**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# MONTAJ ORAN KISITLARI VE RENK KISITLARINI İÇEREN ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM VE UYGULAMA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emek Gamze KÖKSOY**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**Mayıs 2014**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# MONTAJ ORAN KISITLARI VE RENK KISITLARINI İÇEREN ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM VE UYGULAMA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emek Gamze KÖKSOY**
**(507111107)**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN**

**Mayıs 2014**

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507111107 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **EMEK GAMZE KÖKSOY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"MONTAJ ORAN KISITLARI VE RENK KISITLARINI İÇEREN ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM VE UYGULAMA"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde basarı ile sunmustur.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Şule Itır SATOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Ali Fuat GÜNERİ** .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** **30 Nisan 2014**
**Savunma Tarihi :** **28 Mayıs 2014**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmamda beni yönlendiren ve bana her zaman yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN'a,
Bu tezin ortaya çıkmasında katkısı çok büyük olan, yardımlarını asla unutmayacağım Uygar YÜZSÜREN'e
Tez çalışmam süresince her türlü desteğini esirgemeyen Emre ATİKER'e,
Yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyen TÜBİTAK'a,
Son olarak, bugünlere gelmemi sağlayan, beni her konuda destekleyen, bana güvenen, bana inanan ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2014

Emek Gamze Köksoy
(Endüstri Mühendisi)

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ..... **v**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**KISALTMALAR** ..... **ix**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **xi**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **xiii**
**ÖZET** ..... **xvii**
**SUMMARY** ..... **xix**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ** ..... **3**
2.1 Gerçek Araç Sıralama Problemi ..... 3
2.2 ROADEF'2005 Araç Sıralama Problemi ..... 5
2.2.1 Renault araç üretim planlama ve çizelgeleme ..... 6
2.2.2 Problem çözümü ..... 7
2.2.2.1 Çok amaçlı optimizasyon (oran kısıtlarına yüksek öncelik verilmesi) ..... 7
2.2.2.2 Çok amaçlı optimizasyon (renk kısıtlarına öncelik verilmesi) ..... 8
2.2.3 Oran kısıtlarının ihlal sayısının hesaplanması ..... 8
2.2.4 ROADEF araç sıralama probleminin matematiksel modeli ..... 11
**3. LİTERATÜR TARAMASI** ..... **15**
**4. ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİNDE KULLANILAN TEKNİKLER** ..... **21**
4.1 Kısıt Tatmin Problemi(Constraint Satisfaction Problem) ..... 21
4.2 Tamsayılı Lineer Programlama (Integer Lineer Programming) ..... 22
4.3 Yerel Arama Yaklaşımları (Local Search) ..... 24
4.4 Tabu Arama (Tabu Search) ..... 27
4.5 Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing) ..... 27
4.6 Karınca Kolonisi Optimizasyonu(Ant Colony Optimization) ..... 28
4.7 Açgözlü Algoritma (Greedy Algorithm) ..... 30
4.8 Oran Kısıtlarının Oluşturulması ..... 32
**5. GELİŞTİRİLEN METODOLOJİ** ..... **47**
5.1 Başlangıç Algoritması ..... 47
5.2 Yüksek Öncelikli Oran Kısıtlarının Optimize Edilmesi ..... 54
5.2.1 Yer değiştirilecek araçların bölgesel ihlal sayısı değişimlerine göre karar verilmesi ..... 54
5.2.1.1 Tavlama benzetimi yaklaşımı ..... 59
5.2.2 Kısıtların toplam ihlal sayısına etkisine göre yer değiştirilecek araçların karar verilmesi ..... 60
5.3 Renk Kısıtlarının Optimizasyonu ..... 64
**6. UYGULAMA VE ANALİZ** ..... **69**
6.1 Kullanılan Veri Setleri ..... 69
6.1.1 Renault tarafından oluşturulan veri setleri ..... 69
6.1.2 Geliştirilen algoritmada kullanılacak veri setleri ..... 71

6.2 Tavlama Benzetimi Deney Tasarımı ..... 71
6.3 Geliştirilen Algoritmanın Değerlendirilmesi ..... 74
6.3.1 Başlangıç algoritmasının değerlendirilmesi ..... 74
6.3.2 YÖOK optimizasyonu yaklaşımının birinci aşamasının değerlendirilmesi ..... 75
6.3.3 YÖOK optimizasyonu yaklaşımının ikinci aşamasının değerlendirilmesi ..... 77
6.3.4 Renk optimizasyonu yaklaşımının değerlendirilmesi ..... 78
6.3.5 Önerilen yaklaşımların YÖOK ihlal sayısına etkisi ..... 79
6.3.6 Renk optimizasyonuna ek geliştirim ..... 82
6.3.7 Tüm sonuçların ROADEF'2005 sonuçlarına göre değerlendirilmesi ..... 84
**7. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 87**
**KAYNAKLAR ..... 91**
**EKLER ..... 93**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 105**

**KISALTMALAR**

| | |
|---|---|
| **ROADEF** | **:** Société Française de Recherche Opérationnelle et D'aide à la Décision |
| **DDD** | **:** Dinamik Düzgün Dağılım |
| **DST** | **:** Kullanım Oranlarının Dinamik Toplamı |
| **DÖOK** | **:** Düşük Öncelikli Oran Kısıtları |
| **DYK** | **:** Dinamik En Yüksek Kullanım Oranı |
| **FİFO** | **:** İlk Giren İlk Çıkar |
| **HPRC** | **:** High Priority Ratio Constraint |
| **KP** | **:** Kısıt Programlama |
| **KST** | **:** Kullanım Oranlarının Statik Toplamı |
| **KTP** | **:** Kısıt Tatmin Problemi |
| **LPRC** | **:** Low Priority Ratio Constraint |
| **SK** | **:** Sağlanması Kolay |
| **SYK** | **:** Statik En Yüksek Kullanım Oranı |
| **SZ** | **:** Sağlanması Zor |
| **YÖOK** | **:** Yüksek Öncelikli Oran Kısıtları |
| **ÜP** | **:** Üretim Planlama |

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**


**Çizelge 5.1 :** Örnek verisindeki bir önceki günden çizelgelenmiş araçlar. ..... 49
**Çizelge 5.2 :** Örnek verisindeki çizelgelenecek araçlar..... 49
**Çizelge 5.3 :** Örnek verisinde kullanılacak oran kısıtları. ..... 49
**Çizelge 5.4 :** Çizelgelenecek araçların birinci sıra için oluşturdukları ihlal sayısı.. 50
**Çizelge 5.5 :** Örnek veri için F1 değerleri. ..... 51
**Çizelge 5.6 :** Diğer kısıtlar için dinamik kullanım oranları. ..... 52
**Çizelge 5.7 :** Diğer araçlar için F2 değerleri. ..... 53
**Çizelge 5.8 :** Başlangıç algoritması ile oluşturulan örnek veri sırası ..... 55
**Çizelge 5.9 :** İhlal sayılarına göre kısıtların sıralanışı. ..... 61
**Çizelge 5.10 :** Araçların bölgesel ihlal sayıları. ..... 62
**Çizelge 5.11 :** Geçici yer değiştirmeler sonucundaki iyileşmeler. ..... 64
**Çizelge 6.1 :** Kullanılan ROADEF verilerinin özellikleri. ..... 71
**Çizelge 6.2 :** Tavlama benzetimi deney tasarımı sonuçları.. ..... 73
**Çizelge 6.3 :** Başlangıç algoritmasının sonuçları ..... 75
**Çizelge 6.4 :** YÖOK optimizasyonu birinci aşamasının sonuçları. ..... 76
**Çizelge 6.5 :** YÖOK optimizasyonu ikinci aşamsının sonuçları. ..... 77
**Çizelge 6.6 :** YÖOK optimizasyonunun birinci aşama ve ikinci aşamasının performans karşılaştırması. ..... 78
**Çizelge 6.7 :** Renk optimizasyonunun sonuçları. ..... 79
**Çizelge 6.8 :** Toplam iyileşme üzerinden YÖOK iyileşme yüzdeleri. ..... 80
**Çizelge 6.9 :** Toplam ihlal sayısına göre iyileşme yüzdeleri. ..... 81
**Çizelge 6.10 :** Birinci aşama sonucunda verilen ihlal sayısına göre iyileşme yüzdesi... ..... 81
**Çizelge 6.11 :** Renk optimizasyonu için ek geliştirim sonuçları ..... 82
**Çizelge A.1 :** 1 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları. ..... 95
**Çizelge A.2 :** 2 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 96
**Çizelge A.3 :** 3 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 96
**Çizelge A.4 :** 4 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 97
**Çizelge A.5 :** 5 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları. ..... 97
**Çizelge A.6 :** 6 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları. ..... 98
**Çizelge A.7 :** 7 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 98
**Çizelge A.8 :** 8 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 99
**Çizelge A.9 :** 9 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 99
**Çizelge A.10:** 10 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 100
**Çizelge A.11:** 11 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 100
**Çizelge A.12:** 12 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 101
**Çizelge A.13:** 13 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... .101
**Çizelge A.14:** 14 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 102
**Çizelge A.15:** 15 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 102
**Çizelge A.16:** 16 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları ..... 103

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 2.1 :** Üretim hattının aşamaları. ..... 3
**Şekil 2.2 :** Farklı tampon alanı stratejileri: paralel hatların birleştirilmesiyle yeniden düzenleme(a); yeniden çevrim(b); rassal giriş tampon alanı(c). ..... 5
**Şekil 4.1 :** Ekleme örneği..... 25
**Şekil 4.2 :** Yer değiştirme örneği. ..... 25
**Şekil 4.3 :** S Yer değiştirme örneği. ..... 26
**Şekil 4.4 :** T Yer değiştirme örneği. ..... 26
**Şekil 4.5 :** Tersine çevirme örneği. ..... 26
**Şekil 4.6 :** Operatörün çalışma alanındaki hareketi. ..... 33
**Şekil 4.7 :** Bir operatörün istasyonundaki iş yükü. ..... 37
**Şekil 4.8 :** Oran kısıtı ile kısıtlanan istasyon. ..... 38
**Şekil 4.9 :** Oran kısıtı ile aşırı kısıtlanmış istasyon. . ..... 38
**Şekil 4.10 :** Oran kısıtı ile kısıt altında kalan istasyon.. ..... 39
**Şekil 4.11 :** Oran kısıtından etkilenen istasyon. . ..... 39
**Şekil 4.12 :** Bir istasyonunun proses sürelerinin basitleştirilmesi örneği. ..... 42
**Şekil 5.1 :** Geliştirilen algoritmanın ana akış şeması. ..... 48
**Şekil 5.2 :** Çizelgelenecek aracı bulma işlemi örneği. ..... 49
**Şekil 5.3 :** İhlal sayısı hesaplama örneği. ..... 50
**Şekil 5.4 :** Başlangıç algoritmasının akış şeması. ..... 53
**Şekil 5.5 :** Bölgesel ihlal sayısını etkileyecek sıraların başlangıç pozisyonları. ..... 55
**Şekil 5.6 :** YÖOK optimizasyonu birinci aşamasının akış şeması. ..... 57
**Şekil 5.7 :** YÖOK optimizasyonu ikinci aşamasının akış şeması. ..... 63
**Şekil 5.8 :** Renklere ve renk limitine göre gruplama örneği. ..... 65
**Şekil 5.9 :** Renklerine göre araç gruplarının oluşturulması. ..... 66
**Şekil 5.10 :** Renk düzenleme aşamasının akış şeması ..... 67
**Şekil 6.1 :** Renk optimizasyonu için ek geliştirimin akış şeması. ..... 83
**Şekil 6.2 :** Sonuçların ROADEF sonuçlarının medyanlarından sapma grafiği. ..... 84
**Şekil 6.3 :** Sonuçların ROADEF sonuçlarının ortalamalarından sapma grafiği. ..... 85

## SEMBOL LİSTESİ

$\boldsymbol{Alt_i}$ : $i$ İstasyonunun Alt Limit Değeri
$\boldsymbol{B_{i,j}}$ : $i$ İstasyonunda j Aracının Operasyonlarının Başlangıç Zamanı
$\boldsymbol{D}$ : Üretim Günü
$\boldsymbol{D_{az}}$ : $T_{i,j} < T_{süre}$ Süresine Sahip Aracın Sıraya Eklenmesiyle Gecikmedeki Azalma
$\boldsymbol{D_{ek}}$ : $T_{i,j} > T_{çevrim}$ Süresine Sahip Aracın Operatörün İş Yüküne Ekleyeceği Ek Gecikme
$\boldsymbol{D_{max}}$ : Operatörün Yapabileceği Maksimum Gecikme
$\boldsymbol{degisim(y_i)}$ : $y_i$ Pozisyonunda Renk Değişimi Olup Olmama Durumu
$\boldsymbol{DÖOK(\pi)}$ : $\pi$ Sırasında Oluşan Toplam Düşük Öncelikli Oran Kısıtlarına Ait Toplam İhlal Sayısı
$\boldsymbol{d(v_j, v_i)}$ : İki Araç Arasındaki Farklı Özellik Sayısı
$\boldsymbol{F}$ : Renk Kümesi
$\boldsymbol{F_{i,j}}$ : $i$ İstasyonunda $j$ Aracının Operasyonlarının Bitiş Zamanı
$\boldsymbol{f_p}$ : Etki Oranı
$\boldsymbol{f_{p_i}}$ : Etki Faktörü
$\boldsymbol{f_{p_i,k}}$ : $k$ İstasyonundaki Etki Faktörü
$\boldsymbol{f_z}$ : Renk
$\boldsymbol{g_{b_{y_i}}}$ : $y_i$ Pozisyonuna Atanan Araç Sınıfını
$\boldsymbol{ihlal(o_k, y_i)}$ : Her $o_k$ Kısıtı İçin $y_i$ Pozisyonundan Başlayan Sıralarda Oluşan İhlal Sayısı
$\boldsymbol{ihlal(\pi, o_k)}$ : $\pi$ Sırasında $o_k$ Kısıtına Ait Toplam İhlal Sayısı
$\boldsymbol{\kappa(\pi)}$ : Araç Sıralama Probleminin Amaç Fonksiyonu
$\boldsymbol{Max_j(T_{i,j})}$ : $j$ İstasyonunun Maksimum İşlem Yapılacak Süre
$\boldsymbol{N_{g_b}}$ : $g_b$ Sınıfına Ait Araç Sayısı
$\boldsymbol{O}$ : Oran Kısıtı Kümesi
$\boldsymbol{o_k}$ : Oran Kısıtı
$\boldsymbol{p_i}$ : $y_i$ Pozisyonu ile $y_{i-1}$ Pozisyonu Arasında Robot Temizliği Olma Durumu
$\boldsymbol{p(o_k)/q(o_k)}$ : $o_k$ Oran Kısıtının Değeri
$\boldsymbol{q_{max}}$ : Verilen Oran Kısıtlarının Maksimum $o_k$ Değeri
$\boldsymbol{renk(\pi)}$ : $\pi$ Sırasında Oluşan Renk Kısıtlarına Ait Toplam İhlal Sayısı
$\boldsymbol{r(f_z, y_i)}$ : $y_i$ Pozisyonundaki Araç $f_z$ Rengine Sahip Olma Durumu
$\boldsymbol{r(g_b, f_z)}$ : $g_b$ Sınıfının $f_z$ Özelliğine Sahip Olup Olmama Durumu
$\boldsymbol{r(g_b, o_k)}$ : $g_b$ Sınıfının $o_k$ Özelliğine Sahip Olup Olmama Durumu
$\boldsymbol{r(g_b, y_i)}$ : $g_b$ Araç Sınıfının $y_i$ Pozisyonuna Atanma Durumu
$\boldsymbol{r(v_j, o_k)}$ : $v_j$ Aracının $o_k$ Kısıtına Sahip Olup Olmama Durumu
$\boldsymbol{r(v_j, f_z)}$ : $v_j$ Aracının $f_z$ Rengine Sahip Olup Olmama Durumu
$\boldsymbol{r(y_i, o_k)}$. : $y_i$ Pozisyonundaki Aracın $o_k$ Özelliğine Sahip Olma Durumu

