozisyon değişikliği için kaç adet depolama alanının boş bırakılacağı model tarafından belirlenmektedir.

Tablo 3.6.'ya göre optimal yeniden sıralama yapıldığında, BGO seviyesi %30, hata oranı %10 ve stok kapasitesi 10 araç iken ortalama %74,83 ÇSBO elde edilmiştir. Bu ÇSBO için belirlenen %95 güven düzeyi %74,2-%75,5'dir. Aynı parametreler için kural tabanlı sezgisel yeniden sıralama ile ortalama %65,33 ÇSBO elde edilmiştir. Belirlenmiş olan %95 güven düzeyi ise %64,3-%66,4'tür. Buna göre iki çözüm arasında ortalama %9,5 ÇSBO farkı bulunmaktadır.

Tablo 3.6. Optimal yeniden sıralama ile kural tabanlı yeniden sıralamanın ÇSBO açısından karşılaştırılması*

BGO	Hata oranı (%)	AS/RS kapasitesi	Optimal yeniden sıralama için ÇSBO	Kural tabanlı yeniden sıralama için ÇSBO	Ortalama ÇSBO farkı
30	10	10	74,83 [74,2-75,5]	65,33 [64,3-66,4]	9,50
30	20	10	68,73 [67,7-69,7]	61,93 [60,9-63]	6,80
30	30	10	58,10 [56,9-59,3]	57 [56-58]	1,10*
30	10	15	85,03 [84,2-85,9]	73,6 [72,6-74,6]	11,43
30	20	15	75,20 [74,3-76,1]	68,8 [67,6-70]	6,40
30	30	15	68,03 [66,7-69,3]	66,9 [66-68]	1,13*
50	10	10	77,93 [77,1-78,8]	77,8 [76,6-79]	0,13*
50	20	10	70,77 [69,8-71,8]	72,26 [71,1-73,4]	-1,49*
50	30	10	62,7 [61,4-64]	61,1 [59,7-62,6]	1,59*
50	10	15	89,20 [88,46-89,94]	83,93 [83-84,9]	5,27

Tablo 3.6. (Devamı)

BGO	Hata oranı (%)	AS/RS kapasitesi	Optimal yeniden sıralama için ÇSBO	Kural tabanlı yeniden sıralama için ÇSBO	Ortalama ÇSBO farkı
50	20	15	81,20 [80,1-82,3]	80,33 [79,4-81,2]	0,87*
50	30	15	72,97 [71,7-74,3]	71,23 [70-72,4]	1,74*
70	10	10	83 [82,1-84]	82,73 [81,5-84]	0,27*
70	20	10	72,83 [71,7-74]	73,53 [72,5-74,6]	-0,70*
70	30	10	64,97 [63,8-66,2]	63,53 [62,4-64,7]	1,44*
70	10	15	90,30 [89,6-91]	86,47 [85,3-87,6]	3,83
70	20	15	84,2 [83,2-85,2]	82,8 [81,6-84]	1,40*
70	30	15	76,90 [75,7-78,1]	77,67 [76,4-78,9]	-0,77*
90	10	10	93,0 [92,2-93,9]	92,07 [90,9-93,3]	0,93*
90	20	10	85,40 [84-86,9]	83,06 [81,9-84,4]	2,34*
90	30	10	78,02 [77,1-79]	77,8 [76,6-79,1]	0,22*
90	10	15	95,90 [95,2-96,6]	95,53 [94,4-96,7]	0,37*
90	20	15	90,70 [89,7-91,7]	88,93 [87,5-90,3]	1,77*
90	30	15	83,07 [81,7-84,4]	82,87 [81,5-84,3]	0,20*

*%95 güven düzeyinde iki sonuç arasında istatistiksel fark yok.

Tablo 3.6.'daki sonuçlar her bir BGO seviyesi için ayrı ayrı yorumlanmaktadır. Buna göre, %30 BGO düzeyi için iki bulgu elde edilmiştir. İlki, kural tabanlı yeniden sıralamadan elde edilen ortalama ÇSBO değerinin, optimal yeniden sıralamadan elde edilen ÇSBO değerlerine göre daha düşük olmasıdır. Bu durum kural tabanlı yeniden sıralamada, araç montaj giriş sıralarının ÇSBO değerini enbüyükleyecek şekilde değil tanımlanmış olan kurallar çerçevesinde belirlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Elde edilen ikinci bulgu, her iki çözümün (optimal yeniden sıralama ve kural tabanlı yeniden sıralama) ortalama ÇSBO değerleri arasındaki farkın hata oranı arttıkça azalmasıdır. Hatta %30 hata oranında iki çözüm arasında ÇSBO açısından fark bulunmamaktadır. Bunun nedenini şu şekilde açıklayabiliriz. Optimal yeniden sıralamanın yapıldığı durumda hata oranındaki artışa bağlı olarak araçların pozisyonlarında yapılacak değişiklik miktarı sınırlanacak ve düşük hata oranı kadar esnek bir yeniden sıralama mümkün olmayacaktır. Bu da, optimal yeniden sıralamadan elde edilen ÇSBO değerini kural tabanlı yeniden sıralamadan elde edilen sonuca yaklaştırmaktadır.

%50 ve %70 BGO seviyelerinde, 10 araçlık AS/RS kapasitesi altında tüm hata oranlarında optimal yeniden sıralama ve kural tabanlı yeniden sıralama arasında bir fark bulunmamaktadır. Fakat AS/RS kapasitesi 15 araca çıkartıldığında %10 hata oranında, optimal yeniden sıralama daha yüksek ÇSBO değerleri vermektedir. Stok kapasitesini arttırmak, optimal yeniden sıralama modelin yeniden sıralama esnekliğini arttırmıştır. Tablo 3.6.'da BGO seviyesi %50, hata oranı %10 iken ara stok miktarı 15 araca çıktığında iki model arasında ortalama 5,27 ÇSBO farkı elde edilmiştir. Aynı koşullar altında BGO seviyesi %70 iken bu fark 3,83 birimdir. Diğer taraftan %20 ve %30 hata oranlarında ara stok kapasitesi 15 araca çıkarıldığında iki model arasında ortalama ÇSBO açısından bir fark oluşmamaktadır. Bu durumu şu şekilde açıklayabiliriz. Artan ara stok kapasitesi optimal yeniden sıralama modelinin yeniden sıralama esnekliğini arttıracığı için ÇSBO değerinin kural tabanlı yeniden sıralama modeline göre daha yüksek çıkması beklenmektedir. Fakat hata oranındaki artış optimal yeniden sıralama modelin yeniden sıralama esnekliğini azaltmaktadır. Diğer bir değişle hata oranının artması sonucunda stok kapasitesindeki artışın ÇSBO'yu arttırıcı etkisi ortadan kalkmaktadır.

%90 BGO seviyesinde iki modelden elde edilen ÇSBO değerleri açısından %95 güven düzeyinde bir fark olmadığı görülmektedir. Yüksek BGO seviyesinde, boya çıkış sırası ile çizelgelenmiş sıra arasındaki benzerlik oranı çok yüksek olduğu için çok az sayıda aracın pozisyonlarında değişiklik yapılacaktır. Bu da, kural tabanlı

yeniden sıralama modeli ile optimal yeniden sıralama modelinden ortalamada aynı ÇSBO değeri elde edilmesini sağlamaktadır.

Kural tabanlı yeniden sıralama modeli ile optimal yeniden sıralama modeli karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Geliştirilen kural tabanlı modelin, optimal yeniden sıralama model ile karşılaştırılabilir ÇSBO değerleri sağladığı görülmektedir. Çok düşük BGO değerleri ile çalışıldığında optimal yeniden sıralama modeli daha iyi sonuç vermektedir. Eğer boyahane ile montaj arasında belli bir koordinasyon seviyesi yakalanırsa (BGO artarsa) geliştirilen kural tabanlı yeniden sıralama kuralları uygulamada kolaylıkla kullanılabilir.
- Hata oranındaki artış ve ara stok kapasitesindeki azalış, optimal yeniden sıralama modelin yeniden sıralama performansını düşüren iki önemli faktördür. Eğer hata oranı %10'un üzerinde ise ve ara stok kapasitesi yeniden sıralanacak blok uzunluğunun %20'sinin altında ise kural tabanlı yeniden sıralama modeli kullanılabilir.
- Optimal yeniden sıralama modeli sınırlı stok kapasitesi altında, düşük BGO ve hata oranlarında kural tabanlı yeniden sıralama modeline göre daha iyi ÇSBO değerlerini sağlamaktadır.

Tablo 3.7.'de, hem Tablo 3.6.'da ÇSBO değerleri bulunan optimal yeniden sıralama modeline, hem de iki-aşamalı stokastik modelin optimal çözümüne ait ara stokta tutulan araç model-renk kombinasyonları miktarlarıyla birlikte listelenmiştir. Tablo 3.7.'ye göre kural tabanlı yeniden sıralama modelinde %30 BGO seviyesinde, hata oranı %10 ve AS/RS kapasitesi 10 araç iken, bir adet Model 2-Renk 1 (M2C1), bir adet Model 2-Renk 3 (M2C3), bir adet Model 2-Renk 4 (M2C4), bir adet Model 3-Renk 3 (M3C3), iki adet Model 3-Renk 4 (M3C4) ve iki adet Model 3-Renk 5 (M3C5) olmak üzere toplamda 8 araç stok tutulurken, optimizasyon modelinde hiç stok tutulmamaktadır. Tablo 3.7'de kural tabanlı yeniden sıralama modeli ile optimal yeniden sıralama. karşılaştırıldığında aynı BGO, hata oranı ve stok kapasitesi altında

optimal yeniden sıralama modeli, kural tabanlı yeniden sıralama modeli ile aynı veya daha iyi ÇSBO değerlerini daha az miktarda stok tutarak elde etmektedir.

Tablo 3.7.'de kural tabanlı yeniden sıralama modelinde, optimal yeniden sıralama modeline benzer olarak, AS/RS'de tutulan stok sayısı hata oranı arttıkça artmaktadır. Örneğin BGO seviyesi %30, hata oranı %10 olduğunda 10 araç kapasiteli AS/RS'de 8 araç stok tutulmaktadır. Hata oranı %20 olduğunda 9; hata oranı %30 olduğunda ise 10 araç stok tutulmaktadır. Elde edilen bir diğer sonuç, optimal yeniden sıralama modeline benzer olarak tüm BGO seviyelerinde AS/RS kapasitesi arttığında tutulan stok miktarının artmasıdır.

Yine Tablo 3.7.'de kural tabanlı yeniden sıralama modeline göre AS/RS kapasitesi 10 araç iken tüm BGO seviyelerinde neredeyse aynı miktarda stok tutulduğu görülmektedir. Örneğin BGO %30 seviyesinde iken tutulan ortalama stok sayısı 9 araçtır (%10, %20 ve %30 hata oranları için sırasıyla 8, 9 ve 10 adet). BGO değeri %50 ve %70 için tutulan ortalama stok sayısı 8,67 araç olmaktadır. BGO %90'a ulaştığında ise stok tutulan araç sayısı önceki BGO değerlerine benzer olarak 9,33 araçtır. Aynı durum AS/RS kapasitesi 15 araca çıkartıldığında da görülmektedir. BGO %30 iken, stokta ortalama 11,67 araç (%10, %20 ve %30 hata oranları için sırasıyla 10, 11 ve 14 adet) bulunmaktadır. BGO %50 olduğunda tutulan ortalama stok sayısı 10,67; BGO %70 olduğunda 11,67 araç olmaktadır. BGO %90'a çıktığında ise yine benzer olarak ortalama 11 aracın stok tutulduğu görülmektedir. Optimal yeniden sıralama modelinde yeniden sıralama, sezgisel kurallara göre değil optimal bir şekilde yapıldığı için daha az stokla aynı veya daha yüksek ÇSBO değerleri elde etmek mümkün olmaktadır. Fakat kural tabanlı yeniden sıralama modelinde yeniden sıralama, kurallar çerçevesinde yapıldığı için tutulan stok sayısı sadece AS/RS kapasitesi arttığında artmaktadır.

Tablo 3.7. Kural tabanlı yeniden sıralama ile optimal yeniden sıralama modelinin AS/RS'de tutulan stok miktarları açısından karşılaştırılması*

BGO	AS/RS kapasitesi, $BC=10$; $NLV=5$			AS/RS kapasitesi, $BC=10$			AS/RS kapasitesi, $BC=15$; $NLV=5$			AS/RS kapasitesi, $BC=15$		
	Kural tabanlı yeniden sıralama			Optimal yeniden sıralama			Kural tabanlı yeniden sıralama			Optimal yeniden sıralama		
	Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları		
	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30
%30	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M1C3 (1)				M1C3 (1)	M1C5 (1)	M1C2 (1)	M2C4(2)	M1C2(1)	M1C3(1)
	M2C3 (1)	M2C3 (1)	M2C1 (1)				M2C1 (1)	M2C1 (1)	M1C3 (2)	M3C1(2)	M2C1(1)	M3C1(2)
	M2C4 (1)	M2C4 (1)	M2C3 (1)				M2C3 (1)	M2C4 (1)	M1C4 (1)	M3C2(1)	M3C2(3)	M3C3(2)
	M3C3 (1)	M3C1 (2)	M2C4 (1)				M2C4 (1)	M3C1 (2)	M2C1 (1)		M3C3(1)	M3C4(1)
	M3C4 (2)	M3C3 (2)	M3C1 (2)				M3C1 (2)	M3C3 (3)	M2C2 (1)		M3C4(1)	M3C5(2)
	M3C5 (2)	M3C4 (1)	M3C3 (2)				M3C3 (2)	M3C4 (2)	M2C3 (1)		M3C5(1)	
		M3C5 (1)	M3C4 (1)		-	-	-	M3C4 (1)	M3C5 (1)	M3C1 (2)		
		M3C5 (1)					M3C5 (1)		M3C3 (1)			
									M3C4 (3)			
									M3C5 (1)			
%50	M1C3 (1)	M1C3 (1)	M1C2 (1)	M1C3(1)	M1C4(1)	M1C4(1)	M1C3 (1)	M1C3 (1)	M1C3 (1)	M1C3(1)	M1C3(1)	M1C5(1)
	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M1C3 (1)	M1C4(1)	M2C5(1)	M1C5(1)	M1C4 (1)	M1C4 (1)	M2C1 (1)	M2C1(1)	M1C5(1)	M2C3(1)
	M2C5 (1)	M2C5 (1)	M2C1 (1)		M3C1(1)	M2C3(1)	M2C1 (1)	M1C5 (1)	M2C3 (1)	M2C5(1)	M2C1(1)	M2C5(1)
	M3C1 (1)	M3C1 (2)	M2C3 (1)		M3C3(1)	M3C1(1)	M2C5 (1)	M2C1 (1)	M2C5 (1)	M3C1(2)	M3C1(2)	M3C1(2)
	M3C2 (1)	M3C2 (1)	M2C5 (1)				M3C1 (2)	M2C3 (1)	M3C1 (2)	M3C2(1)	M3C2(2)	M3C3(3)
	M3C3 (1)	M3C3 (1)	M3C1 (1)				M3C3 (1)	M2C5 (1)	M3C2 (1)	M3C4(1)	M3C3(1)	M3C4(1)
	M3C4 (2)	M3C4 (1)	M3C2 (1)				M3C4 (1)	M3C1 (1)	M3C3 (2)			
			M3C4 (2)				M3C5 (2)	M3C3 (1)	M3C4 (2)			
		M3C5 (1)					M3C4 (1)	M3C5 (1)				
								M3C5 (1)				

Tablo 3.7. (Devamı)

BGO	AS/RS kapasitesi, $BC=10$; $NLV=5$			AS/RS kapasitesi, $BC=10$			AS/RS kapasitesi, $BC=15$; $NLV=5$			AS/RS kapasitesi, $BC=15$		
	Kural tabanlı yeniden sıralama			İki-aşamalı stokastik model			Kural tabanlı yeniden sıralama			İki-aşamalı stokastik model		
	Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları			Hata oranları		
	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30	%10	%20	%30
%70	M1C4 (1)	M1C2 (1)	M1C3 (1)	M2C1(1)	M1C4(1)	M2C3(1)	M2C1 (1)	M1C3 (1)	M1C2 (1)	M2C1(1)	M2C1(1)	M1C2(1)
	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M2C3(1)	M2C3(1)	M3C2(1)	M2C3 (1)	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M2C2(1)	M2C2(1)	M2C1(1)
	M2C3 (1)	M2C3 (1)	M2C2 (1)	M3C2(1)	M3C1(2)	M3C3(1)	M3C1 (2)	M2C2 (1)	M2C3 (1)	M2C3(1)	M2C3(1)	M3C1(2)
	M3C1 (2)	M3C1 (2)	M2C3 (1)	M3C3(1)		M3C4(1)	M3C2 (1)	M2C3 (1)	M2C4 (1)	M3C1(3)	M3C1(1)	M3C3(2)
	M3C2 (1)	M3C3 (1)	M3C3 (4)			M3C5(2)	M3C3 (4)	M3C1 (3)	M3C1 (4)	M3C2(1)	M3C3(2)	M3C4(2)
	M3C3 (2)	M3C4 (1)	M3C4 (1)				M3C4 (1)	M3C2 (1)	M3C2 (1)	M3C4(1)	M3C4(2)	M3C5(2)
		M3C5 (2)							M3C3 (2)	M3C3 (4)	M3C5(1)	M3C5(1)
									M3C5 (1)	M3C4 (1)		
%90	M2C1 (1)	M1C2 (1)	M1C2 (1)	M1C2(1)	M1C4(1)	M1C4(1)	M1C5 (1)	M1C5 (1)	M1C2 (1)	M2C1(1)	M2C1(1)	M1C2(1)
	M2C4 (1)	M1C3 (1)	M2C1 (1)	M2C1(1)	M2C1(1)	M2C1(1)	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M2C1 (1)	M2C3(1)	M2C4(1)	M2C1(1)
	M3C1 (2)	M1C5 (1)	M2C2 (1)	M2C4(1)	M2C3(1)	M2C4(1)	M2C4 (1)	M2C3 (1)	M2C3 (1)	M2C4(1)	M3C1(1)	M2C2(1)
	M3C3 (2)	M2C1 (1)	M2C3 (2)	M3C1(1)	M2C4(1)	M3C1(1)	M3C1 (2)	M2C4 (1)	M2C4 (2)	M3C1(3)	M3C2(2)	M2C4(1)
	M3C5 (2)	M2C3 (1)	M2C5 (1)	M3C2(1)	M3C1(1)	M3C3(2)	M3C2 (2)	M3C1 (1)	M3C1 (2)	M3C2(1)	M3C4(2)	M3C1(1)
		M3C1 (1)	M3C1 (1)	M3C3(1)	M3C3(2)	M3C4(2)	M3C3 (3)	M2C2 (1)	M3C3 (3)	M3C3(1)	M3C5(2)	M3C2(1)
		M3C2 (1)	M3C3 (1)		M3C4(1)			M3C3 (1)	M3C4 (3)	M3C5(1)		M3C3(1)
		M3C3 (1)	M3C5 (2)					M3C4 (2)				M3C4(1)
		M3C4 (1)						M3C5 (1)				M3C5(2)
		M3C5 (1)										

*Parantez içindeki sayılar o model ve renkteki araçtan kaç adet stok tutulması gerektiğini göstermektedir.

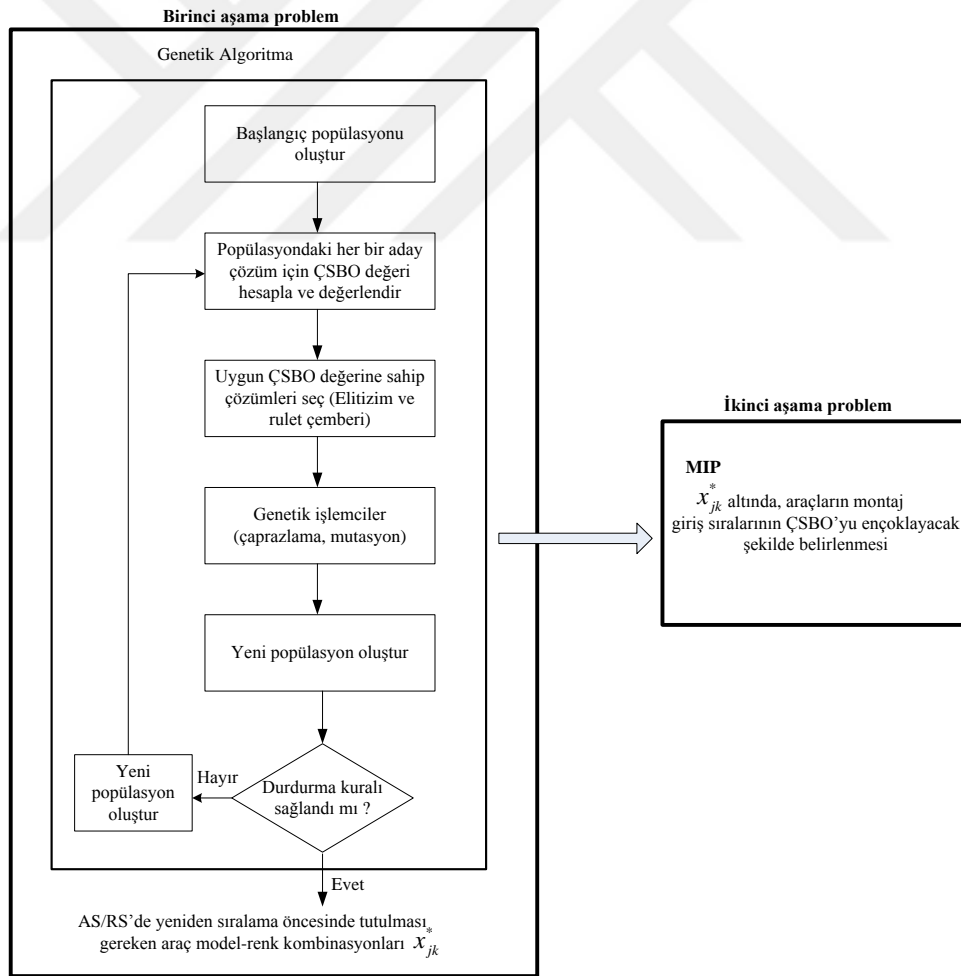
3.5. Büyük Ölçekli Problemlerin Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Melez Bir Model ile Çözümü

Büyük ölçekli problemleri zaman ve maliyet kısıtlarından dolayı geleneksel eniyileme yöntemleri ile çözebilmek mümkün olmadığı için, uygulamada yaygın olarak ileri-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. İleri-sezgisel yöntemler, sezgisel kuralların çok farklı problem türlerine uyarlanabilen halleridir. Diğer bir deyişle, ileri-sezgisel yöntemler küçük düzeltmelerle farklı eniyileme problemlerine uyarlanabilen genel algoritmik bir çerçeve oluşturmaktadırlar. Genetik ve evrimsel algoritmalar (evolutionary algorithms), tabu arama, tavlama benzetimi, karınca kolonisi, yinelemeli yerel arama (iterated local search) en yaygın kullanılan ileri-sezgisel algoritmalarıdır. Diğer taraftan problemin çözüm uzayı ve karmaşıklığı arttıkça ileri-sezgisel yöntemler de yetersiz kalmaktadır.

Son zamanlarda, büyük ölçekli problemlerin çözümünde ileri-sezgisel tabanlı bir algoritma ile birlikte ileri-sezgisel haricinde farklı algoritmalar da içerebilen başka eniyileme tekniklerinin de bulunduğu melez ileri-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır [36]. Burada bahsedilen eniyileme teknikleri, meta-sezgiseller, dal-sınır, dinamik programlama veya doğrusal programlama tekniklerinden herhangi biridir [37-39]. Melez bir yapı kurmanın amacı, farklı algoritmaların bir araya getirilerek daha iyi performans göstermelerini sağlamaktır. Farklı algoritmaların bir araya getirilmesi sonucu doğan sinerji sayesinde, iki algoritmanın avantajlarından yararlanılmaktadır. Diğer taraftan zor eniyileme problemlerinin (hard optimization problems) çözümünde sağlanacak fayda, farklı algoritmaların doğru kombinasyonları ile mümkün olmaktadır [40]. Etkin bir melez ileri-sezgisel algoritma, ileri-sezgisellerin hızlı çözüm bulma avantajı ile eniyileme yöntemlerinin başarılı çözüm bulma avantajını doğru bir şekilde birleştirmektedir [41].

Tezde ele alınan problemin ölçeği, yeniden sıralanacak araç sayısı arttıkça büyümektedir. Çalışmada, büyük ölçekli problemleri çözmek için öncelikle genetik algoritma (GA) ileri-sezgiseli ile problem modellenmiş ve MATLAB R2009a ile çözülmüştür. Fakat saf genetik GA kullanılarak elde edilen sonuçlar, iki-aşamalı

stokastik modelin karma tamsayılı programlama ile çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmayacak kadar kötü bulunmuştur. Bu nedenle büyük ölçekli problemlerin çözümü için hem matematiksel modeli, hem de GA'nın birlikte çözüm aradığı melez bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen melez model, matematiksel programlama ile ileri-sezgisel algoritmaların birleştirilmesinden oluşmaktadır. Matematiksel modeller ile ileri-sezgisel yöntemlerin kullanıldığı farklı melez modellere Talbi'nin çalışmasından ulaşılabilir [42]. Şekil 3.7.'de geliştirilen model sunulmuştur. Buna göre, öncelikle ilk aşama kararı olan ara stokta tutulması gereken en doğru araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlarının belirlenmesi problemi GA ile çözülmektedir. GA'dan elde edilen çözüm altında, ikinci aşama kararı olan araç montaj giriş sıralarının belirlenmesi problemi Bölüm 3.1.'de anlatılan karma tamsayılı program ile çözülmektedir.



Şekil 3.7. Melez modelin gösterimi

Şekil 3.7.'de kısaca adımları verilen GA, doğal seleksiyon ve genetiğe dayanan stokastik arama tekniğidir. Rastgele belirlenen aday çözümlerden oluşan başlangıç popülasyonu ile arama işlemine başlamaktadır. Buradaki aday çözümler, problemin çözümündeki aday çözümleri ifade etmektedir ve kromozom olarak adlandırılmaktadırlar. Popülasyon, çok sayıda kromozomun bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Nesil ise, kromozomların her bir iterasyonda tıpkı doğal seleksiyonda olduğu gibi evrime uğrayarak farklılaşmasıyla oluşmaktadır. Oluşturulan her yeni nesilde, popülasyondaki tüm kromozomlar bir performans göstergesine göre değerlendirilmektedir. Bu performans göstergesi uygunluk fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Yeni nesil oluşturulurken, önceki nesilde bulunan aday çözümlerden bazıları seçilmektedir. Seçme işlemi, uygunluk fonksiyonu değerine göre yapılmaktadır. Uygunluk fonksiyonu değeri yüksek olan çözümlerin sonraki nesile aktarılma olasılığı fazla olmaktadır. Birkaç nesilden sonra, algoritma problemin en iyi veya alt-en iyi (sub optimal) çözümünü gösteren en iyi kromozoma yakınsar ve algoritma durdurulur [38, 43].

3.5.1. İlk-aşama problemin genetik algoritma ile modellenmesi

Bu bölümde Şekil 3.7.'de kısaca özetlenen GA'nın adımları detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Şekil 3.7.'ye göre, problem GA ile modellenirken öncelikle aday çözümleri temsil eden kromozom yapısının oluşturulması gerekmektedir. Stokta tutulan herhangi bir araç model ve rengine ait bir kombinasyon, problem için bir aday çözümdür. Bir sonraki aşamada belirlenmiş olan aday çözümler ÇSBO değerine göre sıralanmakta ve değerlendirilmektedir. ÇSBO uygunluk değerine göre seçilen aday çözümler için sırasıyla çaprazlama ve mutasyon genetik işlemcileri uygulanmaktadır. Genetik işlemcilerin uygulanması sonucunda oluşturulan yeni aday çözümlerin uygunluk değeri hesaplanmakta ve oluşan yeni nesil bu uygunluk fonksiyonu değerine göre değerlendirilmektedir. Eğer durdurma kuralı sağlanmışsa algoritma durdurulur, aksi halde yeni aday çözümler oluşturularak en uygun araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlar aranmaya devam edilir. Bölüm 3.5.1.1.'de kromozomların oluşturulması; Bölüm 3.5.1.2.'de uygunluk fonksiyonu değerinin hesaplanması; Bölüm 3.5.1.3. ve Bölüm 3.5.1.4.'te sırasıyla çaprazlama ve

mutasyon genetik işlemcileri; Bölüm 3.5.1.5.'te ise GA'nın durdurma kuralı problemin yapısına uyarlanarak anlatılmaktadır.

3.5.1.1. Modelin genetik gösterimi ve başlangıç popülasyonunun oluşturulması

Kromozomlar problemin olurlu, aday çözümleridir ve temsil ettiği çözüme ait bilgiler içermektedir. Çalışmada ilk aşama problem olan ara stokta tutulacak araç model-renk kombinasyonlarının ve miktarlarının belirlenmesi için olurlu çözümler ara stokta tutulacak model-renk kombinasyonlarına ait miktarlardan oluşmaktadır. Tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları kromozomda bir dizi şeklinde kodlanmıştır. Problem GA ile modellenirken, firmanın ürettiği 3 farklı araç modeli ve yaygın olarak talep edilen beş renk göz önünde bulundurulmuştur. Üç farklı araç modeli ve beş farklı renk için ara stokta tutulacak 15 adet farklı model-renk kombinasyonu bulunmaktadır. Bu durumda tüm model-renk kombinasyonlarını göstermek için 15 genden oluşan bir kromozoma ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan kromozom uzunluğu lc , ile gösterilmektedir.

Gen, kromozomun en küçük parçası olup bu çalışmada her bir model-renk kombinasyonunu temsil etmektedir. Kromozom oluşturulurken her bir araç model-renk kombinasyonunun yeri (gen) sabit alınmıştır. Kromozom üzerindeki genler “ i ” sıra numaraları ile gösterilmektedir. Şekil 3.8.'e göre soldan sağa doğru ilk beş araç Model 1, sonraki beş araç Model 2, en sondaki beş araç ise Model 3 için ayrılmıştır. Her beş araç da kendi içerisinde yine soldan sağa doğru Renk1'den Renk 5'e kadar sıralanmıştır. Buna göre, soldaki ilk araç Model1-Renk1 özellikli araç kombinasyonunun ikinci araç da Model1-Renk2 özellikli araç kombinasyonunun yerini göstermekte ve sıralama benzer şekilde devam ederek Model3-Renk5 ile sonlanmaktadır.

Bir sonraki aşama, hangi kombinasyonlardan stok tutulması gerektiğinin belirlenmesidir. Bu işlem yapılırken her bir gen için üretilen rastgele sayı r_c 'den büyükse 1; küçükse 0 değeri atanmaktadır. “1” değeri o araç model-renk kombinasyonundan stok tutulacağını; 0 değeri ise stok tutulmayacağını

göstermektedir. Çalışmada, çizelgelenen sırada Model 1, Model 2 ve Model 3 araç kombinasyonlarının yaklaşık oranı 1, 1, 4 şeklinde olduğu için r_c değerleri belirlenirken bu oranlar dikkate alınmıştır. Model 1 ve Model 2 için r_c değeri 0,1; Model 3 için 0,4 olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.8.'e göre AS/RS'de tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları; Model1-Renk1 (M1C1), Model1-Renk5 (M1C5), Model2-Renk1 (M2C1), Model3-Renk1 (M3C1), Model3-Renk2 (M3C2) ve Model3-Renk3 (M3C3) şeklindedir. AS/RS'de tutulan toplam kombinasyon sayısı ks ile gösterilmek üzere, AS/RS'de tutulan toplam stok kombinasyonları sayısı $ks=6$ 'dır.

1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
M1 C1	M1 C2	M1 C3	M1 C4	M1 C5	M2 C1	M2 C2	M2 C3	M2 C4	M2 C5	M3 C1	M3 C2	M3 C3	M3 C4	M3 C5

Şekil 3.8. Stokta tutulacak araç model-renk kombinasyonlarının belirlenmesi

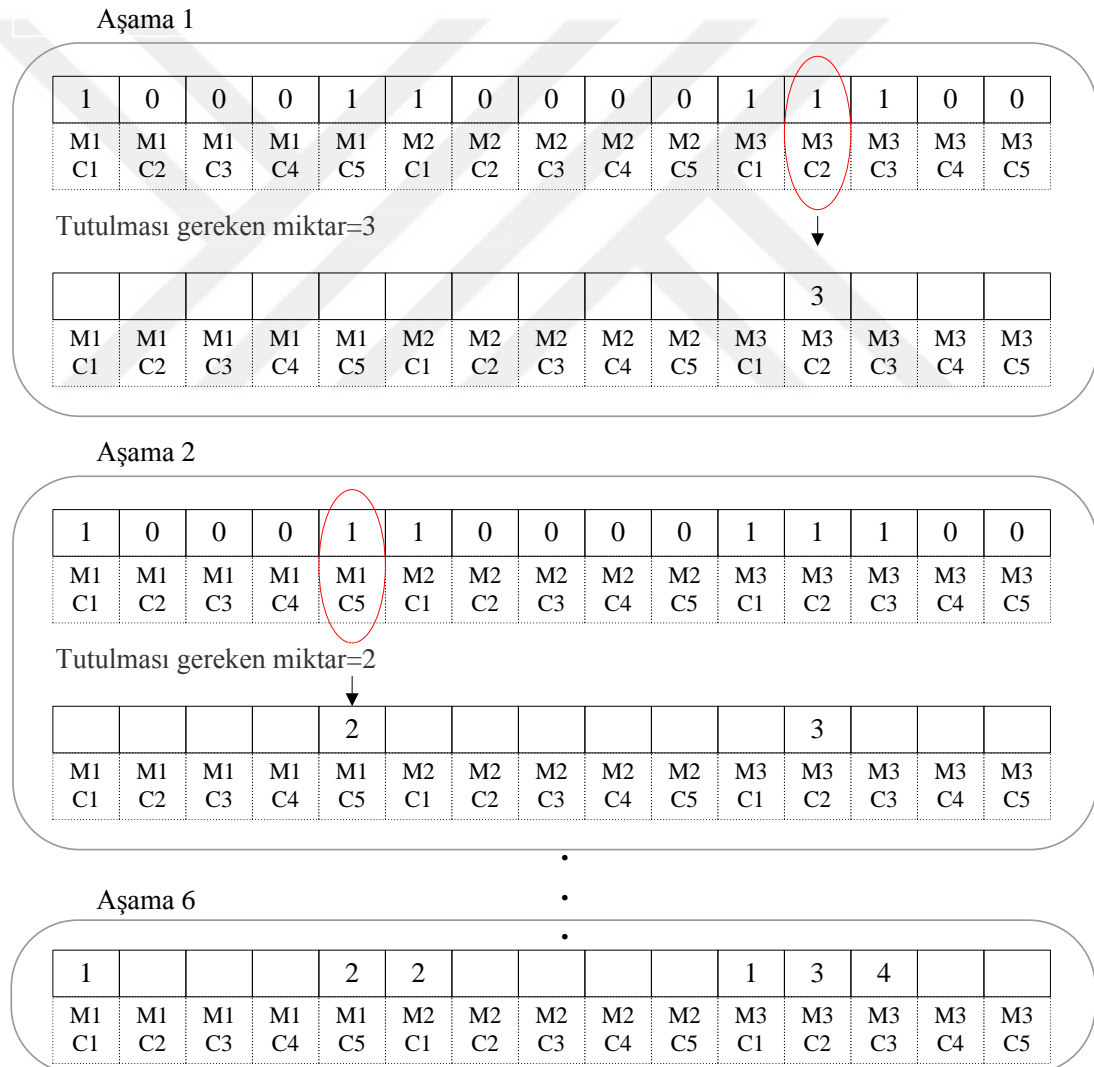
Stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarının belirlenmesinden sonraki aşama, bu kombinasyonlardan kaç adet tutulması gerektiğinin belirlenmesidir. Her bir kombinasyon i ile gösterilmek üzere, bu kombinasyondan tutulması gereken stok miktarı x_i ile ifade edilmektedir. Bu aşamada, öncelikle stok tutulan kombinasyonlardan rastgele bir tanesi seçilir. Seçilen bu kombinasyona AS/RS kapasitesini geçmemek şartıyla rastgele bir miktar atanır. Dikkat edilmesi gereken nokta her bir model-renk kombinasyonuna ait stokta tutulması gereken miktar belirlenirken, bir önceki kombinasyon için stokta tutulan araç sayısının kapasiteden çıkartılmasıdır. Bu işlem toplam stok sayısının AS/RS kapasitesini geçmemesi için yapılmakta olup, Şekil 3.9.'da gösterilmektedir.