$\boldsymbol{r(\pi, o_k)}$ : $\pi$ Sırasında $o_k$ Kısıtına Sahip Araç Sayısı
$\boldsymbol{T_b}$ : $T_{i,j} > T_{çevrim}$ Sürelerine Sahip Araçların En Yüksek $T_{i,j}$ Değeri
$\boldsymbol{T_k}$ : $T_{i,j} < T_{çevrim}$ Sürelerine Sahip Araçların En Yüksek $T_{i,j}$ Değeri:
$\boldsymbol{T_{çevrim}}$ : Çevrim Süresi
$\boldsymbol{T_{i,j}}$ : $i$ İstasyonunda $j$ Aracında Yapılacak Operasyonların Süresi
$\boldsymbol{U_{i,j}}$ : Operatörün $i$ İstasyonunda $j$ Aracının İşlemleri İçin Yardıma İhtiyaç Duyma Durumu
$\boldsymbol{Ust_i}$ : $i$ İstasyonunun Üst Limit Değeri
$\boldsymbol{V}$ : Araç Kümesi
$\boldsymbol{V_{c_k}}$ : $c_k$ Kriterine Sahip Araçların Kümesi
$\boldsymbol{V_{p_i}}$ : İşlem Süresi Çevrim Süresinden Fazla Olan Araçların Kümesi
$\boldsymbol{v_j}$ : Araç
$\boldsymbol{v_{nest}}$ : Karınca Algoritmasında Herhangi Bir Özelliği Bulunmayan Araç
$\boldsymbol{W}$ : $D$ Üretim Gününde Çizelgelenecek Araç Sayısı
$\boldsymbol{w(o_k)}$ : $o_k$ Kısıtının Ağırlığı
$\boldsymbol{w_{renk}}$ : Amaç Fonksiyonundaki renk Kısıtı Amacının Ağırlığı
$\boldsymbol{w_{DÖOK}}$ : Amaç Fonksiyonundaki DÖOK Kısıtı Amacının Ağırlığı
$\boldsymbol{w_{YÖOK}}$ : Amaç Fonksiyonundaki YÖOK Kısıtı Amacının Ağırlığı
$\boldsymbol{X}$ : Kısıt Tatmin Problemine Ait Değişken Kümesi
$\boldsymbol{x_i}$ : Kısıt Tatmin Problemi Değişkeni
$\boldsymbol{Y}$ : Pozisyon Kümesi
$\boldsymbol{YÖOK(\pi)}$ : $\pi$ Sırasında Yüksek Öncelikli Oran Kısıtlarına Ait Toplam İhlal Sayısı
$\boldsymbol{y_i}$ : Pozisyon
$\boldsymbol{\pi}$ : Herhangi Bir Araç Sırası
$\boldsymbol{\tau}$ : Feromon Faktörü
$\boldsymbol{\tau(v_j, v_i)}$ : $(v_j, v_i)$ Köşesindeki Feromon Miktarı
$\boldsymbol{\tau_{min}}$ : Feromen İzleri İçin Alt Sınır
$\boldsymbol{\tau_{max}}$ : Feromen İzleri İçin Üst Sınır
$\boldsymbol{\eta}$ : Sezgisel Faktörü
$\boldsymbol{\eta DDD(v_j)}$ : Dinamik Düzgün Dağılım Fonksiyonu
$\boldsymbol{\eta DYK(v_j)}$ : Dinamik Kullanım Oranı Fonksiyonu
$\boldsymbol{\eta DST(v_j)}$ : Kullanım Oranlarının Dinamik Toplamı Fonksiyonu
$\boldsymbol{\eta KST(v_j)}$ : Kullanım Oranlarının Statik Toplamı Fonksiyonu
$\boldsymbol{\eta SYK(v_j)}$ : Statik Kullanım Oranı Fonksiyonu
$\boldsymbol{\rho}$ : Buharlaşma Parametresi

## MONTAJ ORAN KISITLARI VE RENK KISITLARINI İÇEREN ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM VE UYGULAMA

## ÖZET


Bir otomotiv fabrikası öncelikle sacların şekillendirilerek ve birleştirilerek aracın gövdesinin oluşturulduğu kaynak atölyesi, gövdenin korozyona karşı direncinin artırıldığı, sızdırmazlık ve izolasyonunun sağlandığı, boyanarak makyajının yapıldığı boyahane ve aracın kompanentlerinin takıldığı montaj atölyesi olmak üzere üç ana üretim atölyesinden oluşur.

Her bir ana atölyenin bir üretim günü içerisinde araçları düzenleyerek sağlaması gereken kısıtları vardır. Bu kısıtlar kaynak ve montaj atölyelerinde oldukça benzerdir, iş yükü fazla olan araçların iş yükü daha az olan araçlar ile aralıklandırılarak iş yükünün dengelenmesi ile ilgilidir. Araç sıralama problemi de her bir üretim atölyesinin kısıtlarının sağlandığı üretim sırasının ouşturulmasıdır. Gerçek hayatta üretim atölyeleri arasındaki tampon(buffer) alanlarında bir üretim atölyesinden gelen araçların bir sonraki üretim atölyesine o atölyenin kısıtlarına uygun şekilde düzenlenerek verilmesiyle bu problem çözülmektedir.

Literatürde 1986'da ilk olarak oran kısıtlarını içeren montaj atölyesi kısıtlarının optimizasyonu problemi olarak ele alınmıştır. Daha sonra bu kısıtlara renk kısıtları da dahil edilmiştir. Renault tarafından sunulan bir araç sıralama problemi ROADEF(SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE ET D'AIDE À LA DÉCISION) tarafından 2005 yılında yarışma konusu olarak belirlenmiştir.

Renault'un ROADEF için önerdiği problem montaj ve renk kısıtlarını içermektedir. Montaj kısıtları ardışık sıralanmış $q$ tane araçta ilgili kısıta veya özelliğe sahip maksimum $p$ tane araç bulunabilir anlamına gelen $^{p}/_{q}$ şeklindeki oran kısıtları şeklinde belirlenmiştir ve bu oran kısıtları önemine göre yüksek öncelikli(YÖOK) ve düşük öncelikli (DÖOK) oran kısıtları olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Boyahanede ise hem renk değişikliği durumunda robotların temizliği hem de belli bir sayıda ardışık aynı renk araçlar boyandıktan sonra renk kalitesinin sürekliliği açısından tekrar robotların temizlenmesi için kullanılan solventin maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Bundan dolayı da renk kısıtları renk değişimlerinin ve renk limitini aşan sayıda ardışık aynı renk aracın boyanmasının minimize edilmesidir. Yani sonrasında renk değişikliği yapılacak araç grubunun sayısının renk limitine eşit olması en ideal durum olacaktır. Amaç fonksiyonu önceliklerine göre renk ihlal sayısının minimize edilmesi, yüksek öncelikli oran kısıtı ihlal sayılarının minimize edilmesi ve düşük öncelikli oran kısıtlarının minimize edilmesidir. Amaç fonksiyonundaki amaçlar optimize edilirken daha öncelikli olan amaç için bulunan çözümü kötüleştirmemelidir.

Bu çalışmada ROADEF senaryolarından birinci öncelikli olarak yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının azaltılacağı, ikinci öncelikli olarak da renk kısıtları ihlal sayılarının azaltılacağı amaç fonksiyonunun optimizasyon problemi ele alınmıştır ve bu problem için sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir. Oran kısıtlarının optimizasyonu için öncelikle açgözlü algoritma tabanlı bir başlangıç algoritması kullanılmıştır. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının optimizasyonu için iki aşamalı sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir. Birinci aşamanın temeli araçlar yer değiştirildiğinde bulundukları pozisyonların etkili oldukları ihlal sayıları açısından iyileştirilmesidir. İkinci aşamada ise oluşan ihlal sayıları pareto prensibine dayanarak ihlal sayısına etkisi en fazla olan araçların %20'sinin diğer araçlarla yer değiştirilerek ihlal sayısında %80 azalma hedeflenmektedir. Bir sonraki algoritma ise yüksek öncelikli oran kısıtı ihlal sayısını kötüleştirmeden renk kısıtı ihlal sayılarını iyileştiren sezgisel yaklaşımdır. Burada şöye bir yaklaşım izlenmiştir. Çizelgelenmiş araç sırasındaki araçlar renklerine göre bulundukları sıra değiştirilmeden gruplandırılır, aynı zamanda aynı renk araç grubundaki araç sayısı renk limitini aşıyorsa iki grup olarak ayrılır. Birinci gruptan başlamak üzere bir araç grubu seçilir ve diğer araç gruplarının yanına eklenir, hem YÖOK ihlal sayısını kötüleştirmiyorsa hem de renk ihlal sayısını iyileştiriyorsa bu sıra değişimi kabul edilir.

Geliştirilen algoritma programlanmış ve ROADEF'2005 verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Toplam sonuçlara bakıldığında ROADEF'2005 de finalistlerin elde ettiği sonuçların aralığında değerlere ulaşılmıştır. Başlangıç algoritmasının ilk başta sonucu kötüleştirmesine rağmen tüm sonuç için etkisinin oldukça önemli olduğu görülmüştür. Bazı veriler için başlangıç algoritması ile ROADEF ile bulunan en iyi sonuçlara da ulaşıldğı görülmüştür. Süre açısından değerlendirildiğinde ise verinini içerdiği araç sayısı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Başlangıç algoritması çalıştırıldığında iyileşme sayısının %80'i, başlangıç algoritması çalıştırılmadığında ise çoğu veride %100'ü YÖOK optimizasyonunun birinci aşaması ile sağlanmıştır. YÖOK optimizasyonunun ikinci aşamasınının birinci aşama ile birlikte çalıştırıdığında hiçbir etkisinin olmadığı, tek başına çalıştırıldığında ise çok daha kısa sürede birinci aşamaya yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Renk optimizasyonunun renk ihlal sayısını azaltmasına rağmen YÖOK ihlal sayısı açısından daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi ihlal sayısını iyileştirdiği sürece renk ihlal sayısının artmasına izin verilmesidir. Bazı veriler için renk optimizasyonunun birinci aşamadan daha etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda gelecek çalışmalarda başlangıç algoritmasına renk kısıtları ile ilgili kontroller eklenerek sıranın renk kısıtları açısından çok fazla kötüleştirilmemesi sağlanabilir. YÖOK optimizasyonu ikinci aşamasının etkiniliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılabilir. Yer değiştirilecek araç çiftleri veya başka bir pozisyona eklenecek araç gruplarının belirlenmesinde rassal seçimler algoritmaya eklenebilir. Renk optimizasyonu YÖOK optimizasyonuna daha uygun hale getirilebilir. Ayrıca renk optimizasyonunda yapılan araç gruplarının ekleme yöntemiyle yerlerinin değiştirilmesi YÖOK açısından oldukça iyi sonuçlar vermektedir, araç grupları şeklinde yer değiştirme hamleleri YÖOK optimizasyonuna entegre edilebilir.

Bunların dışında ileriki çalışmalarda renk kısıtları ihlal sayısının minimize edilmesinin birinci öncelikli olduğu araç sıralama problemi için yeni yaklaşımlar önerilebilir.

## A HEURISTIC FOR CAR SEQUENCING PROBLEM INCLUDING ASSEMBLY RATIO CONSTRAINTS AND COLOR CONSTRAINTS AND APPLICATION


### SUMMARY

A car factory contains three main work shops; body shop, paint shop and assembly shop. At body shop body is built up by forming sheets, At paint shop corrosion resistance of the body is increased, insulation and sealing is provided for body and body is made up by painting and at assembly shop different components of the vehicles are installed.

Each of these work shops have its own constraints which have to be met in a production day. These constraints are very similar for body shop and assembly shop because of various working days along the production line install different components and options and related with line balancing by spacing out heavy work load vehicles with the soft work load vehicles. While the body shop produces different chassis like with high roof, medium roof or sliding door, lift gate etc., the assembly shop installs components like air conditions or door glass. Some constraints for body shop and assembly shop as follows: Maximum $l$ cars can have the component $c$ in a sun roof of $m$ vehicles, in a production day maximum $l$ vehicles which have sliding door are allowed to produce. The paint shop constraint is that at most s cars with the same color can be arranged consecutively and the number of color changes has to be minimised. First reason of this constraint is to minimize the consumption of paint solvent which is used to wash spray guns each time the paint color is changed. Also, usage of solvent pollutes the environment. Second, the spray gun has to be cleaned after a given number of cars even if these cars have the same color to preserve painting quality. Since washing the spray gun is a unpleasant, cleaning spray guns would be got imprecise when the same colour would be used continiously. Therefore the color has to be changed after washing spray guns. Car sequencing problem is to schedule vehicles by meeting constraints of each work shops but sequencing the vehicles with line balancing and reduces costs body shop and assembly shop according to paint shop constraints can be expensive. Because of this, in real life between work shops there are buffer areas to arrange vehicles according to next work shop constraints.

Car sequencing problem first handled in the literature is optimization of assembly constraints including ratio constraints. After that color constraints are integrated to assembly constraints. In 2005 Renault proposed a car sequencing problem for ROADEF Challange.

The car sequancing problem which is proposed by Renault includes assembly and paint shop constraints. Assembly constraints are ratio constraints which are defined as $p/q$. This constraint means that no more than $p$ cars which have component related with the ratio constraint are allowed can be sequenced in $q$ consequtive cars.

In this problem ratio constraints are divided to two types: high priority ratio constraints (HPRC) and low prority ratio constraints(LPRC). Paint shop constraints are defined as above. Because of consumption of solvent when washing spray guns, minimisation of color changes and minimisation of vehicle groups which have the number of vehicles bigger than batch size. This means that after a group of vehicles in the same color which have batch size lenght it is allowed to change color. The objective function is to minimize violation of high priority ratio constraint, low priority ratio constraint and paint shop costraints according to their priority. When the objective which has $O$ priority in the function optimize, it is not allowed to deteriorate solution of objective which has $O-1$ priority. ROADEF proposed different objective function scenerios for this problem.