Şekil 3.9.'a göre, Şekil 3.8.'de belirlenmiş olan stokta tutulması gereken kombinasyonlar arasından Model3-Renk2 (M3C2) kombinasyonu rastgele seçilmiştir. Sonrasında M3C2 kombinasyonu için stokta tutulması gereken miktar AS/RS kapasitesini geçmeyecek şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi M3C2 kombinasyonundan 3 adet stokta tutulmaktadır. Daha sonra stokta tutulması

gereken bir başka model-renk kombinasyonu M1C5 olarak rastgele belirlenmiştir.

Bu kombinasyon için stokta tutulması gereken miktar $BC - \sum_{i=1}^{lc} x_i$ şartına uygun

olarak belirlenmiştir. Bu işlem stok tutulacak tüm kombinasyonlar için tekrarlanmaktadır. Şekil 3.9.'un sonunda her bir kombinasyon için tutulması gereken miktarlar belirlenmiştir. Buna göre M1C1 kombinasyonundan 1 adet, M1C5 kombinasyonundan 2 adet, M2C1 kombinasyonundan 2 adet, M3C1 kombinasyonundan 1 adet, M3C2 kombinasyonundan 3 adet ve M3C3 kombinasyonundan 4 adet araç AS/RS'de tutulmalıdır.



Şekil 3.9. Melez modelde aday çözümlerin oluşturulması

3.5.1.2. Uygunluk fonksiyonunun hesaplanması ve çözümlerin değerlendirilmesi

Kromozomlar oluşturulduktan sonra, ikinci aşama problem olan yeniden sıralama problemi çözülmektedir. Yeniden sıralama, Denklem 3.4 - 3.17'nin çözümü ile gerçekleşmektedir. İkinci aşamada, GA ile AS/RS'de belirlenmiş olan stoklar altında araçların ÇSBO değerini enbüyükleyecek şekilde nasıl sıralanması gerektiği belirlenmektedir. GA ile belirlenmiş olan AS/RS'de tutulması gereken stok miktarları, ÇSBO değerine göre değerlendirilmektedir.

Bir sonraki aşama uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilen kromozomların sonraki nesili oluşturmak üzere seçilmesidir. Kromozomlar hem elitizm hem de rulet çemberi yöntemi ile seçilmektedir. Elitizm en yüksek uygunluk fonksiyonu değerine sahip kromozomların sonraki nesle herhangi bir genetik işleme sokulmadan, direkt olarak aktarılmasıdır. Böylelikle en iyi kromozomların yok olmadan sonraki nesle aktarımı sağlanmaktadır. Sonraki nesilin oluşturulmasında kullanılan bir diğer yöntem rulet çemberi, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, kromozomların seçilme olasılıkları uygunluk fonksiyonu değerine göre belirlenmektedir. Bu olasılıklar belirlenirken i kromozomu göstermek üzere, öncelikle her bir kromozoma ait uygunluk fonksiyonları $\text{ÇSBO}(i)$, toplanarak popülasyonun toplam uygunluk fonksiyonu $\sum_i \text{ÇSBO}(i)$ belirlenmektedir.

Sonrasında her bir kromozoma ait uygunluk fonksiyonu değerine oranlanarak $\text{ÇSBO}(i) / \sum_i \text{ÇSBO}(i)$ kromozomum sonraki nesile aktarılma olasılığı bulunmaktadır. Uygunluk fonksiyonu yüksek olan kromozomların sonraki nesile aktarılma olasılıkları yüksek, uygunluk fonksiyonu düşük olan kromozomların ise düşüktür [44].

3.5.1.3. Çaprazlama

Çaprazlama iki kromozom arasında, daha iyi bir çözüm elde edilmek için, bilgi alış verişi yapılmasıdır. Burada amaç iyi çözümlerin bir araya getirilmesi ile daha iyi çözümlerin elde edilmesidir.

Araç sıralama problemi ile ilgili yapılan GA çalışmaları incelendiğinde, Zinflou ve arkadaşlarının [45] farklı çaprazlama teknikleri sundukları görülmüştür. Çalışmalarında bu çaprazlama tekniklerini karşılaştırmış, en iyi çözümün tekdüze (uniform) çaprazlamadan esinlenerek oluşturdukları tek düze ceza çaprazlama (uniform interest crossover) ile elde edildiğini göstermişlerdir. Çaprazlama tekniği, Warwick ve Tsang'ın [46] da bahsettiği gibi, en iyi çözümü bulmaya yönelik bir çeşit arama yöntemi olduğu için GA'nın en iyi veya alt-en iyi (sub optimal) çözümü elde etmesinde belirleyici olmaktadır. Çalışmada, Zinflou ve ark. [45] tarafından kullanılan tek düze ceza çaprazlama (uniform interest crossover) tekniği araç sıralama problemine ait kısıtları göz önüne aldığı için kullanılmamış; onun yerine Warwick ve Tsang [47] tarafından kullanılan uyarlanabilir tekdüze çaprazlama (Uniform Adaptive Crossover, UAX) kullanılmıştır. Bu teknikte kromozoma ilave olarak 0-1 ikili dizi yapısı kullanılmaktadır. Bu dizi yapısı oluşacak yeni bireye hangi genlerin aktarılacağını hangisinin aktarılmayacağını gösteren bir şablon oluşturmaktadır. Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla birlikte bu şablonlar da her bir kromozom için rastgele oluşturulmaktadır. Daha sonra çaprazlama işleminde, yeni bireye aktarılacak gen ile birlikte şablondaki değer de kopyalanmaktadır. Bu teknik, tek nokta ve/veya çift nokta çaprazlamada rastgele seçilen çaprazlama noktalarını kullanmayıp onun yerine hangi noktalardan çaprazlama yapılacağını gösteren bir şablon kullanmaktadır. Yüksek uygunluk fonksiyonuna sahip kromozoma ait şablon da sonraki nesle aktarılacağı için, doğru çaprazlanma noktalarının elde edilmesi beklenmektedir. Kullanılan çaprazlama yönteminin adımları aşağıda verilmiştir.

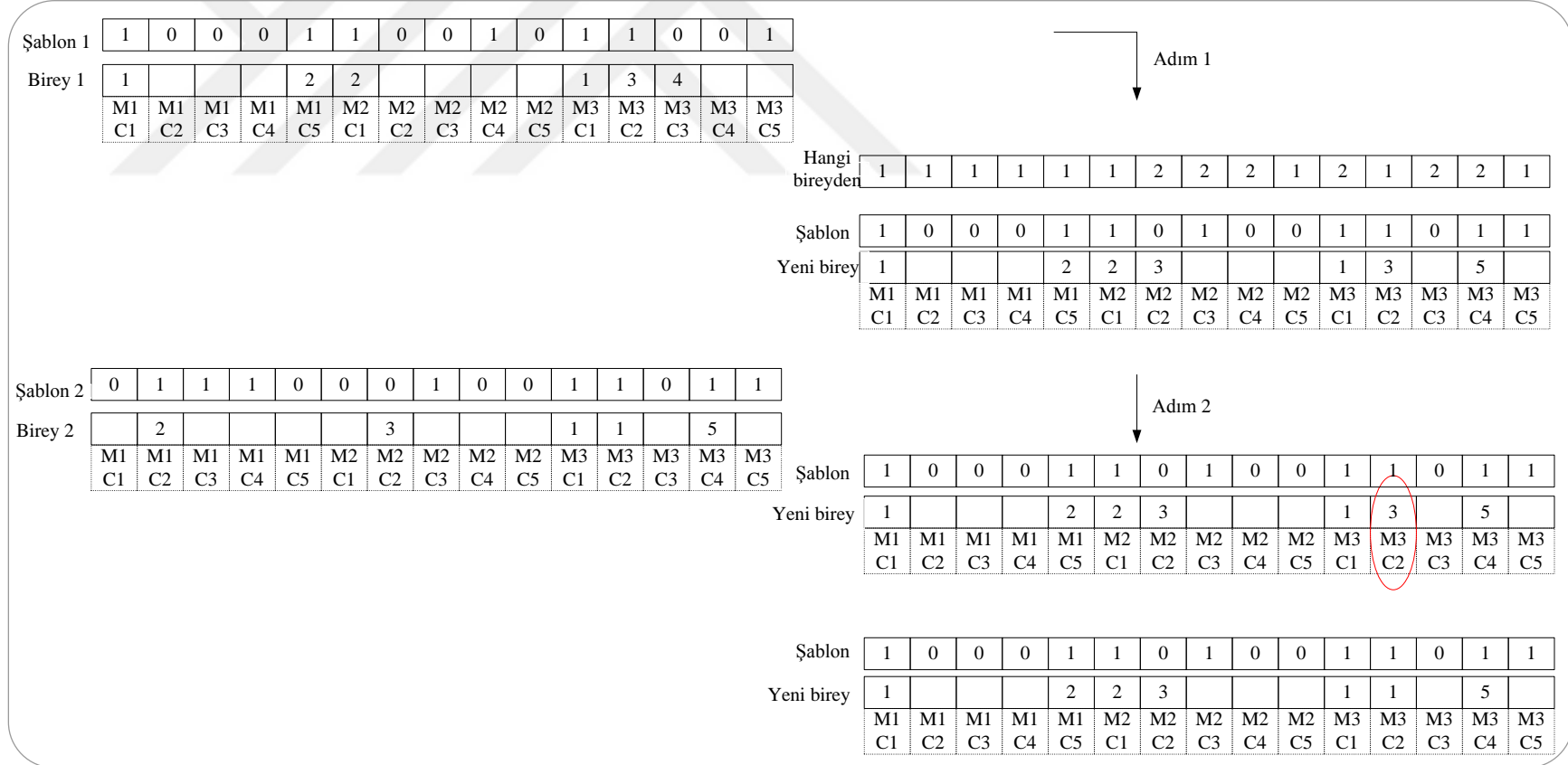
Adım 1: Rulet yöntemi ile seçilen iki birey arasından bir tanesi rastgele seçilir (Birey 1). Birey 1'e ait gen ve şablon değerleri yeni bireye kopyalanmaya başlanır. Bu işlem iki bireyin şablonundaki dizi değerleri aynı oluncaya kadar devam eder. Şablondaki dizi değerleri aynı olduğunda kopyalama işlemi diğer bireyden (Birey 2) devam eder.

Adım 2: Eğer çaprazlama sonucunda oluşan yeni bireyde tutulan stok sayısı kapasiteyi aşıyorsa stok tutulan kombinasyonlardan biri rastgele seçilir ve stok sayısı kapasiteyi aşmayacak şekilde azaltılır. Rastgele seçilen bu kombinasyonun stok

miktardaki azalış ile kapasite kısıtı sağlanamıyorsa aynı işlem kapasite kısıtı sağlanıncaya kadar tekrarlanır.

Çaprazlama işleminin daha kolay anlaşılması için Şekil 3.10.'da açıklayıcı bir örnek verilmiştir. Şekil 3.10.'da çaprazlama işlemine soldan sağa doğru, "M1C1" kombinasyonundan başlanmaktadır. Çaprazlanacak bireylere ait şablonlara göre hangi genin hangi bireyden alınacağına şu şekilde karar verilmektedir. Öncelikle ilk genin kopyalanması için rastgele bir birey seçilir (Birey 1). Şekil 3.10.'da bulunan "Hangi bireyden" kısmında hangi genin Birey 1'den hangisinin Birey 2'den alınacağı gösterilmektedir. Burada ilk gen için rastgele seçilmiş olan Birey 1 için "1" yazılır. Birey 1'den kopyalama işlemine iki bireyin şablonundaki değerler aynı oluncaya kadar devam edilir. İki bireyin şablonundaki değerler "M2C2" kombinasyonu için aynı olduğundan kopyalama işlemine Birey 2'den devam edilir. Benzer şekilde "M2C5", "M3C1", "M3C2", "M3C3" ve "M3C5" kombinasyonlarında da geçişler olmaktadır. Adım 1'in sonunda "M1C1" kombinasyonundan 1 tane, "M1C5" kombinasyonundan 2 tane, "M2C1" kombinasyonundan 2 tane, "M2C2" kombinasyonundan 3 tane, "M3C1" kombinasyonundan 1 tane, "M3C2" kombinasyonundan 3 tane ve son olarak "M3C4" kombinasyonundan 5 tane stok tutulmaktadır. Toplam tutulan stok sayısı 17, kapasite kısıtı olan 15'i geçtiği için adım 2 uygulanmaktadır. Buna göre stok tutulan kombinasyonlar arasından rastgele seçilen "M3C2" ye ait stok miktarı 1'e düşürülerek kapasite kısıtı sağlanmış olunur. Elde edilen yeni bireyde "M1C1", "M1C5", "M2C1", "M2C2", "M3C1", "M3C2" ve "M3C4" kombinasyonlarından sırasıyla 1, 2, 2, 3, 1, 1, 5 adet stok tutulmaktadır. Çaprazlama işleminde ilgili gen hangi bireyden kopyalanıyorsa, şablon da o bireyden kopyalanmaktadır.

Çaprazlanacak bireylerin seçimi şu şekilde yapılmaktadır. Uygunluk fonksiyonu, belirlenmiş eşik değerin üstündeki kromozomlar arasından rastgele bir çift seçilmektedir. Seçilen her çift kromozom için rastgele üretilen sayı çaprazlama olasılığı pc 'den, düşük ise çaprazlama gerçekleşecek aksi halde çaprazlama gerçekleşmeyecektir. Çalışmada, çaprazlama olasılığı Zinflou ve arkadaşlarının [45, 48] kabul ettiği gibi 0,8 olarak alınmıştır.



Şekil 3.10. Melez modele ait çaprazlama örneği

3.5.1.4. Mutasyon

Mutasyon GA'nın yerel en iyiye (local optimum) takılmasını engellemek amacıyla kromozom üzerinde yapılan küçük değişikliklerdir [49]. Çalışmada mutasyon ile yapılacak değişiklik, çizelgelenmiş sırada daha yüksek oranda bulunan araç model-renk kombinasyonundan tutulacak stok miktarını artırılması olarak belirlenmiştir. Buna göre mutasyon işlemi, çizelgelenmiş sırada yüksek oranda bulunan M3C3 sayısının kapasite kontrolü dahilinde 1 adet artırılması olarak belirlenmiştir. Eğer bu artış AS/RS kapasite kısıtını aşıyorsa, o zaman farklı bir kombinasyon için tutulan stok sayısı 1 azaltılmalı sonrasında M3C3'ün miktarı 1 arttırılmaktadır. Stok miktarındaki artış miktarı keyfi olarak "1" belirlenmiştir. Mutasyon işlemine ait bir örnek Şekil 3.11.'de sunulmuştur.

Şablon	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
	1				2	2	3				1	1		5	
	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2	M2	M2	M3	M3	M3	M3	M3
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5

↓ Mutasyon

Şablon	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
	1				2	1	3				1	1	1	5	
	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2	M2	M2	M3	M3	M3	M3	M3
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5

Şekil 3.11. Melez modele ait mutasyon örneği

Şekil 3.11.'de mutasyona uğrayacak kromozom için "Model 3" kombinasyonlarından rastgele "M3C3" kombinasyonu seçilmiş ve tutulan stok miktarı "1" artırılmıştır. AS/RS kapasitesinin 15 araç olduğu durumda, "M3C3" kombinasyonundaki artış kapasite kısıtını sağlamamaktadır. Bu durumda diğer model kombinasyonlarından (Model 1 ve "Model 2'nin farklı renk kombinasyonlarından) rastgele "M2C1" seçilmiş ve tutulan stok sayısı 1 azaltılmıştır. Mutasyon işlemi sonucunda oluşan yeni bireyde "M1C1", "M1C5", "M2C1", "M2C2", "M3C1",

“M3C2”, “M3C3” ve “M3C4” kombinasyonlarından sırasıyla 1, 2, 1, 3, 1, 1, 1, 5 adet stok tutulmaktadır.