In this study the ROADEF scenerio in which high priority ratio constraints are primary, color constraints are secondary is tackled and heuristc approaches are proposed. For optimization of ratio constraints, an initial algorithm based on greedy algorithm is used. In this algorithm cars are selected to new list which contains D-1 cars, cars are evaluated acccording to number of violations when the car is added to new list. The car which created minimum violation is selected as next car. It continious until all of the cars are added to new list. After initial algorithm the main ratio constraint optimization algorithm is proposed. This algorithm has two stages. First one is related with swap of cars according to their number of regional violations in their positions. Regional violation is total violation of sub-sequences in which the car is located in. When a couple of cars swap, both of the regional violations change are positive, this cars are accepted as candidate cars, at the end the couple of cars which is candidate and recover the objective function at most are swapped permanently. Not to restrict the search space, simulated annealing is integrated to this algorithm and a couple of cars which their regional violations change are negative are accepted as candidate cars with a possibility. The second stage of this algorithm is related with Pareto Principle. By calculating effects of the cars to total violation, %20 cars which affect at most swap with other cars and it is aimed to reduce %80 of total violation. The last approach is related with color arrangement to recover color constraints violations. In this approach, cars are grouped according to their colors and batch size after that it is created new solutions by insertion of car groups. The main purpose in this approach not to deterioate high priority ratio constraints violations, but it is allowed to deterioate color constraints violations if high priority ratio constraints violations decrease.

The developed algorithm was coded and ROADEF'2005 data sets were used to evaluate. According to results, it is achieved the range of results which is achieved by ROADEF finalists. Although the initial algorithm deteriote the high priority ratio constraint violations, it is seen that the effect of the initial algorithm to total result is seriously important. For some datas it is achieved the best ROADEF results. If it is evaluated from the point of run time, it is directly proportional with the number of cars in data. %80 recovery of HPRC violations in whole algorithm when the initial algorithm is run, %100 recovery of HPRC violations in total when the initial algorithm is not run is obtained by first stage of HPRC optimization approach. When the HPRC optimization second stage is run after first stage, it is not effective to recover violations, but when first stage and second stage are compared seperately, it is achieved results close to results of first stage in a shorter time by second stage. Although color optimization is proposed to minimize color violations, it is more effective for HPRC violations. The reason of this situation is about that it is allowed

to deteriote color violations if HPRC violations are recovered. For some datas, color optimization approach is more effective than HPRC optimizatio first stage.

In next studies, firstly for this algorithm it can be studies performance improvement. The couple of cars for swap and selection of the vehice group for insertion and position for to insert can be selected with randomly in some part of the algorithm. Besides, initial algorithm deteriote the color constraint violations, because of that the results about color constraint violation for solutions which is found with algorithm including initial algorithm are worse. New controls about color constraints can be added to initial algorithm. Second stage of HPRC optimization can be improved for efficiency. Besides, group insert at color optimization is so efficient for HPRC optimization, in next studies group insert moves can be integrated to HPRC optimization algorithm

Finally in next studies the car sequencing problem in which color constraint has first priority can be handled.

# 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi 19. yüzyılın sonlarında hızla gelişmeye başlamıştır. Petrol türevi yakıtlarla çalışan motorların icadı ve bunların arabaya dönüştürülmesi Avrupalı ve Amerikalı mühendisler tarafından yoğun çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeler sonrasında ortaya çıkan ticari ürünün üretilebilmesi için de bir takım çalışmalar yürütülmeye devam etmiştir. Ransom Olds tarafından 1902 yılında ilk büyük ölçekli araba üretimi başlamıştır. 1914 yılında ise Henry Ford montaj hattı şeklinde üretim yöntemleri geliştirerek seri üretimi bir adım öteye taşımıştır. Bu gelişmeler sonucunda 15 dakikada bir araç üretme başarısı daha önceki üretim yöntemlerine göre seri üretimin başarısını ortaya koymuştur. Fakat boya hattının üretimde dar boğaza yol açmasından ötürü sadece kolay kuruyan siyah arabalar üretilmiştir. Henry Ford 'un meşhur sözü "Siyah olmak kaydıyla istediğiniz renkte otomobil sahibi olabilirsiniz" bu darboğazın aşılamamasından dolayı söylenmiştir. 1920 yılından beri araba üreticileri seri üretim olarak arabalarını üretmeye devam etmektedir.

2. Dünya Savaşı'na kadar otomotiv sektörü hem Avrupa'da hem de Amerika'da gelişmeye devam etmiştir. Günümüzde varlığını sürdüren birçok şirketin temelleri bu dönemde atılmıştır. 2. Dünya Savaşı ve yaşanan krizler sektörün gelişmesini yavaşlatsa da daha sonra artan bir hızla büyümeye devam etmiştir. Uzak doğulu üreticilerin de küresel pazarda yer almaya başlamasıyla rekabet ortamı iyice kızışmıştır. Daha kaliteli ve daha ucuz araba üretmek şirketlerin hedefi olmuştur. Bu hedef doğrultusunda üretim sistemleri de gelişim göstermiştir. Ayrıca üretici firmaları destekleyen tedarikçi firmaların da artan talepleri karşılamak ve istenilen kalite hedeflerini tutturulmasını sağlamak için belirli standartlarda üretim yapma zorunluluğu getirilmiştir.

Günümüzde otomotiv endüstrisi rekabetin yüksek olduğu, çok fazla ürün çeşitliliğine sahip ve kısa ürün hayatıyla birlikte oldukça zorlu bir endüstri kolu haline gelmiştir. Artan tüketici talepleri ve kalite beklentileri şirketlerin üretim yöntemlerini iyileştirmeleri için itici bir güç olmuştur. Üretim hatlarındaki verimliliğin arttırılması

için yapılan çalışmalar otomotiv sektöründe incelenmesi gereken geniş bir alan yaratmıştır. Bu alanlardan bir tanesi de üretim planlama sistemleridir. Gelen müşteri taleplerini karşılamak için fabrikaların mümkün olduğunca esnek çalışması zorunlu hale gelmiştir. Bu esnekliği sağlamak için de araçların en uygun şekilde sıralanması da uygulanan yöntemler arasındandır.

Bu çalışmada araç sıralama problemi için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir.

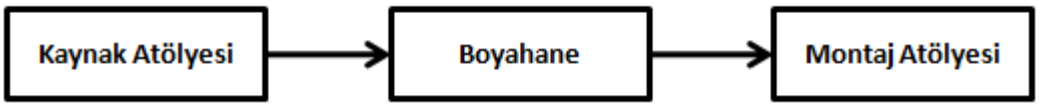
Bu tez yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde araç sıralama problemi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Öncelikle gerçek araç sıralama probleminin ne olduğundan daha sonra da bu çaışmada ele alınacak olan ROADEF'2005'de Renault'un önerdiği araç sıralama problemi anlatılmıştır ve matematiksel modeli verilmiştir. Üçüncü bölümde araç sıralama problemi için literatür taraması yapılmıştır, dördüncü bölümde ise araç sıralama probleminin ele alındığı yaklaşımlar incelenmiştir. Beşinci bölümde montaj oran kısıtları ve renk kısıtlarını içeren araç sıralama problemi için geliştirilen metodoloji ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Altıncı bölümde geliştirilen sezgisel yaklaşım programlanmış ve ROADEF'2005'in uygun verileriyle çaıştırılıp sonuçlar analiz edilmiştir. Son bölümde ise, çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileride yapılabilecek yeni çalışmalar önerilmiştir.

# 2. ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİ

Bu bölümde Araç Sıralama Problemi detaylı bir şekilde ele alınacaktır. İlk olarak gerçek hayattaki araç sıralama probleminden bahsedilecek, daha sonra da bu tez de kullanılacak olan ROADEF'in 2005 yılında yarışma için önerdiği araç sıralama probleminin üzerinde durulacaktır. Bölüm sonunda da problemin matematiksel tanımı verilecektir.

## 2.1 Gerçek Araç Sıralama Problemi

Bir otomotiv fabrikası üç ana üretim atölyesinden oluşur. Sacların birleştirilerek gövdenin meydana getirildiği kaynak atölyesi, gövdelerin boyanıp makyajlandığı boyahane ve her araca ekipmanlarının veya çeşitli özelliklerinin takıldığı montaj atölyesi (Şekil 2.1). Araç sıralama problemi, üretim boyunca bu üç atölyedeki işlemleri daha kolay hale getirecek araç sıralamasına karar verilmesidir (Estellon ve diğ, 2007). Her bir üretim atölyesinin kendi kısıtları vardır ve bu kısıtlar birbirleriyle çatışabilir. Problemin bu kısıt zorluğundan dolayı daha önceki çalışmalarda sadece montaj hattı ele alınmıştır. Fransız Yöneylem Topluluğu'nun organize ettiği ROADEF'2005 (SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE ET D'AIDE À LA DÉCISION)'de Renault tarafından montaj hattının ve boya atölyesinin kısıtlarının birlikte ele alındığı daha karmaşık bir problem sunulmuştur.




**Şekil 2.1 :** Üretim hattının aşamaları.

Kaynak ve monyaj atölyesi için belirlenen kısıtlar birbirleriyle çok benzer olmasına rağmen boyahane kısıtları daha farklıdır (Prandstetter ve Raidl, 2007). Montaj ve kaynak atölyesi için belirlenen bazı kısıtlar aşağıdaki gibidir (Prandstetter, 2005):

- Kayar kapılı $m$ tane araçtan maksimum l tanesinde $c$ bileşeni olmalıdır
- $m$ araçtan oluşan her bir alt sırada $c$ bileşenine sahip $l$ tane araç olmalıdır

- $c_1$ bileşenine sahip araçtan sonra $c_2$ bileşenine sahip araç gelmemelidir.
- $c$ bileşenine sahip aracı $c$ bileşenine sahip olmayan en az $l_{min}$ tane araç takip etmelidir.

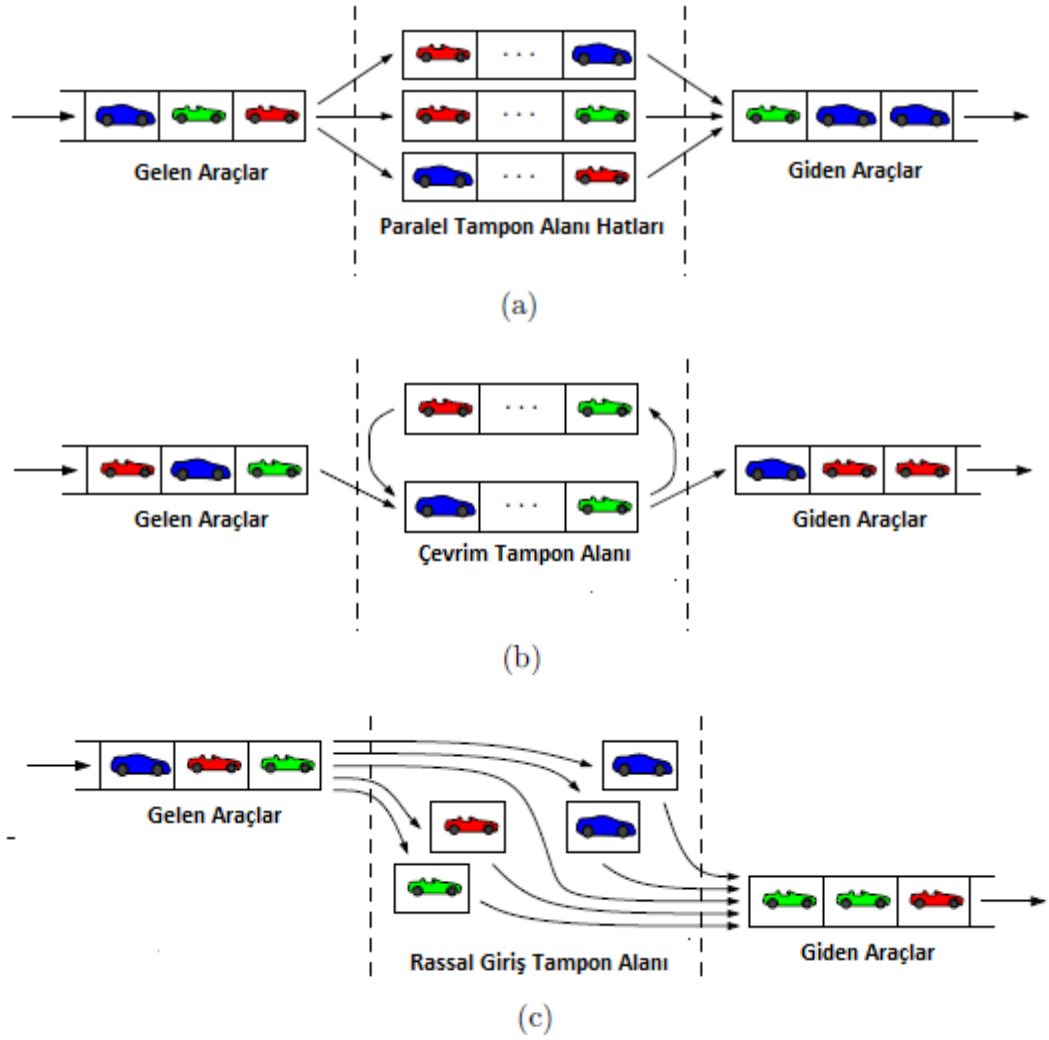
Buna karşılık boyahane için sadece bir kısıt tanımlanmıştır (Prandstetter, 2005):

- Aynı renge sahip maksimum $s$ tane araç arka arkaya dizilmelidir.

Bu kısıtı sağlarken renk değişimleri de minimize edilmelidir. Bunun iki nedeni bulunmaktadır: Birincisi robotların boya püskürten ekipmanının temizlenmesi gerektiğinden renk değişimi hem para hem de zaman açısından pahalıdır aynı zamanda çevreyi kirletir. İkincisi belirli sayıda araç boyandıktan sonra ise kalite açısından boya ekipmanı temizlenmelidir. Eğer bu ekipman belirli sıklıkta temizlenmezse boya yapışır ve boya sonuçlarının hatalı olmasına neden olur. Temizleme işi oldukça yorucu bir işlem olduğundan dolayı eğer aynı renk arka arkaya kullanılırsa temizlik işlemi özenli ve dikkatli yapılamayacağından temizleme işleminden sonra başka bir renge geçilmesi daha faydalıdır.

Kaynak atölyesinde boyahane ile ilgili ya da tam tersi boyahanede kaynak atölyesi ilgili hem düşük maliyetli hem de iş yükünün dengeli olduğu bir düzenlemenin yapılması oldukça maliyetlidir. Bu durumun üstesinden gelmek için atölyeler arasına tampon(buffer) alanları yerleştirilmiştir, bunlar üretim prosesleri süresince araçların sürekli düzenlenmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 2.2a, paralel hatlı tampon alanını göstermektedir. Araçların geldiği hattın sonunda, gelecek olan aracın hangi tampon alanı hattına konulacağına karar verilir. Araçların gideceği hat ise bu paralel hatlardan alınan araçlarla doldurulacaktır. İlk Giren İlk Çıkar (FİFO) stratejisine göre çalışır. Şekil 2.2b'de ki çevrim, araçların sirkülasyonuna izin verir. Bu metot genellikle araçların tamir edilmesi gerekiyorsa kullanılır. Eğer araç düzgün bir şekilde montajlanamazsa, dizilimden çıkarılır. Problem düzeltildikten sonra araç yeni bir pozisyona eklenir. Şekil 2.2c'deki yerleşim ise tampon alanındaki tüm araçlara rassal giriş sağlar.




**Şekil 2.2 :** Farklı tampon alanı stratejileri: paralel hatların birleştirilmesiyle yeniden düzenleme(a); yeniden çevrim(b); rassal giriş tampon alanı(c) (Prandstetter, 2005, Sf. 4)

## 2.2 ROADEF'2005 Araç Sıralama Problemi

ROADEF Challange Yöneylem Araştırması Fransız Topluluğu tarafından organize edilmektedir. Amacı endüstrinin son gelişmelere şahit olmasını, araştırmacıların ise sektörde meydana gelen gerçek problemlerle yüzleşmesini sağlamaktır.

Renault 2005 yılında, 1993'den beri tavlama benzetimi (simulated annealing) tabanlı programlarıyla çözdükleri araç sıralama problemini ROADEF için önermiştir.

Renault tarafından önerilen araç sıralama problemi standart problemden farklıdır. Oran kısıtlarının yanı sıra boya kısıtlarını da içermektedir ve oran kısıtlarını öncelik durumlarına göre iki kategoriye ayırmaktadır.

ROADEF'2005 araç sıralama problemi NGUYEN tarafından 2005 yılında yayınlanmıştır. Bu bölümde ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

### 2.2.1 Renault araç üretim planlama ve çizelgeleme

Bölüm 2.1'de belirttiğimiz gibi bir araç üç ana atölyede işlem görerek üretilir. Her bir atölyenin günlük görevi montaj hattının oran kısıtlarına ve müşteri teslim tarihlerine göre sipariş edilmiş araca tek günlük bir üretim periyodu atamaktır. İkinci görevleri ise her üretim günü için kaynak, boya ve montaj atölyelerinin ihtiyaçlarını karşılayacak en iyi araç sıralamasını bulmaktır. Oluşturulan araç sırasına göre araçlar ana atölyelere gönderilir.

Bu yarışma ve bu çalışma için varsayımlar şu şekildedir: Sadece boya ve montaj kısıtları ele alınır, kaynak kısıtları üretim gününü çizelgelemek için önemli değildir. Atama kararları birinci adımda kural dışına çıkamaz. Bu planlama ve çizelgeleme süreci Renault tarafından birinci adımı lineer programlama ikinci adımı ise tavlama benzetimi kullanan bir program ile yapılmaktadır.

**Boyahane kısıtları:** Yukarıda belirtildiği gibi boya robotu ekipmanının her renk değişiminden sonra ve boyanın kaliteli olması için aynı renkte olsa bile düzenli aralıklarla temizlenmesi gerekmektedir. Boyahane kısıtlarının amacı bu temizlik esnasında kullanılan solventin minimize edilmesidir.

**Montaj atölyesi kısıtları:** Montaj atölyesinin temel amacı montaj hattındaki farklı çalışma istasyonlarının iş yükünün dengelenmesidir. Bu amacı gerçekleştirmek için karmaşık işlemler gerektiren araçların üretim sırasında belli bir aralıkla dizilmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle üretimi zor araçların yoğunluğu istasyonların iş yükünü dengelemek için sınırlandırılmalıdır. Bu da $p/q$ oran kısıtları ile sağlanır. Birçok durumda tüm oran kısıtları sağlanamamıştır. Bundan dolayı oran kısıtları hafif kısıtlar olarak ele alınır ve optimizasyonun amacı oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesidir.

**Montaj atölyesi kısıtlarının öncelik sınıfları:** Standart araç sıralama problemi sadece oran kısıtlarını ele alır. Renault iki ana sebepten dolayı hem renk değişimlerini hem de oran kısıtlarını ele alır. Birincisi Renault tedarik zinciri stratejisine göre boyahane ve montaj atölyesi aynı araç sırasını sürecine dahil eder. İkincisi ise bu iki amaç arasında bir uzlaşma bulmaktır. Montaj hattındaki işgücü gereksinimlerini sınırlandıran oran kısıtlarını en iyi şekilde sağlamanın mı ya da

işgücü maliyetini artırıp solvent tüketimini minimize edecek araç rengini optimize etmenin mi daha avantajlı olacağı işgücü maliyetlerine bağlı olarak değişir.

Montaj ve boyayı kolaylıkla dengelemek için yüksek öncelikli oran kısıtları(YÖOK) ve düşük öncelikli oran kısıtları(DÖOK) olmak üzere iki türde oran kısıtı tanımlanmıştır: Yüksek öncelikli oran kısıtları montaj atölyesindeki kritik operasyonlar için, düşük öncelikli oran kısıtları ise daha az kritik operasyonlara karşılık gelir ve bu kısıtlar iş yükünü dengelemek için tanımlanmıştır.

### 2.2.2 Problem çözümü

Boyahane ve montaj kısıtlarını en iyi şekilde sağlayacak bir araç sırası oluşturulması gerekmektedir. Otomotiv fabrikaları tarafından 2 strateji kullanılmaktadır:

***Oran kısıtlarına yüksek öncelik verilmesi:*** Montaj hattı kısıtları boyahane kısıtlarından daha önceliklidir.

***Boya renk limitlerine yüksek öncelik verilmesi:*** Boyahane kısıtları montaj kısıtlarından daha kritiktir.

#### 2.2.2.1 Çok amaçlı optimizasyon (oran kısıtlarına yüksek öncelik verilmesi)

Bir üretim günü içerisinde araçları sıralamak için yüksek öncelik seviyesinden düşük öncelik seviyesine aşağıdaki amaçlar optimize edilmelidir ve her birinin optimizasyonu yapılırken bir önceki amaç için bulunan ihlal sayısı kötüleştirilmemelidir.

1. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi
2. Renk değişimlerinin minimize edilmesi
3. Düşük öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi

Ya da;

1. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi
2. Düşük öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi
3. Renk değişimlerinin minimize edilmesi,

Ya da;

1. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi
2. Renk değişimlerinin minimize edilmesi

Bazı fabrikalar düşük öncelikli araç kısıtı açıklamamaktadır. Bu çalışmada yüksek öncelikli oran kısıtları ve renk değişimlerinin minimize edildiği optimizasyon problemin ele alınmıştır.

#### 2.2.2.2 Çok amaçlı optimizasyon (renk kısıtlarına öncelik verilmesi)

Bir üretim günü içerisinde araçları sıralamak için yüksek öncelik seviyesinden düşük öncelik seviyesine aşağıdaki amaçlar optimize edilmelidir ve her birinin optimizasyonu yapılırken bir önceki amaç için bulunan ihlal sayısı kötüleştirilmemelidir.

1. Renk değişimlerinin minimize edilmesi
2. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi
3. Düşük öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi

Ya da;

1. Renk değişimlerinin minimize edilmesi
2. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısının minimize edilmesi

Amaçlar arasında ödün verilmemelidir: $O+1$ önceliğine sahip amacın optimizasyonu $O$ önceliğine sahip amaç optimizasyonunun sonucundan kötü olmamalıdır.

### 2.2.3 Oran kısıtlarının ihlal sayısının hesaplanması

$p/q$ oran kısıtı için en iyi çözüm herhangi ardışık $q$ tane araç sırasında o kısıta sahip en fazla $p$ tane aracın olduğu üretim çizelgesidir. $1/q$ kısıtı için en iyi çözüm bu kısıta sahip herhangi iki aracın arasında en az $q-1$ tane bu kısıta sahip olmayan araçın olduğu üretim çizelgesidir. Örneğin 1/5 oran kısıtı için A'nın bu oran kısıtına sahip araçlar ve '_' bu oran kısıtına sahip olmayan araçlar olduğunu düşünürsek; A_ _ _ _A bu kısıt için kabul edilebilir bir sıradır.

Eğer oran kısıtı ihlali olmayan bir sıra oluşturulamıyorsa, kısıtlanan araçlar çizelgelenen araçlar içerisinde mümkün olduğunca ayrık konumlandırılmalıdır. Amaç montaj hattı boyunca iş yükünün dengelenmesidir. Kısıtlanan araçların aralıklandırılarak dağılımı bir üretim gününün çevrim sıralarındaki oran kısıtı ihlallerinin hesaplanmasıyla sağlanması çalışılır. Kısıtlanan araçların bir sırası için bu kısıtlanan araçlar ne kadar az aralıklandırılırsa, daha fazla ihlal oluşacaktır.

Çünkü birden çok çevrim sırası vardır ve her çevrim sırasında daha fazla ihlal var olabilir.

Örnek verirsek;

Oran kısıtı $1/5$ olursa 5 araçtan oluşan sıralar için ihlal sayıları şu şekildedir:

_ _ _ A _ _ _ A : _ _ _ A _ _ _ A işaretli sıradan dolayı 1 tane ihlal var

_ _ _ A _ _A _: çevrim sıralarına göre ise _ _ A _ _A _ ve _ _ _ A _ _A _ sıralarına gore 2 ihlal vardır

Bir sıradaki ihlal sayısı

= (sıradaki oran kısıtı ile ilgili özelliğe sahip araçların sayısı)-(oran kısıtının pay değeri)

Eğer (sıradaki oran kısıtı ile ilgili özelliğe sahip araçların sayısı)< (oran kısıtının pay değeri) ise

=0

Bu ihlal sayısı hesaplaması $1/q$ ve $p/q$ oran kısıtlarına uygulanabilir.

Örnek verirsek;

$1/5$ oran kısıtı için

_ _ AA _ _ A _: sarı ile işaretli sırada 3( kısıtlanan araç)-1(oran kısıtı pay değeri)=2 ihlal oluşmuştur

Optimizasyon probleminin amacı üretim gününün çevrim sıralarında oluşacak tüm oran kısıtı ihlal sayılarının toplam değerini minimize etmektir.

$D$ üretim günü çizelgelenirken, $D-1$ gününün son çizelgelenmiş araçları da hesaba dahil edilir. Bu çevrim sıralarının $D-1$ üretim gününden başlaması gerektiği anlamına gelir. Bir $p/q$ oran kısıtı için, ilk çevrim sırası $D-1$ gününün son $q-1$ çizelgelenen aracını ve $D$ üretim gününün ilk aracını içine alır fakat şu unutulmamalıdır ki $D-1$ üretim günü çizelgelenmiştir ve bu sıradaki araçların pozisyonları değiştirilemez.

Örnek verirsek, 1/5 oran kısıtı için ilk çevrim sırası

AAAAAAB_ _ _ _ olsun.

A: $D-1$ gününde çizelgelenen son araçlar

B: $D$ gününün ilk çizelgelenen araç

$D$ günü çizelgelenirken $D+1$ günü gözardı edildiğinden dolayı bir $p/q$ oran kısıtı için $D$ gününün son çevrim sırası $D$ gününün sondan $q$ çizelgelenmiş aracını içerir. Bu son çevrim sırası $l-q$ pozisyonundan başlar. $l$; $D$ gününün 0 dan $l-1$ pozisyonuna kadar sıralanmış üretilecek araç sayısıdır.

$D+1$ günü $D$ günü çizelgelenirken ihmal edilir fakat her oran kısıtı için $D$ gününün son araçlarından oluşan ihlallerin hesaplanması istenir.

Bir $p/q$ oran kısıtı için son çevrim sıraları $q-1$ ile $p+1$ arasında uzunluklara sahip olacaktır. Eğer bu çevrim sıralarının birinde oran kısıtının özelliğine sahip araçların sayısı $p$'den büyükse $D+1$ gününün ilk çizelgelenen aracı oran kısıtı ile ilişkili olsun ya da olmasın ihlal oluşur.

Bu hesaplama metodu $D$ gününün son $q-1$ aracında ortaya çıkan ihlallere önceki araçlarda oluşan ihlallerle aynı ağırlık verilmesine imkan verir.

1/5 oran kısıtı için son çevrim sıraları aşağıdaki gibidir.

BBBBBBBB

BBBBBBBB

BBBBBBBB

**'Sağlanması Kolay' ve 'Sağlanması Zor' yüksek öncelikli oran kısıtları**

Renault yüksek öncelikli oran kısıtlarını 'Sağlanması Kolay(SK)' ve 'Sağlanması Zor(SZ)' olarak iki senaryo şeklinde sunmuştur. Bu durumun aday çözümlerin değerledirilmesi üzerinde etkisi vardır. Bu sınıflandırma düşük öncelikli oran kısıtlarına uygulanmaz.

Eğer oran kısıtı ihlalinin oluşmayacağı bir araç listesi veriliyorsa bu senaryo 'Sağlanması Kolay' yüksek öncelikli oran kısıtları senaryosu olarak adlandırılır.

Eğer oran kısıtı ihlalinin olduğu bir araç listesi veriliyorsa bu senaryo 'Sağlanması Zor' yüksek öncelikli oran kısıtları senaryosu olarak adlandırılır. Bu durum ilgili kısıta sahip araçların sayısı oran kısıtlarını aşıyorsa ortaya çıkar. Örneğin, araç listesinin %25'i ilgili kısıta sahip araçları içeriyor ve yüksek öncelikli oran kısıtı 1/5 ise ihlal oluşur.

### 2.2.4 ROADEF araç sıralama probleminin matematiksel modeli

Bu çalışmada ROADEF araç sıralama problemi ele alındığı için bu probleme ait matematiksel model oluşturulmuştur.

- $V = \{v_{-(q_{max}-2)}, \dots, v_{-1}, v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ bir önceki günden çizelgelenmiş araçların ve üretilecek araçların kümesidir. İlk $q_{max} - 1$ araç bir önceki günden gelen çizelgelenmiş araçlardır. Burada $q_{max}$ değeri verilen oran kısıtları içerisindeki maximum $q(o_k)$ değeridir.

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ ise herhangi bir araçta olası özelliklere ait oran kısıtları,

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_l\}$ herhangi bir araçta bulunabilecek renk kümesi,

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_a\}$ herhangi bir aracın sırada bulunabileceği pozisyon kümesidir.

Her bir özellik ile ilgili $o_k$ , $k = 1,2,3, \dots, m$ kısıtı $p = O \to V$ ve $q = O \to V$olmak üzere $q(o_k)$ tane araçtan oluşan her araçta $o_k$ kısıtına sahip en fazla $p(o_k)$ tane araç bulunmasına karar veren iki fonksiyondan oluşmaktadır ve $p(o_k)/q(o_k)$ ile gösterilmektedir.

Tüm renkler için $p(f_z) = s$ ve $q(f_z) = s + 1$ 'dir. Burada $s$, ardışık olarak dizilmesine izin verilecek aynı renkteki maximum araç sayısıdır.