Çalışmada Zinflou ve arkadaşlarının [45-48] kabul ettiği gibi mutasyon oranı pm , çaprazlama olasılığına göre çok düşük olacak şekilde 0,09 alınmıştır. Rastgele seçilen bir gen için üretilen rastgele sayı mutasyon olasılığından düşük ise mutasyon gerçekleşmektedir. Aksi halde mutasyon işlemi yapılmaz.

3.5.1.5. Durdurma kuralı

Küçük problemler için durdurma kuralı iki-aşamalı matematiksel modelin karma tamsayılı programlama ile çözümünden elde edilen ÇSBO değeri olarak belirlenmiştir. GA ile elde edilen ÇSBO, matematiksel model ile aynı ise algoritma durdurulmaktadır. Aksi halde GA, 300 iterasyon çalışmaya devam eder ve bulunduğu en iyi sonucu verir. Büyük problemler için, GA'nın durdurma kuralı 300 iterasyon olarak belirlenmiştir. Program 300 iterasyon çalıştıktan sonra bulunduğu en iyi çözümü sunmaktadır.

İlk aşama kararı olan ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesi problemi GA ile belirlendikten sonra, ikinci aşama problem olan araç montaj giriş sıralarının belirlenmesi problemi çözülmüştür. İkinci aşama problem olan GA ile elde edilen stok miktarları altında en uygun montaj sıralarının belirlenmesi problemi karma tamsayılı programlama modelin (Denklem 3.6 - 3.21) çözümünden elde edilmektedir.

3.5.2. Melez modelin performansını değerlendirmek amacıyla yapılan sayısal çalışmalar

Bu bölümde iki-aşamalı stokastik modelin, karma tamsayılı programlama ve melez model ile çözümü karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma koşum süresi ve ÇSBO gösterge değerine göre yapılmaktadır. Problem GAMS (versiyon 18.08.2010) yazılımının CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Tüm deneyler Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.67 GHz CPU, 2 GB hafıza özellikli bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Tablo 3.8.'deki sayısal çalışmalarda hata oranı %20; BGO seviyesi %50; AS/RS kapasitesi ise yeniden sıralanacak araç uzunluğunun %10'u olarak belirlenmiştir. Popülasyon sayısı $sp = 100$, iterasyon sayısı $ni = 300$, kromozom uzunluğu $lc = 15$, elitizm oranı $ne = 0,1 \times np$, çaprazlama olasılığı $pc = 0,8$, mutasyon olasılığı $pm = 0,09$ olarak alınmıştır. Tablo 3.8.'e göre karma tamsayı programlama ve melez model ÇSBO değerleri açısından karşılaştırıldığında, iki çözüm arasında %95 güven düzeyinde istatistiksel bir fark bulunmamaktadır. Çözüm süreleri karşılaştırıldığında ise melez modelin çözüm süresinin karma tamsayı programlamaya göre çok düşük olduğu görülmektedir. Aynı ÇSBO değerlerini karma tamsayı programlamaya göre çok düşük sürelerde elde ettiği için problemin çözümünde melez model kullanılabilir.

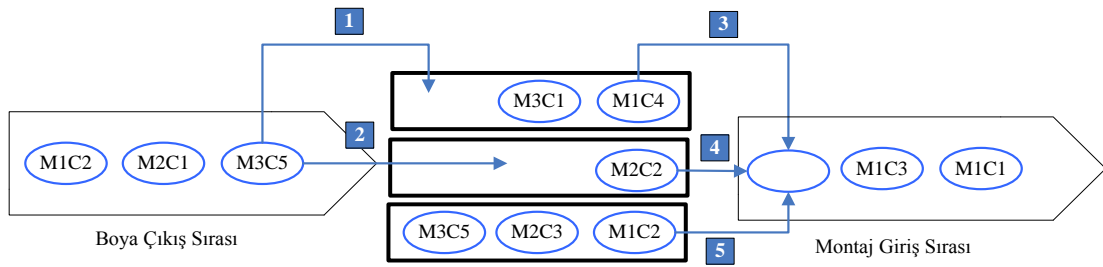
Tablo 3.8. Karma tamsayı programlama ve melez modelin koşum süreleri ve ÇSBO açısından karşılaştırılması

Blok uzunluğu	Karma tamsayı programlama			Melez model		
	Ort. ÇSBO	%95 Güven aralığı	Koşum süresi (dk)	Ort. ÇSBO	%95 Güven aralığı	Koşum süresi (dk)
50	60,80	59,37-62,23	2,73	59,80	58,56-61,04	1,02
100	70,00	68,64-71,36	8,98	68,72	67,32-70,12	2,09
150	70,93	69,52-72,34	20,08	71,36	70,25-72,47	4,80
200	72,60	71,20-74,00	42,84	71,83	70,52-73,14	7,90
250	74,08	72,56-75,60	50,27	73,87	72,48-75,26	11,57
300	73,60	72,15-75,05	86,66	73,00	71,71-74,29	23,32
350	75,48	74,21-76,75	99,04	75,69	74,62-76,76	26,70
400	75,40	74,48-76,32	105,88	75,23	74,27-76,19	30,12
450	75,86	75,08-76,64	111,30	75,92	74,85-76,99	32,20
500	-	-	-	75,89	75,01-76,77	36,43
550	-	-	-	76,02	75,21-76,83	39,56
600	-	-	-	76,12	75,34-76,9	43,86

BÖLÜM 4. PROBLEMİN YENİDEN SIRALAMA HATTI İÇİN MODELLENMESİ

Uygulamada yaygın olarak kullanılan bir diğer ara stok türü yeniden sıralama hattıdır. Yeniden sıralama hatları (mix-bank, selectivity bank, paralel lanes) birbirine paralel hatlardan oluşmaktadır. Her bir hattın belirli bir sayıda araç depolama kapasitesi bulunmaktadır. Hatların kapasiteleri genelde birbirine eşit olmakla birlikte, birbirinden farklı da olabilir. Yeniden sıralama hattında bulunan her bir hat bir kuyruk gibi çalıştığı için boya çıkış sırasından çıkan araç, boş stok depolama alanı bulunan hattın en sonuna alınır. Herhangi bir hatta bulunan en öndeki araç montaj hattına beslendikten sonra arkasındaki araçlar hatta beslenebilir [23].

Yeniden sıralama hatlarında karşılaşılan iki farklı problem bulunmaktadır. Bunlardan ilki doldurma problemidir. Doldurma problemi, boya çıkış sırasındaki araçların yeniden sıralama hatlarında atanacağı hattın belirlenmesi problemidir [23]. Karşılaşılan ikinci problem ise boşaltma problemidir. Boşaltma problemi, araçların hangi sıra ile montaj giriş sırasına konulacağına karar verilmesi problemidir [23]. Yeniden sıralama hatları, AS/RS ara stok'tan farklı olarak FIFO (İlk giren ilk çıkar) öncelik kuralına göre çalıştığı için, araçların hangi hatta ve sıraya atanacağı kararı, gerektiğinde o aracı montaj giriş sırasına besleyebilmek için çok önemlidir. Aksi halde yeniden sıralama hattında bulunan bir araç, önünde bulunan diğer araçlar montaja beslenmesine engel olduğu için, montaj giriş sırasında istenilen sıraya atanamamaktadır. ÇSBO'yu artırma amacıyla yapılan yeniden sıralama esnekliği yeniden sıralama hattının nasıl doldurulacağına ve boşaltılacağına bağlıdır. Şekil 4.1.'de yeniden sıralama hattında yaşanan doldurma ve boşaltma problemleri anlatılmaktadır.



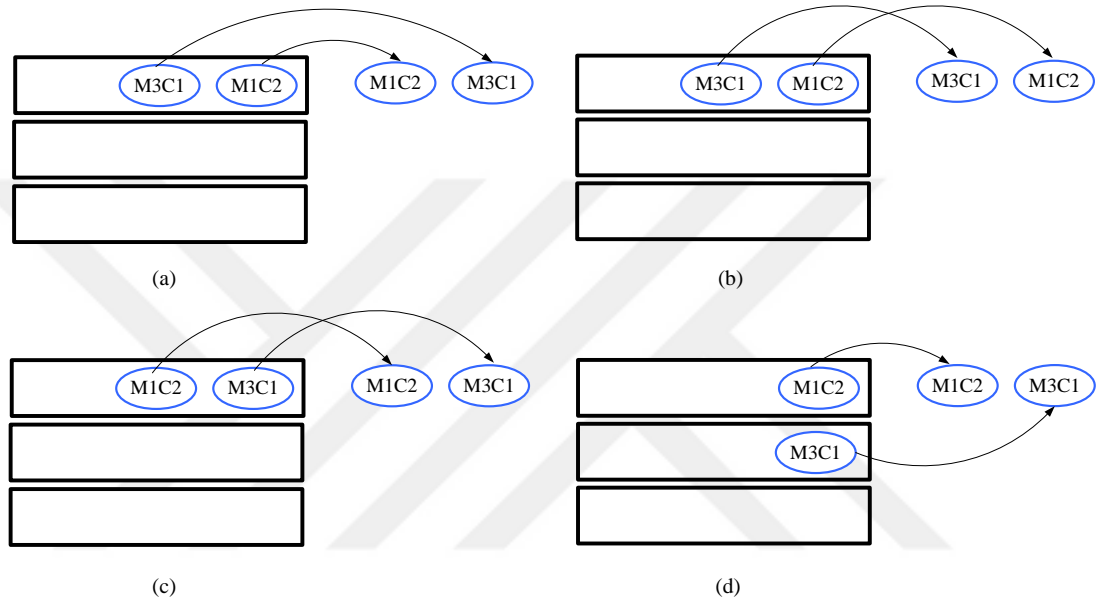
Şekil 4.1. Yeniden sıralama hattı için doldurulma ve boşaltma kuralları

Şekil 4.1.'e göre, boya çıkış sırasında en önde bulunan araç M3C5'in yeniden sıralama hattında alınabileceği iki farklı boş stok depolama alanı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, 1 numaralı okla gösterilen yeniden sıralama hattında birinci hattın en son sırasıdır. İkincisi ise, 2 numaralı okla gösterilen ikinci hattın ikinci sırasıdır.

Şekil 4.1.'de ayrıca yeniden sıralama hattının nasıl boşaltılacağı da gösterilmektedir. Montaj giriş sırasına beslenecek araç sadece 3, 4 veya 5 numaralı oklarla gösterilen araçlardan biri olabilir. Buna göre montaja 3 numaralı okla gösterilen M1C4; 4 numaralı okla gösterilen M2C2 veya 5 numaralı okla gösterilen M1C2 beslenebilir. Bu araçlardan herhangi biri montaj hattına alınmadan arkasındaki araç montaja beslenemez.

Yeniden sıralama hatları kullanılarak araç pozisyonlarında yapılan değişikliği incelemek için Şekil 4.2.'de dört farklı senaryo ele alınmıştır. Şekil 4.2(a).’da aynı hatta bulunan ikinci araç M3C1’in birinci sırada bulunan araç M1C2’den önce geldiği görülmektedir. Yeniden sıralama hatları FIFO öncelik kuralına göre çalıştığı için Şekil 4.2(a).’da belirtilen bu senaryoya göre atama yapılması mümkün değildir. Araçların yeniden sıralama hattındaki konumları aynı kalmak üzere, ilk araç atanmadan arkasındaki atanamaz. FIFO öncelik kuralına göre yapılması gereken atama Şekil 4.2(b).’de gösterilmektedir. Şekil 4.2(b).’ye göre önce araç M1C2, sonra araç M3C1 montaja beslenecektir. Eğer öncelikle araç M3C1’in, sonrasında araç M1C2’nin montaja beslenmesi isteniliyorsa; bu atama iki farklı şekilde gerçekleşebilir. Bu senaryolar Şekil 4.2(c). ve Şekil 4.2(d).’de gösterilmektedir. Şekil 4.2(c).’de gösterilen ilk senaryoya göre, iki araç aynı hatta bulunuyorsa M3C1’in yeniden sıralama hattında bulunduğu sıra, M1C2’den önce olmalıdır. Alternatif

ikinci senaryo ise iki aracın farklı hatlara atanması ile mümkün olmaktadır. Şekil 4.2(d).’ye göre, araç M1C2 ve araç M3C1 farklı hatlara atandıkları için araç M3C1, araç M1C2’den önce montaja beslenebilir. Şekil 4.2.’de bulunan dört senaryo incelendiğinde, yeniden sıralama hatlarında yaşanan yerleştirme ve doldurma problemlerinin araçların montaj giriş sırasının belirlenmesindeki etkisi anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. Yeniden sıralama hatları kullanıldığında araç montaj giriş sıralarının belirlenmesi

4.1. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modeli

Geliştirilen iki-aşamalı stokastik modelde, ilk aşama kararı yeniden sıralama hattında tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ayrıca bu araçların yeniden sıralama hattına nasıl yerleştirileceğine karar vermektir. Birinci aşama karar değişkenimiz x_{lnjk} ile gösterilmektedir. İlk aşama karar değişkeni model j , renk k aracın yeniden sıralama hattında hangi hatta ve sırada olduğunu gösteren 0-1 ikili değişkendir.

Yeniden sıralama hattında tutulması gereken optimal araç sayısı ise

$$\sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{Cl} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{lnjk}$$

ile gösterilmektedir. İlk aşama karar değişkenine karar verildikten

sonra, rastgele değişken olan hataların oluştukları pozisyonları gösteren ξ vektörü gözlenmektedir. Rastgele değişken vektörü yeniden sıralanacak araç sayısı uzunluğunda olup, 1-0 değerleri ile araçların sağlam ya da hatalı olduklarını göstermektedir. İkinci aşama kararı, hatalı araçlar gözlendikten sonra ÇSBO değerini enbüyükleyecek şekilde araçların montaj giriş sırasını belirlemektir.

Yeniden sıralama hattı için kurulan modele geçmeden önce, modelde kullanılan parametreler, indisler, karar değişkenleri ve karar ifadeleri aşağıda açıklanmıştır.

Parametreler

S: Yeniden sıralanacak araç blok uzunluğu

BC: Arastok kapasitesi

M: Üretilecek model sayısı

C: Boyanacak renk sayısı

NI: Yeniden sıralama hattında bulunan hat sayısı

Cl: Her bir hattın kapasitesi

$$d_{ijk}(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{boya çıkış sırasında } i. \text{ pozisyonda bulunan araç hatalı ise} \\ 1, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

H_j: *S_j* uzunluğundaki bir blokta en fazla sayıda bulunabilecek model *j* sayısı

$$SC_{jkh}(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{çizelgelenmiş sırada } h. \text{ pozisyona atanan araç model } j \text{ renk } k \text{ ise} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

BM: Çok büyük bir sayı

ε : Çok küçük bir sayı

İndisler

i: Boya giriş sırasındaki araçların pozisyonu $i = 1, \dots, S$

h : Montaj giriş sırasındaki araçların pozisyonu $h = 1, \dots, S$

j : Araç model numarası $j = 1, \dots, M$

k : Araç renk numarası $k = 1, \dots, C$

l : Yeniden sıralama hattındaki hat numarası $l = 1, \dots, Nl$

n : Araçların yeniden sıralama hattındaki sırası $n = 1, \dots, Cl$

Karar değişkenleri

$$x_{lnjk} = \begin{cases} 1, \text{yeniden sıralama öncesinde } l. \text{ hatta } n. \text{ sırada model } j \text{ renk } k \text{ özellikli} \\ \text{araç bulunuyor ise} \\ 0, \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$w_{ijkln}(\xi) = \begin{cases} 1, \text{boya çıkış sırasında } i. \text{ pozisyonda bulunan model } j \text{ renk } k \text{ araç} \\ \text{l. hatta } n. \text{ sıraya atanmışsa} \\ 0, \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$z_{lnjk h}(\xi) = \begin{cases} 1, \text{l. hat } n. \text{ sırada bulunan model } j \text{ renk } k \text{ araç montaj giriş sırasında } h. \\ \text{pozisyona atanmış ise} \\ 0, \text{aksi halde} \end{cases}$$

Karar İfadeleri

$$\Delta_{jk h}(\xi) = \begin{cases} -1, \text{h. pozisyon için sahte model, renk farklılığı oluşmuş ise} \\ 0, \text{h. pozisyon için çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası aynı ise} \\ 1, \text{h. pozisyon için çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası farklı ise} \end{cases}$$

$$\gamma_{jk h}(\xi) = \begin{cases} 1, \text{çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası arasında model veya renk} \\ \text{farklılığı varsa} \\ 0, \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$SS_{lnjk}(\xi) = \begin{cases} 1, \text{l. hatta } n. \text{ sırada model } j \text{ renk } k \text{ özellikli araç bulunuyorsa} \\ 0, \text{aksi halde} \end{cases}$$

İlk aşama kararı, verili yeniden sıralama hattı kapasitesi altında BC , tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına, miktarlarına ve bu araçların yeniden sıralama hattında hangi hatta ve sırada bulunacağına karar vermektir. Diğer bir deyişle ilk aşamada hangi araçtan ne kadar stok tutulmalı ve bu araçlar yeniden sıralama hattına nasıl yerleştirilmeli sorusuna cevap aranmaktadır. İlk aşama karar değişkeni olan x_{lnjk} 'ya karar verildikten sonra, boyahane de oluşan hatalar ξ , gözlenir. Hataların oluştuğu pozisyonları gösteren ξ vektörü, S uzunluğundadır ve aldığı 1-0 değerleri ile araçların sağlam ya da hatalı olup olmadıklarını gösterir.