Her bir $j = -(q_{max} - 2), \dots, 0,1,2,3, \dots, n$, $k = 1,2,3, \dots, m$ ve $z = 1,2,3, \dots, l$ için eğer bir $v_j$ aracı $o_k$ kısıtına sahipse $r(v_j, o_k) = 1$, aksi takdirde $r(v_j, o_k) = 0$'dır. Eğer bir $v_j$ aracı $f_z$ rengine sahipse $r(v_j, f_z) = 1$, aksi takdirde $r(v_j, f_z) = 0$'dır.

Denklem 2.1 iki araç arasındaki farklı özellik sayısını göstermektedir.

$$d(v_j, v_i) = \sum_{o_k} |r(v_j, o_k) - r(v_i, o_k)| \qquad \textbf{(2.1)}$$

z tane aracın oluşturduğu sıra $\pi = \langle v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_z} \rangle$ , $\{j_1, j_2, \dots, j_z\} \subseteq \{1,2, \dots, n\}$ ile gösterilmektedir. $\pi_1$ ve $\pi_2$ gibi iki sıranın birleşimi, $\pi_2$'nin $\pi_1$'i takip ettiği $\pi_1|\pi_2$ şeklinde gösterilir. Her bir $k = 1,2,3, \dots, m$ için, $\pi = \langle v_{j_1}, v_{j_2}, \dots, v_{j_z} \rangle$ sırasında $o_k$ kısıtına sahip araçların toplamı Denklem 2.2'deki gibidir.

$$r(\pi, o_k) = \sum_{l=1}^{z} r(v_{j_l}, o_k) \qquad \textbf{(2.2)}$$

Her bir $k = 1,2,3, \dots, m$ için, $W \subseteq V$ sırasında $o_k$ kısıtına sahip araçların toplamı Denklem 2.3'de gösterilmiştir

$$r(W, o_k) = \sum_{v_j \epsilon W} r(v_j, o_k) \quad \textbf{(2.3)}$$

Burada $W$ çizelgelenecek araçları göstermektedir. Her bir $k = 1,2,3, \dots, m$ için $o_k$ özelliğinin kullanım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$kullanım\ oranı\ (o_k) = \left(\frac{r(W, o_k)}{|W|}\right) / \left(\frac{p(o_k)}{q(o_k)}\right) \quad \textbf{(2.4)}$$

Bir $o_k$ özelliğinin kullanım katsayısı çizelgelenecek araçlardaki $o_k$ özelliğine sahip araçların sayısı ve çizelgelenmiş araçların sayısının oranının $o_k$ özelliğine ait oran kısıtına bölünmesiyle bulunur (Denklem 2.4). Bundan dolayı eğer herhangi bir özellik için kullanım katsayısı 1'den büyükse araç talebi üretim kapasitesinden büyüktür ve çözümde en az bir bir tane ihlal oluşur. Eğer kullanım oranı çok küçük veya sıfıra yakınsa montaj hattındaki kapasiteye göre çok daha az bir talep vardır.

Amaç fonksiyonu ise $\pi$ sırasının değiştirilerek $\kappa(\pi)$ fonksiyonunun minimize edilmesidir. $\kappa(\pi)$ fonksiyonu Denklem 2.5 ile tanımlanmıştır. $w_{renk}, w_{YÖOK}$ ve $w_{DÖOK}$ değerleri amaç fonksiyonundaki amaçların ağırlık değerleridir. Bu değerler amaçların önceliğine göre $10^6$, $10^3$, 1 değerlerini almaktadır. Örneğin amaçların öncelik sırası $w_{YÖOK}, w_{renk}$ ve $w_{DÖOK}$ şeklinde ise $w_{YÖOK} = 10^6, w_{renk}=10^3$ ve $w_{DÖOK} = 1$'dir.

$$\kappa(\pi) = \left(w_{renk} * renk(\pi)\right) + \left(w_{YÖOK} * YÖOK(\pi)\right) + \left(w_{DÖOK} * DÖOK(\pi)\right) \quad \textbf{(2.5)}$$

$$YÖOK(\pi) = \sum_{k=1}^{m} \sum_{\substack{\pi' \\ |\pi'|=q(o_k) \\ \pi' \subseteq \pi}} max\{0, r(\pi', o_k) - p(o_k)\} \quad \textbf{(2.5a)}$$

$$boya(\pi) = \sum_{i=1}^{n} degisim(y_i) + \sum_{z=1}^{|l|} \sum_{\substack{\pi' \\ |\pi'|=q(f_z) \\ \pi' \subseteq \pi}} max\{0, r(\pi', f_z) - p(f_z)\} \quad \textbf{(2.5b)}$$

$$degisim(y_i) = \begin{cases} 1 & i\ pozisyonunda\ renk\ değişimi\ varsa \\ 0 & aksi\ takdirde \end{cases} \quad \forall i \epsilon \{1,2, \dots, n\} \quad \textbf{(2.5c)}$$

Burada Denklem 2.5c ile tanımlanan $değişim(y_i)$, $y_i$ pozisyonunda meydana gelen renk değişimini gösterir.

Oysa ki literatürde tanımlanan araç sıralama problemi $\pi$ sırasındaki araçların değiştirilerek $\kappa(\pi)$ fonksiyonunu oran kısıtlarıyla minimize etmektir.

$$\kappa(\pi) = \sum_{k=1}^{m} \sum_{\substack{\pi' \\ |\pi'|=q(o_k) \\ \pi' \subseteq \pi}} ihlal(\pi', o_k) \quad \textbf{(2.6)}$$

Burada $ihlal(\pi', o_k)$ değeri (2.7) ile tanımlanmıştır.

$$ihlal(\pi', o_k) = \begin{cases} 0 & ihlal(\pi', o_k) \leq p(o_k) \\ 1 & aksi\ takdirde \end{cases} \quad \textbf{(2.7)}$$

## 3. LİTERATÜR TARAMASI

Araç sıralama problemi ilk olarak Parrello ve Kabat(1986) tarafından ele alınmıştır. Bir montaj hattında bir gün içerisinde üretilecek olan araçların sıralanmasıdır. Her araç farklı özelliklere sahip olabilir. Örneğin, bir araç plastik tavan, klima ve otomatik açılıp kapanan pencere özelliklerini gerektirirken, bir diğeri bu özelliklerin hiçbirini gerektirmeyebilir. Montaj hatları, hat boyunca her araca her olası özelliğin yeterli sürede montajlanabilmesi için yeteri kadar yavaş hareket edecek şekilde tasarlanabilir fakat bunun gibi bir yaklaşım çok pahalıya mal olacağından her bir özellik için, o özelliğe sahip araçların o özelliğe sahip olmayan araçlara oranını ele alacak şekilde tasarlanır (Parello ve Kabat, 1986).

Drexl ve Kimms (2001) araç sıralama probleminin karar versiyonu için bir tamsayılı programlama modeli önermiştir. Bu model bir pozisyondaki aracın bir araç sınıfına ait olup olmadığına karar verilmesi ile ilgili 0-1 değişkenlerine dayanır. Lineer kısıtlar ile şunlar sağlanır: i) bir araç sınıfı her pozisyona atanabilir, ii) her bir sınfa ait bütün araçlar herhangi bir pozisyona atanabilir, iii) bütün oran kısıtları her bir araç özelliği için sağlanabilir. Araçların pozisyonları bu sınıfa ait olan bir sırasının seçildiğinde bir olmasıyla ilgili 0-1 değişkenlerinin üstel sayısına dayanan ikinci bir tamsayılı programlama modeli de önerilmiştir. Alt ve üst sınırlar kolon yaratma metodu ile hesaplanır.

Gottlieb ve diğ. (2003) araç sıralama problemi için açgözlü(greedy), yerel arama(local search) ve karınca kolonisi optimizasyonu (ant colony optimization) yaklaşımlarını karşılaştırmıştır. Bu algoritmalar araç sıralama probleminin iki test verisi için değerlendirilmişlerdir. Birinci set, açgözlü algoritmalarla bile çözülebilecek kolay örnekleri içerir. İkinci set ise daha zor örnekleri içermektedir. Açgözlü algoritmalarda ihlal sayısını minimum yapan aday araçlar arasından seçim yapabilmek için sezgiseller önerilmiştir. Açgözlü algoritmalar arasında dinamik değişkenler açıkça kendilerinin statik muadillerinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Yinelenen açgözlü algoritma ise Dinamik En Yüksek Kullanım Oranı ve Kullanım Oranlarının Dinamik Toplamı kullanıldığında beklenmedik bir şekilde iyi sonuçlar

vermektedir. Gottlieb ve diğ. bu çalışmada jenerik karınca kolonisi optimizasyonunu araç sıralama problemine uyarlanacak şekilde geliştirmişlerdir. Bu yeni algoritmada feramon en iyi araçlar arasında eşitliği bozmak için kullanıldığından bu algoritma seçkinci bir strateji kullanmaktadır. Çalışmalarında Puchta ve Gottlieb'in (2002) çalışmasındaki yerel arama yaklaşımını ele almıştırlar. Rassal seçilen bir hareket değerlendirilir ve sonuç kalitesini kötüleştirmiyorsa bu hareket kabul edilir ve uygulanır. Aksi takdirde hareket reddedilir ve mevcut çözümde başka bir hareket denenir. Bu üç çalışmadan en iyi sonuçları dinamik sezgisellerle kombine edilen karınca kolonisi optimizasyonu vermiştir.

Kis(2004) araç sıralama probleminin NP-zor olduğunu kanıtlamıştır ve güçlü sezgide NP-zor olduğunu, genel durumda ise NP'ye ait olmadığını göstermiştir. Bu durum şuradan gelir; bir araç sıralama problemi her farklı araç sınıfı için bu sınıflara ait araç sayısı ve bu araçların gerektirdiği özelliklerin verilmesiyle kodlanabilir. Bu kodlama ile birlikte aynı araç sınıfındaki araç sayısı oldukça fazla olabilir ve çözümün (|V| araç sınıflarının bir sırası) uzunluğu örneğin uzunluğundaki polinom ile sınırlandırılamaz. NP için yeterli bir koşul sunmak yerine daha önceki iddia olan NP-tam'ın doğru olmadığını göstermiştir ve aynı zamanda sözde polinomiyel algoritma sağlamışlardır.

Gagne ve diğ.(2006) boya ve montaj atölyelerinde çizelgeleme yapmak için tek amaçlı matematiksel model önermişlerdir. Ayrıca çok amaçlı denklem çözümü için karınca kolonisi algoritması sezgiseli önermişlerdir. Bu çalışmada araç sıralama problemi için üç konuda katkıda bulunulmuştur; modelleme, çözüm motoru ve sayısal sonuçlar. Araç sıralama problemi literatürde genellikle tipik montaj atölyesi içindir fakat bu çalışmada hem boya atölyesi hem de oran kısıtlarını içeren montaj atölyesi için modelleme yapılmaktadır, bu da çözümün zorluğunu artırmaktadır. Renault fabrikalarında montaj hattının sıralama problemi amaçların önceliğine karar verme ve bu amaçlardan ödün vermeme şeklindedir. Bu noktadan yola çıkarak Gagne ve diğ. planlama periyotları arasındaki, bağlantı noktasını hesap eden üç adet tek amaçlı tamsayılı lineer programlama modeli önermişlerdir. Sayısal testlerde bu modellerin sınırlı kaldığı ve sezgisel yaklaşımların gerektiği görülmüştür. Gagne ve diğ. aynı zamanda araç sıralama problemi için yeni ve etkili bir çözüm motoru sunmuşlardır. Bu çözüm motoru karınca kolonisi optimizasyonunun bir örneğidir ve etkili dönüşüm kuralları içermektedir. Bu kurallar çözüm motorunun özünü teşkil

etmektedir. Boya ve montaj kısıtlarının aynı anda sağlanmasını gerektiren çok amaçlı bir fonksiyonu ele alır. Gerçek sektör probleminde karınca kolonisi optimizasyonu yaklaşımı pratikte o zamana kadar kullanılmakta olan Chew ve diğ.'nin tavlama benzetimi yaklaşımından daha üstün sonuçlar vermiştir. Hesaplama süresi mantıklı sonuçlar vermekle birlikte, hem çözüm süresi hem de kalitesi birçok testte oldukça stabildir. Tamsayılı lineer programlamanın aksine karınca kolonisi optimizasyonu mantıklı süreler içerisinde bir çözüm üretmiştir.

Solnon (2008) oran kısıtlarından oluşan araç sıralama problemi için iki farklı feromon yapısı önerdiği bir karınca kolonisi algoritması sunmuştur. İlk feromon yapısı iyi araç sıralarını öğrenmeyi amaçlar, ikincisi ise kritik araçları öğrenmeyi amaçlar. İki feromon yapısı karşılaştırıldığında birbirlerini tamamlayıcı bir performans ortaya çıkmıştır ve birlikte çalıştırıldıklarında çoğu örnekte çok hızlı bir çözüme ulaştığı görülmüştür.

Estellon ve diğ. 2007'deki 'Two local search approaches for solving real-life car sequencing problems' adlı çalışmalarında Renault'un araç sıralama problemi için iki adet yerel arama yaklaşımı önermişlerdir. Bu yaklaşımların ikisi de basit bir iniş sezgiseline entegredir. Birinci yaklaşım büyük ölçekli komşuluk aramasına dayanan yeni bir yaklaşımdır ve orjinal tamsaylı lineer programlama modeline dayanır. Estellon ve diğ.(2007) bu yaklaşımda Renault'un kısıtlarına ve amaç fonksiyonuna odaklanmıştır. İkinci yaklaşımda yerel arama yaklaşımına sadık kalınmıştır. Gottlieb ve diğ.(2003) ve Puchta ve Gottlieb (2002) 'nin çalışmalarından esinlenerek küçük komuşuluk aramalarla daha hızlı sonuçlar almaya yönelik çalışılmıştır. Bu çalışmalara iki şekilde katkıları olmuştur, birincisi Renault araç sıralama problemindeki boya kısıtlarına ve amaç fonksiyonuna uyarlanmıştır, ikincisi ise değişimlerin komşuların değerlendirilmesini ne kadar hızlandırdığını ve arama uzayını farklılaştırmak açısından katkılarını göstermiştir. Bu yaklaşım ROADEF'2005'i kazanmalarını sağlayan yaklaşımdır. Algoritma her iterasyonda mevcut dizilimi çok yerel olarak değiştirecek şekilde uygulanır. Eğer dönüşümde iyileşme sağlanıyorsa yani boya kısıtlarına uygunsa ve mevcut çözümün maliyetini artırmıyorsa, bu dönüşüm uygulanır. Çalışmanın sonucunda ikinci yaklaşımın araç sıralama problemi için daha uygun olduğu görülmüştür. Muhtasar uygulamalar harici bir kütüphane kullanmadan(tamsayılı lineer programlama kütüphanesi gibi) hızlı bir şekilde iyi sonuçlar almayı sağlamıştır. Ayrıca yerel optimuma pratikte çok nadiren

karşılaşıldığından bu yaklaşım çok büyük ölçekli komşuluk arama kadar uygundur. Birinci yaklaşım ise dal-sınır prosedürü ve simplex algoritmasıyla hızlandırılmalıdır sonucuna varılmıştır.

Briant ve diğ. (2008) ROADEF'2005 araç sıralama problemini tavlama benzetimi ile çözmeye çalışmıştır. Her bir amacı öncelik sırasına göre ve bir üst öncelikli amaçta bozulmaya sebep olmadan ele alır. Geniş bir hareket kümesi bulunmaktadır ve bu hareketlerin seçimini de verilen bir örnek için her bir hareketin başarı oranını dikkate alan dinamik olasılıklarla yapmaktadır. Algoritma iki fazdan oluşmakadır. Birinci faz ilk kriteri optimize etmek için kullanılan açgözlü algoritmadır. İki açgözlü algoritma uygulanmaktadır; birincisi renk değişimlerinin minimize edilmesi, ikinci ise oran kısıtı ihlallerinin minimize edilmesidir. İkinci faz ise adım adım ilgili kriterin minimizasyon işlemidir. Bu algoritmada bir önceki yani daha önemli olan kriteri kötüleştiren çözüm, aynı zamanda aynı kriter için de daha kötü çözüm kesinlikle kabul edilmemektedir. Klasik tavlama benzetimindan farklı olarak kabul edilme olasılığı dinamik olarak hesaplanmaktadır.

Cordeau ve diğ. (2008) 'Iterated tabu search for the car sequencing problem' çalışmalarında boya ve montaj kısıtlarının sağlanması gerektiği araç sıralama problemi için yinelenen tabu arama sezgiseli önermişlerdir. Bu sezgisel klasik tabu arama ile yerel optimumdan kaçmaya yardımcı olan karıştırma operatörlerinin bir araya getirmektedir. Algoritma 1000'den fazla aracın yer aldığı test örneklerinde 1 saniyeden az bir süre içerisinde uygun çözümler çıkarma anlamında oldukça sağlamdır. Buna rağmen Renault'2005'in en iyi algoritmalarından daha kötü sonuçlar vermiştir fakat çok hızlı bir şekilde bu algoritmaların sonuçlarına çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Basitlik ve sağlamlık gerektiren durumlara kolaylıkla uyarlanabilir. Ayrıca bu algoritma çok daha gelişmiş algoritmalarda olası başlangıç çözümleri oluşurmak için kullanılabilir.

Prandstetter ve Raidl (2008), 'An integer linear programming approach and a hybrid variable neighborhood search for the car sequencing problem' adlı çalışmalarında üretim hattında herhangi bir $q(o_j)$ tane araçtan oluşan bir alt sırada $o_j$ özelliğine sahip maximum $p(o_j)$ tane araç olabilecek şekilde düzenlemeyi sağlamayı amaçlayan bir araç sıralama problemi için iki yaklaşım önermişlerdir. Birinci metot tamsayılı lineer programlama(integer lineer programming) tabanlıdır. İkinci yaklaşım ise hibrit bir metottur; geniş komşuları değerlendirmek için değişken komşuluk

arama(variable neighbourhood search) çerçevesinde tamsayılı lineer programlamayı kullanır. Önerilen tamsayılı lineer programlama yaklaşımının 300 araca kadar örneklerin çözümünde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Literatürdeki mukayese edilebilir yaklaşımlardan önemli ölçüde daha kısa süreler elde edilmiştir. İkinci yaklaşım tamsayılı lineer programlama aracılığı ile geniş komşulukların araştırılması avantajı sunmaktadır. Bu açıdan faydalı olmasına rağmen hesaplama açısından maliyetli olduğu görülmüştür. Prandstetter ve Raidl bu yaklaşımı daha hızlı arama yapan geleneksel komşu aramalarla kombine etmiştir.

Gavronovic 2008 yılında renklerin de dahil edildiği araç sıralama problemi için bir çözüm metodu önermiştir. Bu çalışmada başlangıç sırası için açgözlü algoritma ve renklerin dahil edildiği araç sıralama problemi için uyarlanan değişken komuşuluk arama yaklaşımı önermişlerdir. Tabu sezgiseli de değişken komşuluk arama ile sağlanan sonuçları iyileştirmek için kullanılmaktadır. Daha sonra araçlar kısıtlarıyla birlikte harfsel olarak ifade edilir ve oran kısıtlarının ihlal sayılarını kötüleştirmeden renk limiti kısıtını iyileştirmek için algoritma harfleri heceler. Bu algoritma ROADEF 2005'de A ve B veri seti örnekleri için 64 en iyi sonuçtan 19'u dışında başarılı olmuştur. Bu algoritmanın en güçlü özelliği hem bütün örnekler için bozulmadan çalışması hem de en iyi sonuca çok yakın çözümü birkaç saniye içerisinde ulaşmasıdır.

Golle ve diğ.(2010) istasyon başına iki veya daha fazla prosesin gerçekleştirildiği araç sıralama problemlerinin kurallarının oluşturulması için yeni yaklaşımlar önermişlerdir. Araç sıralama problemi birden fazla araç modelinin üretildiği montaj hatlarında farklı araç modellerinin nasıl sıraya konulacağına karar verir ve belli bir uzunluktaki sıralarda yoğun işleri kısıtlayan sıralama kurallarını uygulayarak istasyonların iş yükünü dengelemeye çalışır. Bundan dolayı fazla iş yükünden kaçınmak için bu sıralama kurallarının kullanılması gereklidir. Golle ve diğ. (2010) sadece varolan sıralama kuralını oluşturma yaklaşımının fizibil sıraları yanlış sınıflandıran sıralama kurallarına neden olduğunu göstermiştir ve birden fazla araç sıralama kuralları oluşturarak bu soruna engel olacak yeni bir prosedür geliştirmişlerdir. Daha sonra da bu iki prosedürün istasyon başına birden fazla prosesin gerçekleştirildiği durumlara nasıl uygulanacağını göstermiştir.

Joly ve Frein (2008) hem montaj kısıtlarını hem de boya atölesi kısıtlarını içeren araç sıralama problemini ele almıştır. İlk yaklaşım tek-amaçlı problemi çözmek içindir.

Bir sezgisel (sıra oluşturma algoritması) ve 3 meta-sezgisel (tavlama benzetimi, değişken komşuluk arama ve bir genetik algoritma) önerilmektedir ve karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmanın endüstriyel kapsamından dolayı uygun çözümün seçilmesinde hesaplama süresi önemli bir faktördür.

# 4. ARAÇ SIRALAMA PROBLEMİNDE KULLANILAN TEKNİKLER

## 4.1 Kısıt Tatmin Problemi(Constraint Satisfaction Problem)

Araç sıralama problemi çözümü çalışmalarının çoğu karar problemlerini Kısıt Programlama(KP) ile ele alır ve çıktısı tüm oran kısıtlarının sağlandığı bir çözüm ya da bir çözümün olmadığını gösteren bir hata uyarısıdır (Solnon ve diğ., 2008). Buna rağmen Bergen ve diğ. (2001) sağlanması gereken zor kısıtları ve maliyeti ihmal edilebilen hafif kısıtları içeren özel bir araç sıralama problemi için kısıt tabanlı bir yaklaşım önermiştir.

Bir kısıt tatmin problemi(KTP) aşağıdaki verilerden oluşur

- Değişken kümesi $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
- Her bir $x_i$ değişkeninin değerlerinin domain kümesi $D$
- Değişkenlerin değerlerini sınırlandıran kısıtlar

Araç sıralama probleminin fizibil çözümü her bir değişkene kısıtları sağlayan bir değerin atanmasıdır, bu durumda problem tatmin edilebilirdir, kısıtların sağlanması için domain kümesinden herhangi bir değer atanamadığı durumda ise tatmin edilebilir değildir.

Değişkenleri ve amaç fonksiyonu tanımlanan bir problemde şunların bulunması istenebilir:

- Herhangi bir önceliği olmayan bir çözüm
- Tüm çözümler
- Bir optimal veya en azından iyi bir çözüm

KTP'nin çözümü için önerilen algoritmalar fizibil çözüm bulmayı amaçlamasına rağmen optimal çözümü bulmak için de uyarlanabilir. Örneğin amaç fonksiyonu için bir amaç değişkeni yaratılabilir, bir başlangıç çözümü oluşturulur ve daha sonra başlangıç çözümünden daha iyi olması gereken amaç değişkeninin değerini belirleyen yeni bir kısıt oluşturulur. Bu her bir çözüm bulunduğunda amaç değişkenindeki kısıt daraltılarak problem tatmin edilemez olana kadar tekrarlanarak

devam eder: bulunan son çözüm optimal çözümdür. İterasyon sayısı dolayısıyla algoritmanın çalışma süresi başlangıç çözümünün kalitesine bağlıdır.

Araç sıralama problemi klasik kısıt tatmin problemlerinden biridir. Dincbass ve diğ. 1988 yılında araç sıralama problemini kısıt tatmin problemi olarak şu şekilde ele almıştır(Brailsford ve diğ., 1999): Daha önceden de belirtildiği gibi çizelgelenecek araçlar aynı özellikteki araçların yer aldığı sınıflara ayrılır. $G = \{g_1, g_2, \dots, g_s\}$ araçların ait olduğu sınıf kümesidir ve $b = \{1,2, \dots, s\}$ olmak üzere $g_b$ ile gösterilir. $g_{b_{y_i}}$, $y_i$ pozisyonuna atanan araç sınıfını gösterir ve $g_{b_{y_i}} \in \{g_1, g_2, \dots, g_a\}$'dir. $r(y_i, o_k)$ değişkeni ise $y_i$ pozisyonundaki araç $o_k$ özelliğine sahipse 1 aksi takdirde 0 değerini alır. $r(g_b, o_k)$, eğer $g_b$ sınıfı $o_k$ özelliğini içeriyorsa 1, aksi takdirde 0 değerini alır. Bölüm 2 ve Bölüm 3'deki tanımlanan değişkenler de geçerli olmak üzere kısıtlar şu şekilde tanımlanmıştır:

$$g_{b_{y_i}} = y_i \text{ ve } r(g_b, o_k) = 1 \rightarrow r(y_i, o_k) = 1$$
$$i = 1,2, \dots a \quad k = 1,2,3, \dots, m \quad b = 1,2, \dots, s \tag{4.1}$$

$$|\left\{k | g_{b_{y_i}} = y_i\right\}| = N_{g_b} \quad i = 1,2, \dots a \tag{4.2}$$

$$\sum_{l=0}^{q(o_k)-1} r(y_{i+l}, o_k) \leq p(o_k) \tag{4.3}$$

$$i = 1,2, \dots |V - q(o_k) + 1| \tag{4.4}$$

$$k = 1,2, \dots |O| \tag{4.5}$$

Alternatif modelde ise her bir araç için bir değişken bulunmaktadır ve bu değişkenlerin değerleri $\{1,2, \dots, |V|\}$ araçların sıra içerisindeki pozisyonlarını gösterir. Bu değişkenlerin değerler olduğu ya da tam tersi olan çifte formülasyonun bir türüdür ve oluşabilecek simetrik çözümleri açısından bir dezavantaja sahiptir.

## 4.2 Tamsayılı Lineer Programlama (Integer Lineer Programming)

Gravel ve diğ.(2005) araç sıralama problemi için tamsayılı lineer programlama yaklaşımı önermişlerdir

Bölüm 2'de tanımlanan değişken ve parametrelere ek olarak aşağıdaki tanımların yapılması gerekmektedir:

$r(g_b, y_i)$ değişkeni $g_b$ araç sınıfı $y_i$ pozisyonuna atanmışsa 1 aksi takdirde 0 değerini alır.

$r(o_k, y_i)$, $y_i$ pozisyonundan başlayan $q(o_k)$ sayısındaki araç sırasında maximum $p(o_k)$ kadar $o_k$ kısıtından etkilenen araç var ise 1 aksi takdirde 0 değerini alır.

$M$, en büyük $(q(o_k) - p(o_k))$ değeridir.

$N_{g_b}$ ise bir $g_b$ sınıfındaki araç sayısıdır

$$Min\ \kappa(\Pi) = \sum_{k=1}^{|O|} \sum_{i=1}^{|V|-q(o_k)+1} r(o_k, y_i) \quad \textbf{(4.6)}$$

Şöyle ki,

$$\sum_{b=1}^{|G|} r(g_b, y_i) = 1 \quad i = \{1,2,\dots,|V|\} \quad \textbf{(4.7)}$$

$$\sum_{i=1}^{|V|} r(g_b, y_i) = N_{g_b} \quad b = \{1,2,\dots,|G|\} \quad \textbf{(4.8)}$$

$$\sum_{b=1}^{|G|} \sum_{l=i}^{i+q(o_k)-1} r(g_b, o_k) * r(g_b, y_l) \le p(o_k) + M * r(o_k, y_i)$$
$$k = \{1,2,\dots,|O|\} \text{ ve } i = \{1,2,\dots,|V| - q(o_k) + 1\} \quad \textbf{(4.9)}$$

$$r(g_b, y_i) \quad b = \{1,2,\dots,|G|\}\ ve\ i = \{1,2,\dots,|V|\} \quad \textbf{(4.10)}$$

$$r(o_k, y_i) \quad k = \{1,2,\dots,|O|\}\ ve\ i = \{1,2,\dots,|V| - q(o_k) + 1\} \quad \textbf{(4.11)}$$

Estellon ve diğ.(2008) ise Renault'un araç sıralama problemi için bir tamsayılı lineer programlama modeli önermişleridr.

Bu yaklaşımda yukarıdaki $r(o_k, y_i)$ değeri şu şekilde modellenmiştir:

$$r(o_k, y_i) = \sum_{b=1}^{|G|} r(g_b, o_k) * r(g_b, y_i) \quad \forall k = \{1,2,\dots,|O|\}\ \forall i = \{1,2,\dots,|V|\} \quad \textbf{(4.12)}$$

Her bir $o_k$ kısıtı için $y_i$ pozisyonundan başlayan sıralarda oluşan ihlal sayısı aşağıdaki gibi kısıtlanmıştır:

$$ihlal(o_k, y_i) \ge \sum_{f=y_i}^{y_i+q(o_k)-1} r(o_k, y_f) - p(o_k) \quad \forall k = \{1,2,\dots,|O|\}$$
$$i = \{1,2,\dots,|V| - q(o_k) + 1\} \quad \textbf{(4.13)}$$

$ihlal(o_k, y_i)$ minimize edilmek istendiğinden dolayı bu kısıta ek olarak $ihlal(o_k, y_i) \ge 0$ kısıtı eklenmelidir. Bir önceki günden gelen araçların oluşturduğu

ihlal sayılarının hesaplanması için $q(o_k) - 1$ benzer kısıtları eklenmelidir, fakat basitlik açısından burada bu kısıtlar dahil edilmemiştir.

Renkler için de kısıtlar ve değişkenler benzer şekilde oluşturulmuştur.