Örneğin $\xi(\omega) = (1, 0, 1, 1)$ vektörü dört araç içerisinde üçüncü sırada bulunan aracın hatalı; birinci, ikinci ve dördüncü sırada bulunan araçların sağlam olduklarını göstermektedir. Yeniden sıralanacak bloktaki tüm araçlar için $\xi(\omega)$ vektörü gözlemlendikten sonra, ikinci aşamada iki farklı problemle karşılaşmaktadır. Bu problemlerden ilki araçların yeniden sıralama hattına yerleştirilmesi (doldurma), ikincisi ise araçların yeniden sıralama hattından montaja beslenmesi (boşaltma) problemidir.

Çalışmada yeniden sıralama hattının stok tutulan araçlar ve yeniden sıralanacak araçların hepsini alacak büyüklükte olduğu varsayılmaktadır. Bu kısıt şu şekilde

$$\text{ifade edilmiştir: } S + \sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{CI} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{lnjk} \leq BC$$

Modelde ÇSBO enbüyükleme amaçlanmış, ilk aşama kararına bağlı elde bulundurma maliyeti, ara stok yatırım maliyeti gibi maliyetler göz önüne alınmamıştır. Bu durumda ilk aşama problem, aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\max_x f(x) = E[Q(x, \xi)] \quad (4.1)$$

$$\sum_{l=1}^{CI} \sum_{n=1}^{BI} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{lnjk} \leq BC \quad (4.2)$$

Rastgele değişken ξ , gözlemlendikten sonra oluşan ikinci aşama problem aşağıda gösterilmektedir. İkinci aşama probleminin amaç fonksiyonu $Q(x, \xi)$ ile gösterilmektedir. İkinci aşama problem ve kısıtları Denklem 4.3-4.24 arasında bulunmaktadır.

$$\max Q(x, \xi) = 1 - \frac{1}{S} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S \gamma_{jkh}(\xi) \quad (4.3)$$

$$\Delta_{jkh}(\xi) = sc_{jkh} - \sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{CI} z_{lnjkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (4.4)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \leq 1 + \Delta_{jkh}(\xi) + BM(\Delta_{jkh}(\xi) + 1) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (4.5)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \geq \Delta_{jkh}(\xi) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (4.6)$$

$$\gamma_{jkh}(\xi) \leq 1 + \Delta_{jkh}(\xi) - \varepsilon(\Delta_{jkh}(\xi) + 1) \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (4.7)$$

$$d_{ijk}(\xi) = \sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{Cl} w_{ijkln}(\xi) \quad \forall i = 1, \dots, S; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (4.8)$$

$$SS_{lnjk}(\xi) = \sum_{i=1}^S w_{ijkln}(\xi) + x_{lnjk} \quad \forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (4.9)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C SS_{lnjk}(\xi) \leq 1 \quad \forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijkln}(\xi) \cdot i - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijklg}(\xi) \cdot i \leq BM \left[2 - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijkln}(\xi) - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijklg}(\xi) \right] \quad (4.11)$$

$$\forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl - 1; g = n + 1, \dots, Cl$$

$$\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijkln}(\xi) \geq \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C w_{ijklg}(\xi) \quad \forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl - 1; g = n + 1, \dots, Cl \quad (4.12)$$

$$SS_{lnjk} \geq \sum_{h=1}^S z_{lnjkh} \quad \forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl; j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C \quad (4.13)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lnjkh}(\xi) \cdot h - \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lgjkh}(\xi) \cdot h \leq BM \left[2 - \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lnjkh}(\xi) - \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lgjkh}(\xi) \right] \quad (4.14)$$

$$\forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl - 1; g = n + 1, \dots, Cl$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lnjkh}(\xi) \geq \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^S z_{lgjkh}(\xi) \quad \forall l = 1, \dots, NI; n = 1, \dots, Cl - 1; g = n + 1, \dots, Cl \quad (4.15)$$

$$\sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{Cl} \sum_{k=1}^C \sum_{h=h}^{\min\{h+S_j-1, S\}} z_{lnjkh}(\xi) - \left[1 - \sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{Cl} \sum_{k=1}^C z_{lnjkh}(\xi) \right] BM \leq H_j \quad (4.16)$$

$$\forall j = 1, \dots, M; h = 1, \dots, S$$

$$\sum_{n=1}^{Cl} \sum_{l=1}^{NI} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C z_{lnjkh}(\xi) \leq 1 \quad \forall h = 1, \dots, S \quad (4.17)$$

$$\sum_{n=1}^{Cl} \sum_{l=1}^{NI} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C x_{lnjk} \leq BC - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^C \sum_{l=1}^{NI} \sum_{n=1}^{Cl} w_{ijkln} \quad (4.18)$$

$$\Delta_{jkh}(\xi) \in \mathbb{Z} \quad \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_{jkh}(\xi), w_{ijkn}(\xi), x_{lnjk}, z_{lnjkh}(\xi), SS_{lnjk}(\xi) \in \{0,1\} \\ & \forall j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, C; h = 1, \dots, S; i = 1, \dots, S; l = 1, \dots, Nl; n = 1, \dots, Cl \end{aligned} \quad (4.20)$$

Denklem 4.3'te ifade edilen amaç fonksiyonu, ÇSBO değerini enbüyüklemektir. Denklem 4.4 ile ifade edilen kısıt, araçların montaja çizelgelenmiş sırada girip girmediği kontrol etmektir. Denklem 4.4'te bulunan Δ_{jkh} değişkeni -1, 0 ve 1 değerlerini almaktadır. Araçların montaj giriş sırası ve çizelgelenmiş sıradaki pozisyonları model ve renk durumlarına göre 0-1 ikili değişken ile gösterilmektedir. Araçlarda oluşan model ve/veya renk değişikliği hesaplanırken, yeniden sıralanacak bloktaki tüm araçlar için çizelgelenmiş sıra ile montaj giriş sırası karşılaştırılmaktadır. Eğer montaj giriş sırasında h 'nci pozisyonda bulunan araç çizelgelenmiş sırada bulunması gereken model ve renkte ise Δ_{jkh} değişkeni 0 değerini almaktadır. Montaj giriş sırasında h 'nci pozisyonda bulunan araç çizelgelenmiş sırada bulunması gereken araçtan model ve/veya renk olarak farklı ise, Δ_{jkh} değişkeni 1 değerini almaktadır. Δ_{jkh} değişkeninin -1 değerini aldığı durum çizelgelenmiş sırada bakılan model ve/veya renkte olmayan bir aracın montaj giriş sırasında olduğu durumda oluşmaktadır. Bu durum sahte model ve/veya renk değişikliği olarak adlandırılmaktadır. Toplam model ve/veya renk değişikliğinin hesaplanmasında -1 değeri çizelgelenmiş sıradan sapmaların hesaplanmasında yanlışlığa sebep olduğu için, γ_{jkh} değişkeni tanımlanmıştır. Bu değişken, Δ_{jkh} değişkeninin 1 değerini aldığı durumda 1, Δ_{jkh} değişkeninin -1 ve 0 aldığı durumda ise 0 değerini alarak model ve/veya renk farklılıklarının doğru hesaplanmasını sağlamaktadır. Denklem 4.5- 4.7 ile ifade edilen kısıtlar, sahte model ve/veya renk farklılıklarının ortadan kaldırılmasını ve bu değerlerin doğru hesaplanmasını sağlamaktadır.

Denklem 4.8'deki kısıt, hatalı araçların yeniden sıralama hattına alınmamasını sağlamaktadır. Denklem 4.9, yeniden sıralama hattında l . hatta n . sırada model j renk k özellikli aracın olup olmadığını göstermektedir. Denklem 4.10 ile ifade edilen kısıt, yeniden sıralama hattında l . hatta n . sıraya en fazla bir tane aracın atanabileceğini göstermektedir. Denklem 4.11'deki kısıt, yeniden sıralama hattında aynı hatta atanan

iki araç arasından önde bulunan aracın boya çıkış sırasında da önde bulunması gerektiğini ifade etmektedir. Denklem 4.12'deki kısıt, yeniden sıralama hattına yerleştirilen araçlar arasında boşluk olmasını önlemektedir.

Denklem 4.13 ile ifade edilen kısıt, montaj giriş sırasına atanan model j , renk k araç sayısının yeniden sıralama hattında tutulan aynı model-renk araç sayısından

$\sum_{l=1}^{Nl} \sum_{n=1}^{Bl} SS_{lnjk}$, fazla olamayacağını göstermektedir. Denklem 4.14'deki kısıt, yeniden

sıralama hattında aynı hatta bulunan iki araçtan önce gelen aracın montaj giriş sırasında da önce olması gerektiğini ifade etmektedir. Denklem 4.15 ile ifade edilen kısıt, yeniden sıralama hattında aynı hat üzerinde bulunan iki araçtan öndeki araç montaja beslenmeden arkasındakinin beslenemeyeceğini ifade etmektedir. Denklem 4.16'deki kısıt, üretilen tüm model tipleri için, montaj kısıtlarının $(H_j : S_j)$ sağlanmasını, herhangi bir sapmanın olmamasını sağlamaktadır. AS/RS modelde olduğu gibi bu kısıtın yazılmasında da Fliedner ve Boysen'in [29] opsiyon kısıtlarından sapmada önerdiği kısıt kullanılmıştır. Kısıttaki opsiyonlar yerine, araç modelleri kullanılmış ve $H_j : S_j$ oranlarından sapmaya izin verilmeyecek şekilde güncellenmiştir.

Denklem 4.17'deki kısıt montaj giriş sırasındaki h 'nci pozisyona en fazla bir tane aracın atanabileceğini göstermektedir. Denklem 4.18 ile ifade edilen kısıt yeniden sıralama hat kapasitesinin hem stok tutmaya hem de yeniden sıralamaya imkân verecek büyüklükte olması gerektiğini ifade etmektedir. Denklem 4.19 ve 4.20 modelde kullanılan değişken türlerini göstermektedir. Buna göre $\Delta_{jkh}(\xi)$ değişkeni tamsayı değerleri almaktadır. Modelde kullanılan, $\gamma_{jkh}(\xi)$, $w_{ijkln}(\xi)$, x_{lnjk} , $z_{lnjkh}(\xi)$ $SS_{lnjk}(\xi)$ değişkenleri ise ikili değişken olarak tanımlanmıştır.

4.2. İki-aşamalı Stokastik Programlama Modelinin Örneklem Ortalaması Yaklaşımı (SAA) ile Çözümü

Bölüm 4.1.'de de bahsedildiği gibi, yeniden sıralama hatları kullanıldığında iki farklı problem yaşanmaktadır. Bu problemlerden ilki araçların yeniden sıralama hattına yerleştirilmesi (doldurma), ikincisi ise araçların yeniden sıralama hattından montaja beslenmesi (boşaltma) problemidir. Ara stok kapasitesi BC olan bir yeniden sıralama hattı için, doldurma probleminde karşılaşılan senaryo $(MC)^{BC}$ dır. Ara stokta bulunan $(MC)^{BC}$ farklı araç tipi montaj giriş sırasındaki herhangi bir pozisyona $(MC)^{BC}!$ şeklinde yerleştirilebilir. Bu durumda araçların yeniden sıralama hattına yerleştirilmesi ve yeniden sıralama hattından montaja beslenmesi probleminde karşılaşılan toplam senaryo sayısı $(MC)^{BC} \times (MC)^{BC}!$ dır. Problemin ölçeği üretilen model, renk sayısı ve yeniden sıralama hattı kapasitesi arttıkça büyümektedir.

Bu çalışmada amaç, ortalamada en yüksek ÇSBO elde edilen en iyi araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarlara ve bu araçların yeniden sıralama hattında nasıl konumlandırılması gerektiğine karar vermektir. Probleme karşılaşılan senaryo sayısının fazla olması nedeniyle, çözümünde SAA yöntemi kullanılmaktadır. SAA yöntemi ile ilk aşamada tutulması gereken optimal ara stok miktarları her model-renk kombinasyonu için yeniden sıralama hattındaki konumları ile birlikte belirlenmektedir. Birinci aşama karar değişkeni x_{mjk}^* ile gösterilmektedir. Bu karar değişkeni, hangi model-renk kombinasyonuna sahip aracın yeniden sıralama hattında hangi hat ve sırada bulunduğunu göstermektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan optimal ara stok miktarlarına bağlı araçların montaj giriş sıralarına karar verilmektedir.

Problemin çözümünde kullanılan SAA yönteminin adımları Bölüm 3.2.'de ayrıntılı olarak anlatıldığı için bu bölümde tekrar anlatılmamaktadır.

4.3. Sayısal Çalışma ve Modelin Uygulanması

Bu bölümde yapılan ilk çalışma SAA algoritmasının performansının değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. Farklı araç uzunlukları (S) ve farklı ara stok kombinasyonları (farklı hat sayısı ve hat kapasitesi) altında algoritmanın ortalama koşum süresi ölçülmüştür. Bu uygulama örneklerinin amacı, SAA algoritması ile hangi büyüklükteki problemlerin ne kadar sürede çözülebileceğinin belirlenmesidir. Modelimiz CPLEX çözücü kullanılarak, GAMS 23.5.2 (versiyon 18.08.2010) programında çözülmüştür. Tasarlanmış olan deneyler Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.67 GHz CPU, 2 GB hafıza özellikli bilgisayarda çözülmüştür. Deneyler; Model 1, Model 2 ve Model 3 olmak üzere üç farklı türde modelin beş farklı rengin olduğu durum için çalıştırılmıştır. Elde edilen ortalama koşum süreleri (run time) Tablo 4.1.'de raporlanmıştır.

Tablo 4.1. SAA algoritmasının farklı araç uzunluğu ve yeniden sıralama hattı konfigürasyonları için koşum süresi

Blok uzunluğu	Hat kapasitesi	Hat sayısı	Koşum süresi (dk)
15	4	5	95
15	4	6	107
15	4	7	119
15	4	8	151
15	4	9	178
15	4	10	185
20	5	5	104
20	5	6	134
20	5	7	135
20	5	8	162
20	5	9	201
20	5	10	206
25	4	15	234
30	4	15	282
35	4	15	293
40	4	15	394

Yapılan sayısal çalışmalar sonucunda iki-aşamalı stokastik problemin karma tamsayı programlama aracılığı ile çözüm süresinin çok uzun olduğu görülmektedir. Model 40 araçtan oluşan bir bloğu ortalama 394 dk da çözmektedir. Günlük 600 aracın montaja beslendiği düşünüldüğünde bir günlük üretim için problemin çözülmesi ortalama 98,5 saat sürmektedir. Bu süre kabul edilebilir bir süre olmadığı

için problemin çözümünün modellenmesinde farklı bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır.

Çözüm süresinin kısaltılması için ilk olarak ileri-sezgisel yöntemlerin kullanılması düşünülmüştür. Yeniden sıralama hatlarında araçların ara stoğa yerleştirilmesi ve sonrasında ara stoğun boşaltılması problemi AS/RS türü ara stoğa göre çok daha karmaşık ve büyük ölçekli bir problemdir. AS/RS modelin çözümünde başarılı olmayan ileri-sezgisel yöntemin yeniden sıralama hatlarında başarılı olması beklenmemektedir. Bu nedenle çözüm süresini azaltırken çözümün performansını (elde edilen ortalama ÇSBO) düşürmemek için genetik algoritma (GA) tabanlı melez bir algoritma geliştirilmiştir. Bölüm 4.4.'de geliştirilen ileri-sezgisel tabanlı melez yöntem detaylarıyla anlatılmaktadır.

4.4. Problemin Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Melez Bir Model ile Çözümü

Geleneksel eniyileme yöntemleri ile büyük ölçekli problemleri çözmek yüksek hesaplama karışıklığı ve maliyeti nedeniyle zor, hatta bazen imkansız olmaktadır. Bu durumda ileri-sezgisel yöntemlerden faydalanılmaktadır. İleri-sezgisel yöntemler geleneksel eniyileme yöntemlerine göre daha az bilgisayar karmaşıklığı ve maliyet ile çözüm elde etmektedirler. Diğer taraftan hızlı çözümler bulmasına rağmen, yavaş yakınsama hızları, ileri-sezgisellerin kullanımının önündeki en büyük engellerden biridir. Literatürde büyük ölçekli problemleri çözmeye kullanılan en yaygın strateji melez modellerin kullanılmasıdır [36, 38, 41, 50].

Geliştirilen modelde, ilk aşama problemi olan ara stokta hangi pozisyonlarda hangi araç model-renk kombinasyonlarının tutulması gerektiğinin belirlenmesi problemi genetik algoritmalar (GA) yardımıyla çözülmüştür. İkinci aşama kararı olan montaj sırası belirlenmesi problemi ise Denklem 4.3 – 4.20'nin çözülmesi ile bulunmuştur.