Eğer bir $y_i$ pozisyonundaki araç $f_z$ rengine sahipse r($f_z, y_i$) değişkeni 1 değerini aksi takdirde 0 değerini alır. Aynı şekilde bir $g_b$ araç sınıfı $f_z$ rengi ile boyanması gerekiyorsa $r(g_b, f_z)$ değeri 1 aksi takdirde 0 olur. $r(f_z, y_i)$ değişkeni $r(g_b, y_i)$'nin bir fonksiyonuyla tanımlanabilir:

$$r(f_z, y_i) = \sum_{b=1}^{|G|} r(g_b, f_z) * r(g_b, y_i) \;\; \forall z = \{1,2, \dots, |F|\} \; \forall i = \{1,2, \dots, |V|\} \qquad \textbf{(4.14)}$$

Her bir $y_i$ pozisyonu bir $p_i$ değeri ilişkilendirilmiştir, burada $y_i$ pozisyonu ile $y_{i-1}$ pozyonu arasında bir robot temizliği işlemi olacaksa $p_i$ değeri 1, aksi takdirde 0 değerini alır. $p_i$ değeri aşağıdaki kısıtlarla aktif hala getirilmiştir. $p_i$ minimize edildiğinden bu kısıtlar $p_i = r(f_z, y_i) \oplus r(f_z, y_{i-1})$ XOR kısıtna eşittir.

$$\begin{matrix} p_i \geq r(f_z, y_i) - r(f_z, y_{i-1}) \\ p_i \geq r(f_z, y_{i-1}) - r(f_z, y_i) \end{matrix} \qquad \forall z = \{1,2, \dots, |F|\} \quad \forall i = \{2, \dots, |V|\} \qquad \textbf{(4.15)}$$

Renk üst sınır değeri için ise aşağıdaki kısıtlar verilmiştir:

$$\sum_{f=i}^{i+UST_SINIR} r(f_z, y_f) \leq UST_SINIR \qquad \begin{matrix} \forall z = \{1,2,\dots,|F|\} \\ i = \{1,2,\dots,|V| - UST_SINIR\} \end{matrix} \qquad \textbf{(4.16)}$$

Bu durumda amaç fonksiyonu şu şekildedir:

$$Min \sum_{k=1}^{|O|} \sum_{i=1}^{|V|-q(o_k)+1} maliyet(o_k) * ihlal(o_k, y_i) + \sum_{i=}^{|V|} maliyet(RobotTem) * p_i \qquad \textbf{(4.17)}$$

$maliyet(o_k)$ ve $maliyet(RobotTem)$ değerleri problemde renk ve oran kısıtlarının önceliklerine göre değişiklik gösterir ve maliyet değerleridir..

Bu modelde Gravel ve diğ.(2005)'nin klasik yaklaşımının ($r(o_k, y_i)$ ve $r(f_z, y_i)$ değişkenklerinin dahil edilmediği) aksine 0-1 değişkenlere sadece sınıf sayısına göre değil renk ve oran kısıtlarının(özelliklerinin) sayısına göre de karar verilir.

## 4.3 Yerel Arama Yaklaşımları (Local Search)

Yerel arama düşüncesi bir sıranın yerel olarak komşuluklarının keşfedilmesi ile geliştirilmesidir. Yani mevcut bir sıra üzerinden "hamle" adı verilen basit dönüşümler ile olası sıra kümelerinin oluşturulmasıdır. Bir başlangıç sırasından

başlayarak optimum bir sıra oluşturana kadar ya da maksimum hamle sayısına ulaşana kadar komşulukların oluşturulmasıyla bir arama kümesi oluşturulur. Araç sıralama probleminin çözümü için önerilen birçok farklı yerel arama yaklaşımı vardır. Bunların çoğu diğer problemler için de kullanılan genel yerel arama yaklaşımlarıdır. Bazı yerel arama yaklaşımları ise sadece bu problem için önerilen yaklaşımlardır. (Solnon ve diğ., 2007)

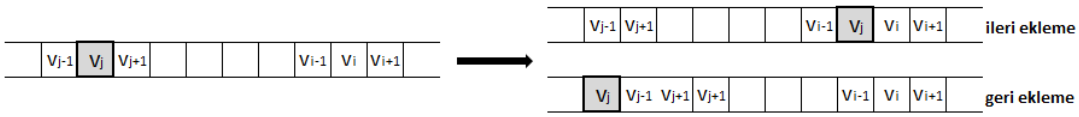
Araç sıralama problemi için önerilen yerel arama yaklaşımları temel olarak aşağıdaki durumlardan dolayı farklılık gösterir (Solnon ve diğ., 2007):

- Başlangıç çözümünün oluşturulması
- Her hamle ile oluşan komşuluk
- Komşuluk içerisinden hamle seçme sezgiseli

**Başlangıç sırasının oluşturulması;** Çoğu çalışmada başlangıç sırası, üretilecek olan araçların rassal permütasyonu ile bulunmaktadır fakat Gottlieb ve diğ. (2003) başlangıç sırasının bulunması için açgözlü sezgiselini önermişlerdir ve bunun çözüm sürecini iyileştirdiğini göstermişlerdir.

**Komşuluk;** Farklı hamle türleri olarak düşünülebilir. Birçok yaklaşımda farklı özelliklere sahip araçların ikili olarak yer değiştirilmesi olan değiştirme hareketi kullanılmaktadır. Gottlieb ve diğ., (2003) altı farklı hamle türü tanımlamıştır:

**Ekleme:** $i$ pozisyonundaki bir aracın kaldırılarak başka bir pozisyona eklenmesidir (Şekil 4.1).




**Şekil 4.1 :** Ekleme örneği.

**Yer değiştirme:** Rassal olarak seçilen iki aracın yer değiştirilmesidir. Burada $v_i, v_j$ araçları için $1 \leq d(v_i, v_j)$ 'dir (Şekil 4.2).




**Şekil 4.2 :** Yer değiştirme örneği.

**S yer değiştirme:** Benzer özellikteki fakat aynı olmayan araçların yer değiştirilmesidir. Bu değiştirmede $v_i, v_j$ araçları için $1 \leq d(v_i, v_j) \leq 2$ 'dir (Şekil 4.3).




**Şekil 4.3 :** S Yer değiştirme örneği.

**T yer değiştirme:** Arka arkaya olan iki aracın yer değiştirilmesidir, burada yine arka arkaya olan $v_i, v_j$ araçları için $1 \leq d(v_i, v_j)$'dir (Şekil 4.4).




**Şekil 4.4 :** T Yer değiştirme örneği.

**Tersine çevirme:** Bir alt sıradaki araçların tersinden sıralanmasıdır (Şekil 4.5).




**Şekil 4.5 :** Tersine çevirme örneği.

**Rassal:** Bir alt sıranın rassal olarak karıştırılmasıdır.

Estellon ve diğ.(2008) ekleme, yer değişirme ve tersine çevirme hamleleri için $i$ ve $j$ pozisyon seçimlerini aşağıdaki farklı seçim stratejilerine göre yapmaktadır:

***Jenerik:*** $i$ ve $j$ pozisyonlarını rassal olarak seç.

***Benzer:*** Aynı özelliklere sahip araçları bulunduran $i$ ve $j$ pozisyonlarını seç.

***Ardışık:*** Bir $i$ pozisyonunu rassal olarak seç, $j$ pozisyonuna $j = i + 1$ değerini ata.

***İhlal:*** İhlalin oluştuğu bir $i$ pozisyonun seç ve $j$ pozisyonunu rassal olarak seç.

***Payda:*** Bir $i$ pozisyonunu ve $k$ özelliğini rassal olarak seç ve $j$ pozisyonunu $j = i + q(o_k)$ olarak belirle.

***Aynı Renk:*** Aynı renkte araçların bulunduğu $i$ ve $j$ pozisyonlarını seç.

***Sınır Blok 1:*** Aynı renge sahip araçların bulunduğu bir sıranın başındaki veya sonundaki $i$ pozisyonunu seç, $j$ pozisyonunu ise rassal olarak seç.

***Sınır Blok 2:*** Aynı renge sahip araçların bulunduğu bir sıranın başındaki veya sonundaki $i$ ve $j$ pozisyonlarını seç.

***Aynı renk ihlali:*** İhlalin oluştuğu bir $i$ pozisyonun seç ve $i$ pozisyonundaki aracın rengiyle aynı olan bir aracın bulunduğu bir $j$ pozisyonunu seç

Başlangıç algoritmasıyla oluşturulan mevcut sıra üzerinden yukarıda belirtilen hamle türleriyle aday çözüm oluşturulur eğer bu aday çözüm sonucu mevcut çözümden daha iyiyse kabul edilir ve yeni çözüm üzerinden komşuluklar değerlendirilmeye devam edilir aksi takdirde reddedilir ve diğer aday çözümler değerlendirilir. Algoritma uygun çözüm bulunduğunda ya da değerlendirme süresi maksimum değere ulaştığında sonlandırılır.

## 4.4 Tabu Arama (Tabu Search)

Cordeau ve diğ. (2008)'in çalışmasında komşuluk arama olarak yer değiştirme ve ekleme hamlelerini kullanmışlardır. Tabu yapay hafızası şu şekilde kullanılmaktadır:

$i$ pozisyonundaki bir araç farklı bir pozisyona eklendiğinde bu aracın bir önceki pozisyonuna yeniden eklenmesi $\theta$ iterasyon kadar yasaklanır. Benzer şekilde iki araç yer değiştirdiğinde bu araçların bir önceki pozisyonlarına yeniden eklenmesi yine $\theta$ iterasyonu kadar yasaklanır fakat $i$ pozisyonundaki $v$ aracının eklenmesiyle ilgili tabu durumu eğer bu ekleme ile çözüm maliyeti azalıyorsa aspirasyon kriterine bağlı sözde özellik aracılığıyla iptal edilebilir. Aynı durum yer değiştirme hamlesi için de geçerlidir. Her araç ve pozisyon için $v$ aracı $i$ pozisyonundayken oluşan en iyi maliyeti gösteren $\delta_{vi}$ değişkeni ile bu kurallar uygulanır.

## 4.5 Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)

Briant ve diğ. (2008) Renault araç sıralama problemi için dinamik tavlama benzetimi yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Algoritmanın genel özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Amaç kriterleri (yüksek öncelikli oran kısıtlarının minimum ihlal oluşturması, renk değişimlerinin minimize edilmesi, düşük öncelikli oran kısıtlarının minimum ihlal oluşturması) sıralı olarak optimize edilir.
- Bir önceki optimize edilmiş amaç kriterinin bir sonraki amaç kriterinin optimzasyonu sırasında bozulmasına izin verilmez.

- Amaç kriterlerinden biri optimize edilirken bir sonraki amaç değerlendirmeye alınmaz.
- Her bir amaç kriteri optimizasyonu için %20 birinci amaç kriteri ve %40'ar diğer amaç kriterleri için $\Delta t$ kadar süre harcanacaktır. Eğer birinci amaç kriteri dahil edilmezse %50'şer olarak bu süre bölüştürülecektir.
- Her bir amaç kriteri için kritere bağlı olmayan bir başlangıç sıcaklığı ve soğuma çizelgesi tanımlanır.
- Başlangıç sıcaklığı $T^0$ Denklem 4.18'de olduğu şekilde seçilir: Mevcut amaç kriterini %1'den fazla kötüleştiren bir hareket %0,5'den daha düşük bir olasılıkla kabul edilir.

$$T^0 = \frac{-M * \%1}{In(0{,}5\%)} \quad \textbf{(4.18)}$$

Burada M değeri amaç kriterinin büyüklüğüdür.

- Her bir amaç kriteri değişiminde bu amaç kriterindeki ihlalleri, büyüklükleri değerlendirmek için 2OPT adında bir algoritma çağrılır. Bu algoritma başlangıç sıcaklığının iyi bir şekilde değerlendirilmesi için gereklidir.
- Sıcaklık her 10 s'de $\alpha$ faktörü ile azaltılır. Bu faktör amaç kriteri için atanan sürenin %75'i geçtiğinde sıcaklık değerini dondurmak için hesaplanır. Eğer gelişme göstermeyen bir çözümün kabul edilme olasılığı $10^{-7}$'den düşükse sıcaklık değeri donmuş farzedilir.

$$\alpha = (\frac{-1}{\ln(10^{-7})} T^0)^{\frac{3\Delta t}{410}} \quad \textbf{(4.19)}$$

## 4.6 Karınca Kolonisi Optimizasyonu(Ant Colony Optimization)

Karınca kolonisi optimizasyonu gerçek karınca kolonilerinin toplu hareketinden esinlenen bir sezgiseldir ve birçok zor optimizasyon problemelerinin çözümünde kullanılmaktadır. Solnon 2000 yılında kısıt tatmin problemlerinin çözümünde kullanılan ve kısıtlar çerçevesinde $n$ tane değişkene $n$ tane değerin atandığı permütasyonların bulunmasını amaçlayan bir karınca kolonisi optimasyonundan bahsetmiştir. Bu algoritma herhangi bir kısıt tatmin problemini standart yolla çözmek için tasarlanmıştır. Gottlieb ve diğ.(2003) kısıt tatmin problemi için tasarlanmış olan bu yaklaşımı araç sıralama problemine uyarlamışlardır.

Bu algoritma klasik karınca kolonisi algoritmasını takip eder: Feromon ilklemesi yapılır, daha sonra her çevrimde her karınca bir sıra oluşturur ve feromon izlerini günceller, algoritma bir karınca çözümü bulduğunda veya maximum iterasyon sayısına ulaşıldığında iterasyonu durdurur.

***Grafik yapısının kurulması ve feromon izlerinin başlatılması***

Sıraların oluşturulması için karıncalar her araç $v_j \in V$ ile bir noktanın ilişkilendirildiği tamamı yönlendirilmiş grafiğin köşelerinde bırakılan feromonlarla iletişim kurarlar. $v_{nest} \notin V$ ile gösterilen, sıra oluşturmayı başlatan karıncalardan gelen bir tane extra nokta bulunmaktadır. Bu extra nokta herhangi bir özelliği bulunmayan araç olarak ele alınacaktır. Bir $(v_j, v_i)$ köşesindeki feromon miktarı $\tau(v_j, v_i)$ olarak gösterilir ve $v_j$'den sonraki $v_i$ için çekiciliğini gösterir.

Bu algoritmada açık bir şekilde feromon izleri için alt ve üst sınırlar $\tau_{min}$ ve $\tau_{max}$ $(0 < \tau_{min} < \tau_{max})$ uygulanmaktadır. Burada amaç işlem süresince feromon izleri arasındaki görülebilir farkları önleyerek daha geniş bir arama uzayı oluşturmayı gözetmektir. Aynı zamanda feromon izleri $\tau_{max}$'dan başlatılır böylelikle ilk çevrim süresince arama uzayının daha yüksek bir keşif yapması sağlanır

***Karıncalar tarafından sıraların oluşturulması***

$\pi$ sırasının karınca tarafından oluşturulmasının akış şeması aşağıdaki gibidir

$\pi \leftarrow < v_{nest} >$

$|\pi| \leq |V|$ iken

$aday \leftarrow \{v_k \in V - \pi, \forall v_j \in V - \pi, ((d(v_k, v_i) = 0) \Rightarrow (k < i))$ *ve* $Yeni\dot{I}hlal(\pi, v_k) \leq$ *YeniİhlalI(π,vi)*

$v_j$ , $\pi$ $(\pi = \pi' | < v_j >)$ sırasındaki son araç olsun.