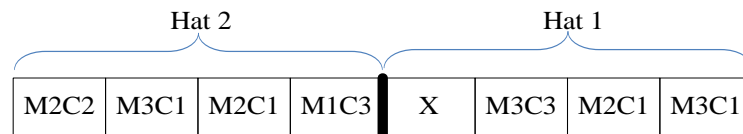
4.4.1. İlk-aşama problemin genetik algoritma ile modellenmesi

Bu bölümde, problemin genetik algoritma ile modellenmesi detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Problemin modellenmesine ilk olarak aday çözümleri temsil eden

kromozomların oluşturulması ile başlanmaktadır. Yeniden sıralama hattının herhangi bir pozisyonuna atanan herhangi bir araç model-renk kombinasyonu problem için aday çözümdür. Bir sonraki aşamada belirlenmiş olan aday çözümler ÇSBO değerine göre sıralanmakta ve değerlendirilmektedir. ÇSBO uygunluk değerine göre seçilen aday çözümler için sırasıyla çaprazlama ve mutasyon genetik işlemcileri uygulanmaktadır. Genetik işlemcilerin uygulanması sonucunda oluşturulan yeni aday çözümlerin uygunluk değeri hesaplanmakta ve oluşan yeni nesil bu uygunluk fonksiyonu değerine göre değerlendirilmektedir. Eğer durdurma kuralı sağlanmışsa algoritma durdurulur, aksi halde yeni aday çözümler oluşturularak en uygun kombinasyonlar aranmaya devam edilir. Bölüm 4.4.1.1.'de modelin genetik gösterimi; Bölüm 4.4.1.2.'de uygunluk fonksiyonu değerinin hesaplanması; Bölüm 4.4.1.3. ve Bölüm 4.4.1.4.'te sırasıyla genetik işlemciler ve durdurma kuralı problemin yapısına uyarlanarak anlatılmaktadır.

4.4.1.1. Modelin genetik gösterimi ve başlangıç popülasyonunun oluşturulması

GA'da aday çözümler kromozomlarla kodlanmıştır. Aday çözümün oluşturulması problemin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu problemde aday çözüm, ara stokta tutulacak araç model-renk kombinasyonlarını ve bu araçların yeniden sıralama hattındaki konumlarını gösteren çözümdür. Hangi model-renk aracın yeniden sıralama hattında nasıl yerleştirileceğini gösteren kromozomlar, dizi yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Örneğin her biri dört araç kapasiteli hatların bulunduğu bir yeniden sıralama hattı ele alalım. İlk hatta Model3-Renk1, Model2-Renk1, Model3-Renk3; ikinci hatta ise Model1-Renk3, Model2-Renk1, Model3-Renk1 ve Model2-Renk2 bulunsun. Bu aday çözümün dizi yapısındaki gösterimi Şekil 4.3.'te bulunmaktadır. Burada "X", araç atanmayan pozisyonu göstermektedir. Örnekte birinci hatta dördüncü sırada araç bulunmadığı için "X" ile gösterilmiştir. Şekil 4.3'te bulunan kalın çizgi yeniden sıralama hatlarını ayırmak için gösterilmiş olup, aday çözümün genetik gösterimi ile ilgili bir anlamı bulunmamaktadır.



Şekil 4.3. Yeniden sıralama hatları için aday çözümün gösterimi

Algoritmayı çalıştırmak için bir başlangıç popülasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu başlangıç popülasyonu tamamen rastgele belirlenen kromozomlardan oluşturulmuştur. Popülasyon oluşturulurken üç kurala dikkat edilmiştir: (i) stokta tutulacak araç sayısı ara stokta bulunan boş depolama alanından fazla olamaz, (ii) yeniden sıralama hattında herhangi bir hatta bulunan stok, hattın birinci sırasına atanmalıdır, (iii) aynı hat üzerinde bulunan araçlar arasında boşluk bırakılmaz. Yeniden sıralama hattında aynı hat üzerinde birbirini takip eden iki araç arasındaki boşluk yeniden sıralama işlemlerinde kullanılamayacağı için, yeniden sıralama hattının kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Böyle bir durumun önüne geçmek için, araçlar arasında boşluk bırakılmamaktadır.

Gerekli popülasyon büyüklüğü sp ile gösterilmek üzere, popülasyon büyüklüğünün belirlenmesinde bir takım özel kurallar bulunmasına rağmen GA'nın çalışma performansının sadece popülasyonun büyüklüğüne bağlı olmadığı görülmüştür [51]. Çalışmaya 100 olurlu çözümden oluşan bir başlangıç popülasyonu ile başlanmıştır.

4.4.1.2. Uygunluk fonksiyonunun hesaplanması ve çözümlerin değerlendirilmesi

Elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi ve seçimi uygunluk fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Modelimizde elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi ikinci aşama kararı sonucu elde edilen ÇSBO değerine göre yapılmaktadır. Yüksek ÇSBO değeri, yüksek yaşama ve çoğalma şansı sağlayarak kromozomun bir sonraki nesilde temsil edilme oranı arttırmaktadır. Eğer belirlenmiş olan araç kombinasyonu sayesinde çizelgelenmiş sıraya yüksek oranda uyum sağlanıyorsa, elde edilen çözüm yeni aday çözümlerin oluşturulmasında rehber olacaktır.

ÇSBO değerine göre değerlendirilen aday çözümler, sonrasında büyükten küçüğe doğru sıralanmaktadır. Belirlenmiş olan eşik değeri geçen çözümler sonraki popülasyonun oluşturulmasında kullanılmaktadır. Eşik değeri, problemin yapısına göre belirlenmektedir. Bu çalışmada problemi çözerken hata oranı, stok kapasitesi, BGO ve geçmiş ÇSBO değerlerini göz önünde bulundurarak eşik değerleri belirlenmiştir. Eşik değerinin altında kalan çözümler bir sonraki popülasyonda

kullanılmamış onların yerine yenileri oluşturulmuştur. Sonraki neslin oluşturulmasında hem elitizm yöntemi hem de rulet çemberi yöntemi kullanılmaktadır.

4.4.1.3. Genetik İşlemciler

Çaprazlama iki farklı kromozomun daha iyi sonuçlar elde etmek için karılması, bir araya getirilmesidir. Çaprazlama işleminde kullanılan kromozomlar genellikle birey, çaprazlama sonucunda elde edilen kromozomlar (çözümler) ise yeni birey olarak adlandırılmaktadır. Çaprazlama tekniği, olurlu çözümler arasından en uygun olanının seçilmesinde kullanılan bir arama yöntemidir ve problemin yapısına göre değişmektedir [46].

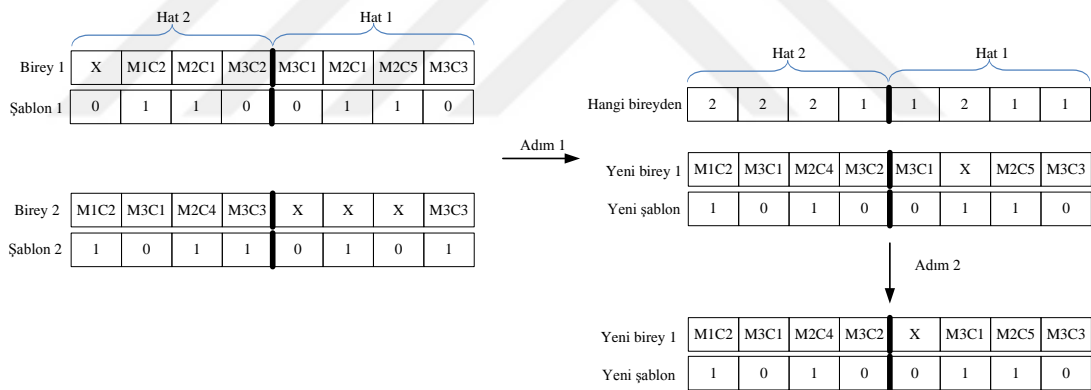
Çalışmada yeni bireylerin oluşturulmasında Warwick ve Tsang [47] tarafından kullanılan uyarlanabilir tekdüze çaprazlama (Uniform Adaptive Crossover, UAX) tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir kromozom için 0-1 ikili dizi yapısında bir şablon kullanılmaktadır. Bu şablon sayesinde oluşacak yeni bireye hangi genin Birey 1'den hangisinin Birey 2'den aktarılacağı belirlenmektedir. Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla birlikte bu şablonlar da her bir kromozom için rastgele oluşturulmaktadır. Daha sonra çaprazlama işleminde, yeni bireye aktarılacak gen ile birlikte şablondaki değer de kopyalanmaktadır.

Kullanılan çaprazlama yöntemi Şekil 4.4.'te bir örnek ile anlatılmaktadır. Şekil 4.4.'te kutuların içerisindeki genler araçların model-renk bilgilerinin yanında, yeniden sıralama hattındaki pozisyonlarını da göstermektedir. Bu örnek her biri dört araç kapasiteli iki hattın oluşan yeniden sıralama hattı için tasarlanmıştır. Yeniden sıralama hattında bulunan hatların daha kolay anlaşılmasını sağlamak adına ikinci hat başlangıcı koyu siyah çizgi ile ayrılmıştır. Birey 1'de ilk hatta sırasıyla M3C3, M2C5, M2C1 ve M3C1 olmak üzere dört adet araç bulunmaktadır. İkinci hatta ise sırasıyla M3C2, M2C1 ve M1C2 olmak üzere üç araç bulunmaktadır. Birey 2'de birinci hattın ilk sırasına M3C3 atanmış, ikinci, üçüncü ve dördüncü sıralara araç atanmamıştır. İkinci hatta ise sırasıyla M3C3, M2C4, M3C1 ve M1C2 araçları

bulunmaktadır. Şekil 4.4.'te gösterilen çaprazlama tekniğine ait işlemler aşağıda adım adım anlatılmaktadır.

Adım 1: Çaprazlanacak iki birey arasından bir tanesini seç (Birey 1). Seçilen bireye ait stok tutulacak miktarları ve şablonu sağdan başlayarak kopyala. Şablondaki değerler iki birey için de aynı oluncaya kadar kopyalama işlemine devam et. Şablon değeri iki birey için aynı olduğunda kopyalama işlemine diğer bireyden (Birey 2) devam et.

Adım 2: Çaprazlama sonucunda oluşan yeni bireyler, genler arasında boşluk olup olmadığı açısından kontrol edilmelidir. Şekil 4.4.'e göre, birinci adımın sonunda hat birde ikinci sıra ile dördüncü sıra arasında araç bulunmamaktadır. Boş olan üçüncü sıraya dördüncü sıradaki araç atanmış, böylelikle birbirini takip eden araçlar arasında boşluk kalmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.4. Çaprazlama işlemlerinin şematik gösterimi

Rastgele seçilen bir çift kromozomun çaprazlamaya uğrayıp uğramayacağına şu şekilde karar verilmektedir. Seçilen her çift kromozom için rastgele üretilen sayı çaprazlama olasılığı pc 'den düşük ise çaprazlama gerçekleşecek aksi halde çaprazlama yapılmayacaktır. Çalışmada çaprazlama olasılığı Zinflou ve arkadaşlarının kabul ettiği gibi 0,8 alınmıştır [45, 48].

GA'da kullanılan bir diğer operatör de mutasyondur. Mutasyon, yeni popülasyonda bir farklılık yaratılmasıdır. Çaprazlamaya kıyasla daha düşük bir olasılıkla gerçekleşmektedir ve kromozomum yapısında çaprazlama kadar büyük değişiklikler yaratmamaktadır. Çalışmada Zinflou ve arkadaşlarının kabul ettiği gibi mutasyon oranı pm , 0,09 alınmıştır [45, 48]. Rastgele seçilen bir gen için üretilen rastgele sayı mutasyon olasılığından düşük ise mutasyon gerçekleşmekte, aksi halde gerçekleşmemektedir. Çaprazlamada olduğu gibi çok farklı mutasyon teknikleri de bulunmaktadır. Çalışmada mutasyon rastgele seçilen iki genin yerlerinin değiştirilmesi olarak belirlenmiştir. Aynı yöntem Zinflou ve ark. tarafından da [45, 48] kullanılmaktadır.

4.4.1.4. Durdurma kuralı

Küçük problemler için durdurma kuralı iki-aşamalı stokastik modelin karma tamsayılı programlama ile çözümünden elde edilen ÇSBO değeri olarak belirlenmiştir. Yani melez modelden edilen ÇSBO değeri ile iki-aşamalı stokastik modelin karma tamsayılı programlama ile çözümünden elde edilen ÇSBO değeri aynı ise algoritma sonlanmakta, aksi halde 300 iterasyon için çözüm yapılmakta ve elde edilen en iyi çözüm kullanılmaktadır.

Yeniden sıralama hattında tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları ve bunların konumları (hat ve sıra bilgileri) GA ile belirlendikten sonra, ikinci aşamada maksimum ÇSBO elde edilecek montaj giriş sırası Denklem 4.3-4.21'in çözülmesi ile belirlenmektedir.

4.5. Sayısal Uygulama

Bu bölümde iki farklı sayısal çalışma ele alınmaktadır. İlk çalışmada, yeniden sıralama hattı için kurulan iki farklı çözüm yöntemi (karma tamsayılı programlama ve GA tabanlı melez model) çalışma süreleri ve ÇSBO açısından karşılaştırılmıştır. İkinci çalışmada ise problem parametreleri olan BGO, hata oranı, hat sayısı ve kapasitesine bağlı ÇSBO değerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

Yapılan sayısal çalışmada kullanılan veriler AS/RS modeldeki veriler ile aynı, gerçek değerlere dayanmaktadır. Çalışmada boya öncesi sıra rastgele belirlenmiştir. Ayrıca montaj giriş sırası oluşturulurken her bir araç tipi için belirlenen kısıtlar sağlanmak zorundadır. Model 1 ve Model 2 için bu kısıtlar $H:S=1/3$; Model 3 için ise $H_3 : S_3 = 2/3$ olarak belirlenmiştir.

İki-aşamalı stokastik modelin çözümünde kullanılan SAA algoritmasının parametreleri $R=10, N=100$ ve $N'=200$ olarak alınmıştır. Melez modelde ilk aşama kararı olan stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonları ve bu araçların yeniden sıralama hattındaki pozisyonları GA kullanılarak belirlenmiştir. İkinci aşamada ise araçların montaj giriş sıralarının belirlenmesi için Denklem 4.3 – 4.21'den oluşan matematiksel model çözülmüştür.

4.5.1. Algoritmanın çözüm performansı

Öncelikle önerilen iki çözüm yönteminin (karma tamsayılı programlama ve melez model) koşum süresi ve yeniden sıralama performansını incelemek için birtakım nümerik deneyler tasarlanmıştır. Problem GAMS (versiyon 18.08.2010) yazılımının CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Tüm deneyler Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.67 GHz CPU, 2 GB hafıza özellikli bilgisayarda çalıştırılmıştır. Tablo 4.2.'de farklı büyüklükteki araç uzunlukları için, iki modelin koşum süreleri ve modelin çözümünden elde edilen ÇSBO değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2.'de bulunan nümerik deneylerde, BGO %60, hata oranı %20 olarak alınmıştır. Hatırlatmak gerekirse BGO, boya giriş sırasındaki araçların çizelgelenmiş sıraya uyum oranını göstermektedir. BGO değerinin %60 olması, herhangi yüz araç içerisinde ortalama 60 aracın çizelgelenmiş sıra ile aynı sırada boyahaneye girdiğini ifade etmektedir.

Melez modelin geliştirilmesinin nedeni karma tamsayılı programlama ile çözüm süresinin çok uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 4.2.'ye göre melez model kullanıldığında modelin çok daha kısa sürede, karma tamsayılı programlama ile aynı

ÇSBO değerine sahip çözümleri elde ettiği görülmektedir. Melez modelde kullanılan GA parametreleri şu şekildedir. Popülasyon sayısı $sp=100$, iterasyon sayısı $ni=300$, elitizm oranı $ne=0,1 \times np$, çaprazlama olasılığı $pc=0,8$, mutasyon olasılığı $pm=0,09$.

Çalışılan otomobil firması vardiya kapasitesi 300 araç olmak üzere günde iki vardiya çalışmaktadır. Blok uzunluğu 40 araç için, ara stokta tutulması gereken stok kombinasyonlarının ve yerlerinin belirlenmesi 60 araç kapasiteli yeniden sıralama hattı için 15 dakika almaktadır. Bu süre, bir günlük üretim için yaklaşık 3,75 saate karşılık gelmektedir. Uygulamada çizelgelenmiş sıra üretim başlamadan 10-15 gün önce belirlenmekte ve gerekli malzeme tedarikinin zamanında yapılması için tedarikçilerle paylaşılmaktadır. Ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarını belirlemek, bunları kaporta ve boyahane ile paylaşmak için 10-15 günlük bir süre yeterli olmaktadır.

Tablo 4.3.'te, Tablo 4.2.'de yapılan uygulama örneklerinden blok uzunluğu 30, 35 ve 40 araç için iki-aşamalı stokastik ve melez modelin çözümünden elde edilen, yeniden sıralama hattında tutulması gereken stok kombinasyonlarına ait miktarlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4.3.'e göre, her iki modelde de tutulan stok kombinasyonları aynı olmasına rağmen melez modelde daha fazla miktarda stok tutulmaktadır.

Tablo 4.2. Karma tamsayı programlama ve melez modelin koşum süreleri ve ÇSBO açısından karşılaştırılması

Blok uzunluğu	Hat kapasitesi	Hat sayısı	Karma tamsayı programlama			Melez model		
			Ort. ÇSBO	%95 Güven aralığı	Koşum süresi (dk)	Ort. ÇSBO	%95 Güven aralığı	Koşum süresi (dk)
15	4	5	86,86	85,70-88,02	95	84,80	83,56-86,04	3,0
15	4	6	90,73	89,60-91,86	107	90,69	89,91-91,47	3,2
15	4	7	95,47	94,64-96,30	119	93,90	93,14-94,66	4,1
15	4	8	96,67	95,89-97,45	151	96,45	95,94-96,96	4,4
15	4	9	97,33	96,45-98,21	178	95,95	95,21-96,69	4,9
15	4	10	97,40	96,50-98,30	185	97,50	97,05-97,95	5,0
20	5	5	88,25	87,01-89,49	104	87,38	86,50-88,26	5,1
20	5	6	90,42	89,15-91,69	134	89,60	88,92-90,28	5,3
20	5	7	93,17	92,10-94,24	135	93,73	92,97-94,49	5,7
20	5	8	95,25	94,31-96,19	162	94,83	93,57-96,08	6,0
20	5	9	95,33	94,41-96,25	201	94,86	95,65-96,06	6,2
20	5	10	96,67	95,89-97,45	206	95,66	94,37-96,94	6,5
25	4	15	93,55	92,62-94,48	234	92,87	91,48-94,26	10,1
30	4	15	96,77	95,77-97,77	282	95,32	94,06-96,57	12,2
35	4	15	93,77	92,61-94,93	293	92,53	91,01-94,05	13,3
40	4	15	89,22	86,67-88,98	394	89,00	87,68-90,31	15,2

Tablo 4.3. İki-aşamalı stokastik model ve melez model için tutulan stokların karşılaştırılması*.

Blok uzunluğu	Yeniden sıralama hattı özellikleri		İki-aşamalı stokastik model	Melez model
	Hat kapasitesi	Hat sayısı		
30	4	15	M1C2 (1)	M1C2 (2)
			M1C3 (1)	M2C2 (3)
			M2C1 (1)	M2C4 (3)
			M2C2 (2)	M2C5 (2)
			M2C3 (2)	M3C1 (6)
			M2C4 (1)	M3C2 (4)
			M2C5 (1)	M3C4 (5)
			M3C1 (5)	
			M3C2 (2)	
			M3C3 (3)	
			M3C4 (2)	
			M3C5 (2)	
			35	4
M1C3 (1)	M2C2 (2)			
M2C1 (1)	M2C2 (2)			
M2C2 (2)	M2C4 (3)			
M2C3 (2)	M2C5 (2)			
M2C4 (1)	M3C1 (6)			
M2C5 (1)	M3C2 (4)			
M3C1 (5)	M3C3 (4)			
M3C2 (2)	M3C4 (2)			
M3C3 (3)				
M3C4 (2)				
M3C5 (2)				
40	4	15		
			M1C5 (1)	M1C5 (1)
			M2C2 (2)	M2C2 (3)
			M2C5 (4)	M2C5 (4)
			M3C1 (1)	M3C1 (2)
			M3C2 (4)	M3C2 (3)
			M3C3 (5)	M3C3 (4)
			M3C4 (1)	M3C4 (1)
			M3C5 (1)	M3C5 (2)

*Parantez içindeki sayılar o model ve renkteki araçtan kaç adet stok tutulması gerektiğini göstermektedir.

4.5.2. Model parametrelerin çözüme etkisi

Bu bölümde BGO, hata oranı ve hat sayısının yeniden sıralama performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Hem karma tamsayı programlama, hem de melez modelin kullanıldığı durum için ÇSBO değerleri karşılaştırılmış ve aralarında %95 güven düzeyinde istatistiksel bir fark bulunmadığı görülmüştür. Melez modelin çözüm süresinin daha kısa olması sebebiyle yapılan çalışmalarda melez modelin sonuçları kullanılmıştır.

Blok uzunluğu 15 ve 20 araç için deneyler yapılmış, AS/RS modelde olduğu gibi BGO değerleri %30, %50, %70 ve %90 olarak alınmıştır. Fakat blok uzunluğu 15 araç için, çizelgelenmiş sıraya göre doğru pozisyona atanan araç sayısı tam sayı değerler alacağı için %30, %50, %70 ve %90 BGO değerleri elde edilememektedir. Bu oranlar yerine %33, %53, %73 ve %93 BGO değerleri kullanılmıştır.

4.5.2.1. BGO'nun ÇSBO üzerindeki etkisi

Uygulamadan bildiğimiz kadarıyla, araçlar çizelgelenmiş sıraya ne kadar yüksek bir uyumla boyahaneye girerse o kadar yüksek ÇSBO değerleri elde edilmektedir. Fakat BGO'daki artışın ÇSBO değerini ne büyüklükte arttıracacağı bilinmemektedir. Bu kısımda BGO'daki artışın ÇSBO üzerinde yarattığı artış oranı incelenmektedir. Yapılan deneylerde hata oranı %20 alınmış, elde edilen deney sonuçları Tablo 4.4.'te listelenmiştir.

Tablo 4.4. BGO'nun ÇSBO üzerindeki etkisi

Blok uzunluğu	BGO	Yeniden sıralama hattı özellikleri		Ort. ÇSBO	ÇSBO için %95 güven aralığı
		Hat kapasitesi	Hat sayısı		
15	%33	4	6	77,13	76,40-77,86
15	%53	4	6	88,90	88,28-89,52
15	%73	4	6	92,96	92,18-93,74
15	%93	4	6	94,83	94,15-95,51
20	%30	5	6	81,04	80,23-81,85
20	%50	5	6	85,20	84,52-85,88
20	%70	5	6	89,10	88,39-89,81
20	%90	5	6	92,02	91,29-92,75

Tablo 4.4.'e göre, iki sonuç elde edilmiştir. Bunlardan ilki, düşük BGO değerleri ile çalışıldığında bile yeniden sıralama sayesinde yüksek ÇSBO elde edilmesidir. Örneğin 15 araçlık blok uzunluğunda, %33 BGO ile çalışıldığında, ortalama %73 ÇSBO elde edilmiş, benzer şekilde 20 araçlık blok uzunluğunda %30 BGO ile %81 ÇSBO elde edilmiştir. Yani boyahane giriş sırası ile montaj sırası birbirinden oldukça farklı sıralanmış olsa bile yüksek ÇSBO değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuç AS/RS model ile benzerlik göstermektedir.

İkinci sonuç ise BGO'daki artışa bağlı ÇSBO artışının azalan bir etki göstermesidir. Blok uzunluğu 15 araç olmak üzere, BGO %33'ten %53'e çıkartıldığında ÇSBO değerinde ortalama 11,77 birimlik bir artış meydana gelmektedir. Diğer taraftan BGO %73'ten %93'e çıkartıldığında ÇSBO değerindeki artış 1,87 birim olmaktadır. Bu bulgu bize şu esnekliği sağlamaktadır. Araçlar, boyahanedeki maliyetleri düşürmek amacıyla boya kısıtlarını da göz önünde bulunduran bir sıra ile boyahaneye giriş yaptıklarında kaybedecekleri ÇSBO çok fazla olmamaktadır. Bu durumu Tablo 4.4.'teki bir örnekle şu şekilde açıklanabilir. Örneğin, %70 BGO seviyesi %90 BGO'ya göre daha fazla oranda boya kısıtlarını göz önünde bulundurmaktadır. BGO %70 olduğu zaman elde edilen ÇSBO %89; BGO %90 olduğunda ise elde edilen ÇSBO %92 olmaktadır. Yani BGO değerindeki 20 birimlik artışın ÇSBO üzerindeki etkisi 3 birim olmaktadır. Boyahane kısıtlarından sapmaların ciddi maliyetler yaratacağı durumlarda, ÇSBO değerindeki marjinal azalışlar kabul edilebilmektedir.

Blok uzunluğu 20 araç için yapılan bu çıkarımın blok uzunluğu 15 araç için de doğru olduğu görülmektedir. BGO değeri %73 iken yaklaşık %93 ÇSBO elde edilmiş, BGO %93'e çıkartıldığında ise yaklaşık %95 ÇSBO elde edilmiştir. Yani araçlar boyahaneye boya kısıtlarına %20 oranında daha uyumlu bir sıra ile girdiklerinde kaybedilen ÇSBO değeri 2 birim olmaktadır.

4.5.2.2. Hata oranının ÇSBO üzerindeki etkisi

Boya hata oranını düşürmek amacıyla, boya işlemlerinde yapılacak iyileştirme, yüksek maliyetler nedeniyle çok kolay yapılamamaktadır. Bu nedenle hata oranındaki azalışın ÇSBO artışı üzerindeki etkisi incelenmeli, ona göre iyileştirme yapılıp yapılmaması gerektiğine karar verilmelidir. Eğer hata oranında yapılan iyileştirmenin ÇSBO artışı üzerindeki etkisi maliyetler ile kıyaslandığında yetersiz ise böyle bir iyileştirme planlanmamalıdır.

Hata oranındaki azalışın ÇSBO üzerindeki etkisini incelemek amacıyla %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere toplamda dört farklı hata oranı ele alınmış ve ÇSBO

değerindeki değişim incelenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.5.'te listelenmiştir. Bu deneylerin hepsinde BGO %60 olarak alınmıştır.

Tablo 4.5. Hata oranının ÇSBO üzerindeki etkisi

Blok uzunluğu	Hata oranı	Yeniden sıralama hattı özellikleri		Ort. ÇSBO	ÇSBO için %95 güven aralığı
		Hat kapasitesi	Hat sayısı		
15	%10	4	6	93,63	92,88-94,44
15	%20	4	6	90,69	89,91-91,47
15	%30	4	6	85,67	84,84-86,50
15	%40	4	6	81,30	80,40-82,20
20	%10	5	6	94,46	93,87-95,05
20	%20	5	6	89,60	88,92-90,28
20	%30	5	6	84,68	83,85-85,51
20	%40	5	6	79,62	78,77-80,47

Tablo 4.5.'e göre, hata oranında yapılacak iyileştirmenin ÇSBO üzerindeki etkisinin neredeyse doğrusal olduğu görülmektedir. Başka bir değişle, hata oranının %20'den %10 düşürülmesi ile %30'dan %20'ye düşürülmesi neredeyse aynı etkiye sahiptir.

4.5.2.3. Hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi

Hat sayısındaki artış, araç pozisyonlarında yapılacak değişiklik miktarını arttıracığı için, ÇSBO'yu arttırmaktadır. Diğer taraftan hat sayısını arttırmak hem maliyetleri arttırmakta hem de yer sıkıntısı nedeniyle her zaman mümkün olmamaktadır. Bu kısımda eklenen hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi incelenmektedir. Yapılan deneylerde BGO %60, hata oranı %20 alınmıştır. Deneylere ait sonuçlar Tablo 4.6.'da listelenmiştir.

Tablo 4.6. Eklenen hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi

Blok uzunluğu	Yeniden sıralama hattı özellikleri		Ort. ÇSBO	ÇSBO için %95 güven aralığı
	Hat kapasitesi	Hat sayısı		
15	4	5	82,80	81,56-84,04
15	4	6	90,69	89,91-91,47
15	4	7	93,90	93,14-94,66
15	4	8	96,45	95,94-96,96
15	4	9	95,95	95,21-96,69
15	4	10	97,50	97,05-97,95
20	5	5	87,38	86,50-88,26

Tablo 4.7. (Devamı)

Blok uzunluğu	Yeniden sıralama hattı özellikleri		Ort. ÇSBO	ÇSBO için %95 güven aralığı
	Hat kapasitesi	Hat sayısı		
20	5	6	89,60	88,92-90,28
20	5	7	93,73	92,97-94,49
20	5	8	94,83	93,57-96,08
20	5	9	94,86	95,65-96,06
20	5	10	95,66	94,37-96,94

Tablo 4.6. incelendiğinde, hat sayısı arttıkça ÇSBO değerinin arttığı görülmektedir. Fakat ÇSBO değerindeki artış azalan türdendir. Blok uzunluğu 15 araç için yedi hat ile sekiz hat arasında ÇSBO açısından %95 güven düzeyinde istatistiksel bir fark bulunmamaktadır. Buradan sekizinci hat için yapılan yatırımın gereksiz olduğu görülmektedir. Diğer taraftan sekiz hat ile dokuz hat arasında ÇSBO açısından bir fark bulunmamaktadır. Hat sayısını yediden dokuz çıkartmanın ÇSBO üzerindeki etkisi de 1,86 birim olmaktadır. Yedi hattan oluşan bir ara stok ile çalışıldığında hat sayısını sekize çıkartmanın ÇSBO'yu arttırmadığı, hat sayısının ancak dokuz çıkartıldığında ÇSBO'yu ortalama 1,86 birim arttırdığı görülmektedir.

Blok uzunluğu 15 araç için elde edilen bulgular blok uzunluğu 20 araç için de aynı doğrultudadır. Hat sayısını arttırmanın ÇSBO artışı üzerindeki etkisi azalmaktadır. Örneğin hat sayısını altıdan yediye çıkartmak ÇSBO'yu ortalama 3,57 birim arttırırken, yediden sekize çıkartmak ÇSBO'yu 2,08 birim arttırmaktadır. Blok uzunluğunun 15 araç ve 20 araç olduğu her iki durumda da hat sayısını sekizden fazla tutmak, ÇSBO değerini arttırmamaktadır.

Özetle, eklenen hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi azalan türden olduğu için, ilave hat maliyetlerine katlanmadan önce elde edilecek ortalama ÇSBO artışı incelenmeli, ona göre karar verilmelidir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezde ele alınan problem, hem montaj öncesinde bulunan ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesini, hem de boya hataları gözlemlendikten sonra araçların yeniden sıralanmaları problemini içerdiği için iki aşamalı bir problemdir. İlk aşamada, araçları çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmek için, ara stokta tutulması gereken optimum model-renk araç kombinasyonlarına ve miktarlarına karar verilmektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan optimum model-renk araç kombinasyonlarına ait miktarlar altında, boyahanedeki oluşan hatalar gözlemlendikten sonra araçların montaj giriş sıraları belirlenmektedir. Ele alınan problem boyahanedeki hataları göz önünde bulundurduğu için stokastik modelleme yaklaşımı kullanılmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, yeniden sıralamanın daha çok takip eden istasyonların kısıtlarını sağlamak amacıyla kasıtlı olarak yapıldığı görülmektedir. Kasıtsız sıra değişikliği ile ilgili çalışmaların ise yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Hâlbuki araç pozisyonlarında meydana gelen kasıtlı değişiklikler kadar kasıtsız değişiklikler de çizelgelenmiş sıradan sapmalara neden olmaktadır. Ayrıca bu sıra değişiklikleri kasıtlı sıra değişikliklerinden farklı olarak, önceden planlanmamaktadır. Diğer taraftan, ara stok kapasitesinin belirlenmesi problemi ile ilgili yapılan çalışmalarda ara stoğun sadece yeniden sıralama fonksiyonu göz önünde bulundurulmuştur. Hâlbuki ara stoğun hem yeniden sıralama hem de stok tutma fonksiyonu bulunmaktadır. Sınırlı ara stok kapasitesi altında, tutulacak stoklar ile çizelgelenmiş sıraya daha uygun bir montaj giriş sırası elde edilebilir.

İki-aşamalı stokastik problemin modellenmesi, işletmelerde kullanılan depolama sistemi türüne göre farklılık göstermektedir. Çalışmada, yaygın olarak kullanılan ara

stok türleri olan AS/RS ve yeniden sıralama hatları için problem ayrı ayrı modellenmiştir. AS/RS türü ara stok, her biri birbirinden ayrı ve bağımsız, çoklu stok depolama alanları içermektedir. Stok depolama alanları birbirinden ayrı ve bağımsız olduğu için boya giriş sırasındaki her bir araç AS/RS’de istenilen stok depolama alanına alınabilir. Benzer şekilde AS/RS ara stokta bulunan herhangi bir araç da montaja beslenebilir. Diğer taraftan yeniden sıralama hatlarının doldurulması ve boşaltılması AS/RS’den farklı olarak ilk giren ilk çıkar öncelik kuralına göre olmaktadır. Problemin AS/RS ve yeniden sıralama hatlarının kullanıldığı durum için modellenmesi detaylı bir şekilde sırasıyla Bölüm 3. ve Bölüm 4.’te anlatılmaktadır.

Hataların oluşacağı pozisyonlara bağlı oluşan senaryo sayısı fazla olduğu için, problemin çözümünde örneklem ortalaması yaklaşımı (SAA) yöntemi kullanılmaktadır. SAA simülasyon tabanlı bir yöntemdir. Ana fikri; gerçek problemin ortalama amaç fonksiyonu değerini, SAA problemin amaç fonksiyonu değeri kullanılarak tahmin etmeye dayanmaktadır. SAA yöntemi ile ilk aşamada tutulması gereken optimal ara stok miktarları her model-renk kombinasyonu için belirlenmektedir. İkinci aşamada ise belirlenmiş olan optimal ara stok miktarlarına bağlı araçların montaj giriş sıralarına karar verilmektedir.

AS/RS türü ara stok kullanıldığında, yapılan sayısal çalışmalar ile öncelikle problemin kabul edilebilir bir sürede çözüldüğü gösterilmiştir. Ardından, geliştirilen iki-aşamalı modelin ara stoğun stok tutma fonksiyonunu göz önünde bulundurmasından dolayı literatürdeki benzer çalışmalara göre aynı ÇSBO değerini daha düşük ara stok kapasiteleri ile sağladığı gösterilmiştir. Devamındaki sayısal çalışmalar ara stok kapasitesi, araçların boya giriş uyum oranı (BGO), hata oranı parametrelerinin çizelgelenmiş sıra başarımları (ÇSBO) ve tutulan stok miktarına etkisini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Ara stok kapasitesini arttırmak ÇSBO değerini arttırmaktadır. Fakat bu artış miktarı BGO’nun artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Bu durumda yüksek BGO seviyeleri ile çalışıldığında ara stok kapasitesini arttırarak ÇSBO artışı

sağlamak hem sınırlı hem de maliyetli olacağı için hata oranında iyileştirmeye gidilmelidir.

- Araçların boya giriş sıralarını belirlerken sadece montaj kısıtları değil aynı zamanda boyahane kısıtlarını da göz önünde bulundurmak ÇSBO üzerinde önemli bir azalışa neden olmamaktadır. Bu durumda çizelgelenmiş sıra oluşturulurken, boyahane maliyetlerini düşürmek için, boyahanenin kısıtları da göz önünde bulundurulabilir.
- Boyahane ve montaj arasındaki eşgüdüm eksikliği hata oranlarında yapılan iyileştirmenin etkisini azaltmaktadır. Hata oranlarında yapılacak iyileştirmenin etkisi boyahane ile montaj arasında sağlanan eşgüdüm sayesinde istenilen seviyelerde olmaktadır.
- Düşük BGO seviyesinde AS/RS'nin yeniden sıralama fonksiyonu ön planda bulunurken; yüksek BGO'da AS/RS'nin stok tutma fonksiyonu öne çıkmaktadır.

Tezde ele alınan problem, araçların sıra değişikliklerinde boyahane rastgele oluşan hataların etkisini göz önünde bulundurduğu için stokastik yaklaşımla modellenmiştir. Problemin stokastik olarak modellenmesi, deterministik modellemeye göre daha karmaşık ve zor olmaktadır. Fakat problemin doğasında bulunan rastgeleliği göz önünde bulundurduğu için daha gerçekçidir. Çalışmada, problemin stokastik modellenmesinin sağlamış olduğu fayda stokastik çözümün değeri (VSS) ile ölçülmüştür.

Stokastik çözümün değeri, stokastik modelden elde edilen ortalama ÇSBO ile deterministik modelden elde edilen ÇSBO farkı ile ölçülmektedir. Düşük BGO ve hata oranı seviyelerinde araçların sıralarında meydana gelen değişikliğin nedeni rastgelelik olmadığı için stokastik çözümün değeri düşüktür. Benzer şekilde yüksek BGO seviyesinde, hata oranındaki artış stokastik çözümün değerini arttırmaktadır. %90 BGO değerinde, stokastik modelleme ile elde edilen ortalama ÇSBO farkı 2,38 birim daha fazladır. Diğer bir deyişle problemin stokastik modellenmesi ile ortalama her 100 araçtan 2,38 tane fazladan araç çizelgelenmiş sıraya uygun bir şekilde montaja beslenmektedir. Bu sayede bir günde fazladan 14,28 araç kazanılmış olmaktadır.

Problemin yeniden sıralanacak S uzunluğundaki blok için her defa çözülmesi modelin uygulamada yaygınlaştırılmasının önünde bir engel oluşturmaktadır. Ayrıca hatta oluşan kasıtsız sıra değişiklikleri nedeniyle araç sıra değişikliklerine anlık karar verilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, montajda çalışan işçilerin kolaylıkla uygulayabileceği basit yeniden sıralama kurallarından oluşan başka bir kural tabanlı iki-aşamalı sezgisel yeniden sıralama modeli geliştirilmiştir. Bu sayede işçiler yeniden sıralama kararını kendilerine tanımlanmış olan kurallar çerçevesinde yapacaklardır. Geliştirilen kural tabanlı yeniden sıralama modeli ile optimal yeniden sıralama modeli karşılaştırılmıştır. Kural tabanlı modelin optimal yeniden sıralama modeline yakın ÇSBO değerleri elde ettiği görülmüştür. Fakat tutulan stok sayıları açısından karşılaştırıldığında kural tabanlı yeniden sıralama modeli optimal yeniden sıralama modeline yakın ÇSBO değerlerini daha fazla stok tutarak sağlamaktadır.

Problem ayrıca yeniden sıralama hatlarının kullanıldığı durum için modellenmiş ve detayları Bölüm 4'te anlatılmıştır. Yeniden sıralama hatlarında AS/RS'den farklı olarak iki farklı problemle karşılaşılmaktadır. Bunlardan ilki araçların yeniden sıralama hatlarına yerleştirilmesi (doldurma problemi), ikincisi ise araçların yeniden sıralama hattından montaja beslenmesi (boşaltma problemi) problemidir. Bu iki problem yeniden sıralama hatları için geliştirilen modelin çözümünü zorlaştırmaktadır.

Hem AS/RS ara stok türü, hem de yeniden sıralama hatları için problemin boyutu büyüdüğüde karmaşıklığı artmaktadır. Bu durumda problemi geleneksel eniyileme yöntemleri kullanılarak çözmek hem zaman hem maliyet açısından mümkün olmamaktadır. Çalışmada büyük ölçekli problemleri daha kısa sürede çözmek amacıyla hem AS/RS, hem yeniden sıralama hattı için genetik algoritma (GA) tabanlı melez iki farklı model geliştirilmiştir. Bu modellerde ilk aşama problemi olan ara stokta tutulması gereken araç model-renk kombinasyonlarına ait miktarların belirlenmesi problemi GA ile çözülmektedir. İlk aşamada belirlenmiş olan ara stok miktarları altında, boyahanede oluşan hatalar gözlemlendikten sonra araç yeniden sıralama problemi karma tamsayılı model aracılığı ile çözülmektedir. Geliştirilen

melez modellerin karma tamsayılı programlamaya göre çok daha kısa sürede aynı ÇSBO değerine sahip çözümleri elde ettiği görülmektedir.

AS/RS için geliştirilen modelde olduğu gibi, yeniden sıralama hattı modeli için de problem parametrelerinin çözüme etkisi incelenmiştir. Problem parametrelerinden ara stok kapasitesi, BGO, hata oranı ile ilgili yukarıda sıralanan bulguların yeniden sıralama hattı için de geçerli olduğu görülmüştür. AS/RS türü ara stoktan farklı olarak yeniden sıralama hattında bulunan hat sayısının ÇSBO üzerinde arttırıcı bir etkisi bulunmaktadır. Yeniden sıralama hatları, ilk giren ilk çıkar öncelik kuralına göre çalıştığı için artan hat sayısı ile yeniden sıralama esnekliği artmaktadır. Yapılan sayısal çalışmalarda, hat sayısı arttıkça ÇSBO değerinin arttığı; fakat bu artışın azalan türden olduğu görülmüştür. Ek hat sayısının ÇSBO üzerindeki etkisi azalan türden olduğu için, ilave hat maliyetlerine katlanmadan önce elde edilecek ortalama ÇSBO artışı incelenmeli, ona göre karar verilmelidir.

Gelecek çalışmada problem, araç sıralama problemi ile birleştirilerek araçların üretim sırasının (çizelgelenmiş sıranın) belirlenmesini de içerecek şekilde genişletilebilir. Ölçeği daha da büyüyen problemin çözümünde Benders ayrıştırma yöntemi ile örneklem ortalaması yaklaşımı (SAA) hızlandırılabilir. Araç sıralama problemi NP-hard bir problem olduğu için [52] çözümünde GA tabanlı ileri-sezgisel yöntem kullanılabilir.

Bir diğer çalışma ise, yeniden sıralama hatlarında en uygun hat konfigürasyonunu bulunması yönünde olabilir. Hat sayısı ve kapasitesi birer karar değişkeni olarak modele dâhil edilip, karma tamsayılı programlama ile model çözülebilir. Burada ilave hattı kumadan elde edilen kazanç ve hattı kurmanın işletmeye getireceği maliyetlerden oluşan toplam maliyet enküçüklemesini içeren bir amaç fonksiyonu ile hedeflenen ÇSBO değerini elde etmek için gereken hat sayısı ve kapasiteleri belirlenebilir.

Bir başka çalışma, yeniden sıralama kararlarının dinamik bir yapıda belirlenmesi yönünde olabilir. Örneğin stokta bulunan araçlar altında, boyahaneden çıkan i 'nci

aracın stokta bulunan bir başka araçla değiştirilip değiştirilmeyeceği kararı dinamik olarak belirlenebilir. Bu problem Markov karar süreçleri (MDP) ile modellenip, yaklaşık dinamik programlama (approximate dynamic programming) veya ödüllü öğrenme (reinforcement algorithm) yöntemleri ile çözülebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Renault-Oyak. <http://www.oyak-renault.com.tr/page.aspx?id=80>. Erişim Tarihi: 07.11.2014.
- [2] Sawyer, C. In-line sequencing: how it's done at Wixom. *Automot. Ind.*, 1994.
- [3] Fournier, X., Agard, B. Improvement of earliness and lateness by postponement on an automotive production line. *Int. J. Flex. Manuf. Syst.* 1–15, 2007.
- [4] Parrello, B., Kabat, W., Wos, L. Job-shop scheduling using automated reasoning: A case study of the car-sequencing problem. *J. Autom. Reason.*, 2(1):1–42, 1986.
- [5] Gravel, M., Gagné, C., Price, W. L. Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem. *J. Oper. Res. Soc.*, 56(11):1287–1295, 2005.
- [6] Ding, F.-Y., Sun, H. Sequence alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments. *Int. J. Prod. Res.*, 42(8):1525–1543, 2004.
- [7] Boysen, N., Scholl, A., Wopperer, N. Resequencing of mixed-model assembly lines: Survey and research agenda. *Eur. J. Oper. Res.*, 216(3):594–604, 2012.
- [8] Meissner, S. Controlling just-in-sequence flow-production. *Logist. Res.*, 2(1): 45–53, 2010.
- [9] Lahmar, M., Ergan, H., Benjaafar, S. Resequencing and feature assignment on an automated assembly line. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 19(1):89–102, 2003.
- [10] Epping, T., Winfried, H. Sorting with line storage systems. In Leopold-Wildburger, U., Rendl, F., Wascher, G.,(Eds.), *Oper. Res. Proc.*, 235–240, 2003.
- [11] Spieckermann, S., Gutenschwager, K., Voß, S. A sequential ordering problem in automotive paint shops. *Int. J. Prod. Res.*, 42(9):1865–1878, 2004.
- [12] Moon, D. H., Kim, H. S., Song, C. A Simulation study for implementing color rescheduling storage in an automotive factory. *Simulation*, 81(9):625–635, 2005.

- [13] Sun, H., Fan, S., Shao, X., Zhou, J. A colour-batching problem using selectivity banks in automobile paint shops. *Int. J. Prod. Res.*, 53(4):1124–1142, 2014.
- [14] Lahmar, M., Benjaafar, S. Sequencing with limited flexibility. *IIE Trans.*, 39(10):937–955, 2007.
- [15] Inman R. R., Schmeling, D. M. Algorithm for agile assembling-to-order in the automotive industry. *Int. J. Prod. Res.*, 41(16):3831–3848, 2003.
- [16] Lim A., Xu, Z. Searching optimal resequencing and feature assignment on an automated assembly line. *J. Oper. Res. Soc.*, 60:361–371, 2009.
- [17] Choi W., Shin, H. A Real-time sequence control system for the level production of the automobile assembly line. *Comput. ind. Engng*, 33(97):769–772, 1997.
- [18] Jayaraman, A., Narayanaswamy, R., Gunal, A. K. A Sortation System Model. *Proc. 1997 Winter Simul. Conf.*, 253–260, 1997.
- [19] Gujjula, R., Hans-Otto, G. Resequencing mixed-model assembly lines under just-in-sequence constraints. *Cacem, I.; Kacem, I. (Eds.), Int. Conf. Comput. Ind. Eng. (CIE 2009)*, 668–673, 2009.
- [20] Franz, C., Hällgren, E. C., Koberstein, A. Resequencing orders on mixed-model assembly lines: Heuristic approaches to minimise the number of overload situations. *Int. J. Prod. Res.*, 52(19):5823–5840, 2014.
- [21] Boysen, N., Golle, U., Rothlauf, F. The Car resequencing problem. *Johannes Gutenberg-University Mainz. Work. Pap. Inf. Syst. Bus. Adm.*, 2010.
- [22] Boysen, N., Golle, U., Rothlauf, F. The car resequencing problem with pull-off tables. *Bur-bus. Res. Off. Open Access J. VHB*, 4(2):276–292, 2011.
- [23] Boysen, N., Zenker, M. A decomposition approach for the car resequencing problem with selectivity banks. *Comput. Oper. Res.*, 40(1): 98–108, 2013.
- [24] Valero-Herrero, L., Garcia-Sabater, M., Vidal-Carreras, J.P., Canos-Daros, P.I. Solving the car resequencing problem with mix banks. *Dir. y Organ.*, 54(36–44), 2014.
- [25] Inman, R. R. ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences. *Int. J. Prod. Res.*, 41(5):847–863, 2003.
- [26] Gusikhin, O., Caprihan, R., Stecke, K. E. Least in-sequence probability heuristic for mixed-volume production lines. *Int. J. Prod. Res.*, 46(3):647–673, 2008.
- [27] Birge, J. R., Louveaux, F. *Introduction to stochastic programming*, Springer, 2011.

- [28] Kall, P., Wallace S. W. Stochastic programming. John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
- [29] Fliedner, M., Boysen, N. Solving the car sequencing problem via Branch & Bound. *Eur. J. Oper. Res.*, 191(3):1023–1042, 2008.
- [30] Kleywegt, A. J., Shapiro, A., Homem-de-mello, T., The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *Soc. Ind. Appl. Math.*, 12(2):479–502, 2001.
- [31] Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, A. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *Eur. J. Oper. Res.*, 167(1):96–115, 2005.
- [32] Mak, W. K., Morton, D. P., Wood, R. K. Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs. *Oper. Res. Lett.*, 24(1):47–56, 1999.
- [33] Birge, J. R. The value of the stochastic solution in stochastic linear programs with fixed recourse. *Math. Program.*, 24:314–325, 1982.
- [34] Maggioni, F., Wallace, S. W. Analyzing the quality of the expected value solution in stochastic programming. *Ann. Oper. Res.*, 200(1):37–54, 2010.
- [35] Gürdal, Z. Indirect or transformation methods (or SUMT Techniques) for n-dimensional constrained minimization. *Design*, 2001.
- [36] Raidl, R. A Unified view on hybrid metaheuristics. *Hybrid Metaheuristics (LNCS 4030)*, 1–12, 2006.
- [37] Talbi, E. G. A Taxonomy of hybrid metaheuristics. *J. Heuristics*, 8(5):541–564, 2002.
- [38] Blum, C., Roli, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35(3):268–308, 2003.
- [39] Akpınar S., Mirac Bayhan, G. A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 24(3):449–457, 2011.
- [40] Blum, C., Puchinger, J. G., Raidl, R., Roli, A. A brief survey on hybrid metaheuristics. *Bioinspired Optim. Methods their Appl. - Proc. 4th Int. Conf. Bioinspired Optim. Methods their Appl. BIOMA 2010*, 3–16, 2010.
- [41] Blum, C., Roli, A., *Hybrid Metaheuristics An emerging approach to optimization*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [42] Talbi, E.-G. *Hybrid Metaheuristics*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2012.

- [43] Fissgus, U. Scheduling using genetic algorithms. Proc. 20th IEEE Int. Conf. Distrib. Comput. Syst., 2000.
- [44] Coley, D. A. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers, World Scientific Publishing, 230, 1999.
- [45] Zinflou, A., Gagne, C., Gravel, M. Crossover operators for the car-sequencing problem, Seventh Eu. Springer-Verlag, 2007.
- [46] Warwick ,T., Tsang, E. P. K. Tackling car sequencing problems using a generic genetic algorithm. *Evol. Comput.*, 3(3):267–298, 1995.
- [47] Warwick T., Tsang, E. P. K. Using a Genetic algorithm to tackle the processors configuration problem. Proc., ACM Symp. Appl. Comput., 217–221, 1993.
- [48] Zinflou, A., Gagné, C., Gravel, M. Genetic algorithm with hybrid integer linear programming crossover operators for the car-sequencing problem. *Inf. Syst. Oper. Res.*, 48(1):23–37, 2010.
- [49] Koza, J. R. Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, 146:26–29, 1992.
- [50] Yen, J., Liao, J. C., Lee, B., Randolph, D. A hybrid approach to modeling metabolic systems using a genetic algorithm and simplex method. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. B. Cybern.*, 28(2):173–191, 1998.
- [51] Gotshall S., Rylander, B. Optimal population size and the genetic algorithm. Proc. Genet. Evol. Comput. Conf., 1–5, 2000.
- [52] Kis, T. On the complexity of the car sequencing problem. *Oper. Res. Lett.*, 32(4):331–335, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Elif Elçin GÜNAY, 21.11.1984'de Eskişehir'de doğmuş, ilk, orta ve lise eğitimini Bilecik, Söğüt'te tamamlamıştır. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünü kazanarak üniversite eğitimine başlamış ve bu bölümden 2007 yılında mezun olarak endüstri mühendisi unvanı almıştır. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2009 yılında tamamlamış ve aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında doktora eğitimine başlamıştır. 2009 yılından beri Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.