$p_{v_j v_i} = \frac{[\tau(v_j, v_i)]^{\alpha}[\eta(v_i, \pi)]^{\beta}}{\sum_{v_k \in aday}[\tau(v_j, v_k)]^{\alpha}[\eta(v_k, \pi)]^{\beta}}$ olasılıklı $v_i \in aday$ aracını seç $\pi \leftarrow \pi | < v_j >$

Her bir iterasyonda, çizelgelenmemiş $V - \pi$ araç kümesi yerine sınırlandırılmış $aday$ araçlar kümesinden araç seçimi yapılır. Simetriyi bozmak amacıyla sadece farklı özelliklerdeki araç sınıfları ele alınır, elitist stratejisini de uygulamak amacıyla yeni kısıt ihlallerinin sayısına göre en iyi sonuç veren araçlar arasından seçilir.

Aday araçlar kümsindeki bir $v_i$ aracının seçimi feromon faktörü $\tau$ ve sezgisel faktörü $\eta$'ne bağlı olan bir olasılık değerine göre yapılır. Bu sezgisel faktör aşağıdaki sezgisel fonksiyonlardan biri olabilir:

- Rassal seçim
- Statik en yüksek kullanım oranına göre seçim
- Dinamik en yüksek kullanım oranına göre seçim
- Kullanım oranlarının statik toplamına göre seçim
- Kullanım oranlarının dinamik toplamına göre seçim
- Dinamik homojen dağılıma göre seçim

Bu sezgiseller hakkındaki ayrıntılı bilgiyi Bölüm 4.7'de bulabilirsiniz.

***Feromon izlerinin güncellenmesi***

Her karınca bir sıra oluştrduktan sonra feromon izleri karınca algoritmasına göre güncellenir. İlk olarak, tüm feromon izleri buharlaşma ile azalır(her $(v_j, v_i)$ köşesi için, feromon miktarı $\tau(v_j, v_i)$ bir $\rho$ $(0 \leq \rho \leq 1)$ buharlaşma parametresi ile çarpılır. Daha sonra çevrimde en iyi feromon biriktiren karıncalar(çevrim süresince oluşturulan her bir $\pi$ sırası için, o çevrim için $\pi$'nin maliyeti minimum ise, ardışık her $< v_i, v_k > \subseteq \pi$ ardışık ikili araç için $\tau(v_i, v_k)$, $1/_{maliyet(\pi)}$ ile artırılır.

## 4.7 Açgözlü Algoritma (Greedy Algorithm)

Verilen bir araç sıralama probleminde açgözlü algoritma yoluyla yeni bir sıra kısaca şu şekilde oluşturulur: Boş bir sıradan başlayarak yeni bir aracın farklı açgözlü algoritma fonksiyonlarıyla sıranın sonuna adım adım yerleştirilmesi ile oluşturulur. İlk greedy sezgiseli 1994 yılında Hindi ve Ploszaski tarafından önerilmiştir. 2003'de ise Gottlieb ve diğ. araç sıralama problemi için 6 farklı açgözlü algoritma sezgiseli önermiştir ve bunları karşılaştırmıştır. Gottlieb ve diğ. (2003)'nin önerdiği bu açgözlü algoritma aşağıdaki gibidir:

Bir araç sıralama probleminde bir sıra, sıraya eklenecek bir sonraki aracın seçiminin iteratif olarak bir sezgisel fonksiyon yoluyla karar verilip sıraya eklenmesiyle oluşturulur. Her adımda ihlal sayılarını minimum yapan araç seçilir yani bir kısmi sırada $\pi$, bir sonraki eklenecek olan araç, aşağıdaki formülü minimize eden $v_j$ aaraçlarından seçilir.

$$Yeni\dot{I}hlal(\pi, v_j) = \sum_{o_k \epsilon O} r(v_j, o_k) . ihlal(SonAraçlar\left(\pi\middle| < v_j >, q(o_k)\right), o_k) \quad \textbf{(4.20)}$$

Burada $SonAraçlar(\pi', k)$, eğer $|\pi'| \geq k$ ise $\pi'$ sırasının son aracıdır aksi takdirde $SonAraçlar(\pi', k) = |\pi'|$'dür. Genellikle $Yeni\dot{I}hlal$ fonksiyonunu minimum yapan birden fazla aday araç vardır. Bundan dolayı Gottlieb ve diğ.(2003) eşitliği bozmak için farklı sezgiseller önermiştir.

Bu sezgiseller aşağıdaki gibidir:

Rassal Seçim: Aday araçlar arasından rassal olarak birinin seçilmesidir.

Statik En Yüksek Kullanım Oranı (SYK): En yüksek kullanım oranına sahip kısıtı bulunduran araç ve eşitliği bozmak için de ikinci en yüksek ve daha sonraki yüksek kullanım oranına sahip özelliği bulunduran araç seçilmelidir. Matemeatiksel olarak Denklem 4.21'deki fonksiyonu maksimum yapan araç seçilmelidir.

$$\eta SYK(v_j) = \sum_{o_k \in O} r(v_j, o_k) * w(o_k) \quad \textbf{(4.21)}$$

Burada $o_k$ k. en düşük kullanım oranına sahip kısıt ise $a\check{g}\imath rl\imath k(o_k) = 2^k$'dır.

Dinamik En Yüksek Kullanım Oranı (DYK): $\eta SYK(v_j)$ statik kullanım oranı $\pi$ kısmi çizelgelenmiş sırasından bağımsız olarak hesaplanmaktadır. $\eta DYK(v_j)$ ise her araç eklendikten sonra $\pi$ sırasına göre dinamik olarak hesaplanmaktadır. Bir $(o_k)$ kısıtının ağırlığını hesaplamak için kullanılan kullanım oranı Denklem 4.22'deki gibi tanımlanmıştır:

$$DinKulOran\imath(o_k, \pi) = \frac{[r(V, o_k) - r(\pi, o_k) * q(o_k)]}{p(o_k) * [|V| - |\pi|]} \quad \textbf{(4.22)}$$

Kullanım Oranlarının Statik Toplamı (KST): Kullanım oranlarını en yüksekten en düşüğe sıralamak yerine ilgili kısıtların kullanım oranlarının toplanmasıdır. Kısaca Denklem 4.24'de gösterilen fonksiyonu maksimum yapan araç seçilir.

$$KulOranı(o_k) = \frac{r(V,o_k)*q(o_k)}{p(o_k)*|V|} \quad \textbf{(4.23)}$$

$$\eta KST(v_j) = \sum_{o_k \in O} r(v_j, o_k) * KulOranı(o_k) \quad \textbf{(4.24)}$$

Kullanım Oranlarının Dinamik Toplamı (DST): KST sezgiselinin dinamik kullanım oranlarının kullanılması ile dinamik hale getirilmiş olanıdır. Denklem 4.25'deki gibi hesaplanmaktadıtr.

$$\eta DST(v_j) = \sum_{o_k \in O} r(v_j, o_k) * DinKulOranı(o_k) \quad \textbf{(4.25)}$$

Dinamik Düzgün Dağılım (DDD): Bundan önceki dört sezgisel fonksiyon yüksek kullanım oranlarına sahip kısıtları bulunduran araçları seçmesine rağmen, bu sezgisel kısıtların düzgün dağılımda olmasını gözetler. Bir kısıtı bulunduran araçların çizelgelenmiş sıradaki ortalama sayısı tüm araçların ortalama sayısından düşükse, bu araçlar tercih edilir, ya da tam tersi durumdaki araç tercih edilir. Kısaca Denklem 4.26'daki fonksiyonu maksimum yapan araçlar tercih edilir.

$$\eta DDD(v_j) = \sum_{o_k \in O} \left(r(v_j, o_k) = 0\right) xor \left(\frac{r(V,o_k)}{n} > \frac{r(\pi,o_k)}{|\pi|}\right) \quad \textbf{(4.26)}$$

Bu sezgisel $|\pi| = 0$ olduğunda uygulanmaz, bundan dolayı ilk araç maksimum kısıta sahip araçlar arasından rassal olarak seçilir.

Açgözlü algoritma araç sıralama problemlerinde genel olarak oran kısıtları için uygulanmaktadır fakat Briant ve diğ.(2008), renk değişimi sayısı için açgözlü algoritma önermiştir.

Açgözlü algoritma yaklaşımı araç sıralama problemlerinde genel olarak başlangıç algoritması olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma da da başlangıç algoritması olarak açgözlü algoritma ve yukarıdaki 3. ve 5. sezgisel fonksiyonlar kullanılacaktır.

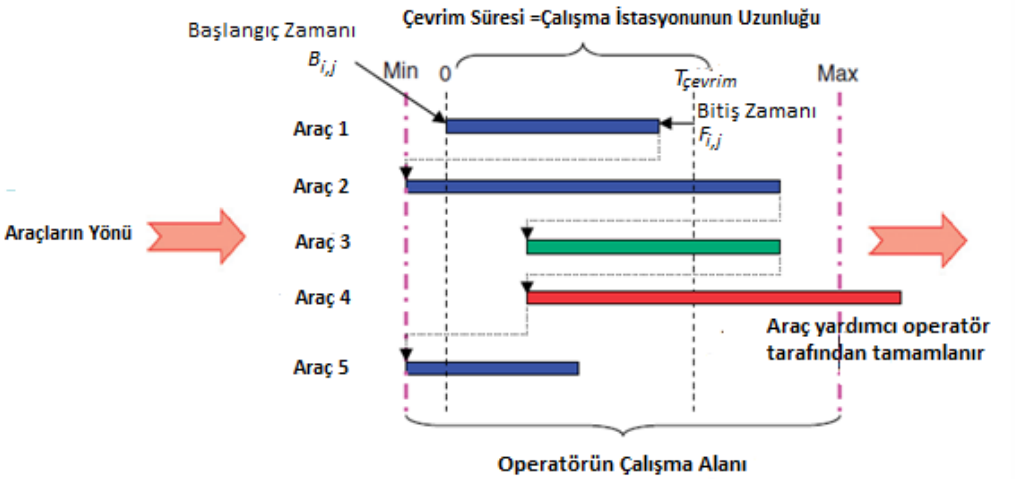
## 4.8 Oran Kısıtlarının Oluşturulması

***Operatörün kendi istasyonu içerisindeki hareketi***

Lesert ve diğ.(2010) oran kısıtılarının oluşturulmasıyla ilgili bir model tanımlamıştır. Tipik bir otomotiv montaj hattında araçlar bir çalışma istasyonundan diğerine sabit hızdaki konveyörle hareket ederler(x meters/min). Bir çalışma istasyonunun girişi ile

çıkışı arasındaki süre sabittir ve bu süreye çevrim süresi ($T_{çevrim}$) denir. Çevrim süresi boyunca araçlar $x.T_{çevrim}$ kadar ilerler. Bu çalışma atölyesinin uzunluğudur. Araçlar arasındaki aralık limitleri için zaman metrikleri kullanılmaktadır.

Pratikte bir operatör kendi çalışma istasyonundan daha uzun bir alanda çalışabilir. Çalışma istasyonunun gerçek sınırları alt limit ve üst limit ile sınırlıdır. Alt ve üst limitler istasyondaki ekipmanların ve komşu istasyonların özelliklerine göre(operatör bir sonraki istasyonun operatörünü işinden alıkoymamalıdır) hesaplanır. Üst limitler $T_{çevrim}$'e eşit ya da büyüktür. Alt limit ise negatif ya da sıfırdır. Burada çalışma alanları bir çalışma istasyonunun gerçekteki sınırlarını gösterecektir.




**Şekil 4.6 :** Operatörün çalışma alanındaki hareketi (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 965).

Şekil 4.6 'da operatör araçların montajı boyunca araçlar ile birlikte hareket etmektedir ve daha sonra geriye dönüp yeni aracın montajına başlar. Eğer operatör işini zamanından önce bitirirse diğer araç çalışma istasyonuna girmeden önce montaja başlayabilir (Şekil 4.6'da 1. araç). Benzer şekilde eğer operatör gecikme yaşarsa bir sonraki çalışma istasyonunda araç üzerine çalışmaya devam edebilir (Şekil 4.6'da 2 ve 3. araçlar).

Operatör işini çalışma alanında tamamlayamadığında (Şekli 4.6'da 4. araç), aşağıdaki çözümler önerilmektedir:

i) Operatör işini bitirmek için hattı durdurabilir ve sonrasında tekrar başlatır.

ii) Bir yardımcı operatör çalışma alanı içerisinde araç bitirilemediğinde bitirilemeyen işin tamamlanması için çağrılır.

iii) Yardımcı operatör çalışma alanı içinde tamamlanamayan aracı tamamlar.

Lesert ve diğ. (2010) bir araç üzerindeki işine başlayıp hiç bir işini unutmadan tamamlayan bir operatörün kalitesini sağladığından dolayı üçüncü yaklaşımı kullanmışlardır. Bu hipoteze bağlı olarak, Şekil 2'deki dördüncü aracın diğer istasyona geçmeden önce yardımcı operatör ile bulunduğu istasyondaki işleri tamamlanır. Böylece operatör dördüncü aracı geçip beşinci aracı ele alır.

***Operatör hareketinin matematiksel modeli***

Etkili bir oran kısıtı yardımcı operatör çağrılma sayısını minimum hale getiricek şekilde operatörlerin iş yükünü dengeleyecek kısıttır. Operatör hareketleri, dolayısıyla yardımcı operatör talebinin modeli aşağıdaki notasyonlarla modellenmektedir:

$T_{i,j}$ : $i$ istasyonunda $j$ aracında yapılacak operasyonların süresi,

$B_{i,j}$ : $i$ istasyonunda $j$ aracının operasyonlarının başlangıç zamanı,

$F_{i,j}$ : $i$ istasyonunda $j$ aracının operasyonlarının bitiş zamanı,

$U_{i,j}$ : Önemli gecikmelerin sinyalidir. Eğer operatör $i$ istasyonunda $j$ aracının işlemleri için yardıma ihtiyaç duyarsa $U_{i,j} = 1$ yoksa $U_{i,j} = 0$'dır.

Ayrıca;

i) Operatörler bütün $j$ araçlarını $i$ istasyonunda bitirebilir,
$Ust_i - Alt_{\ i} \geq Max_j(T_{i,j})$

ii) Operatörlerin herhangi bir teknik problemle karşılaşmayacakları varsayılır,

iii) Yardımcı operatörlar müdahale gerektiren araçlar için yeterince erken çağrılmaktadır,

iv) Çağrılara cevap verecek kadar yardımcı operatör bulunmaktadır,

v) Geri dönüş yürüyüşü açıkça modellenmemiştir. $T_{i,j}$'nin geri dönüş sürelerini içerdiği varsayılmaktadır.

Yardımcı operatörın $j$ aracı için müdahalesi şu şekilde açıklanmıştır:

$B_{i,1} = 0 \ \ \forall i$ için

$$F_{i,j} = B_{i,j} + T_{i,j} \quad \textbf{(4.27)}$$

$$U_{i,j} = \begin{cases} 0 & F_{i,j} \leq Ust_i \\ 1 & F_{i,j} > Ust_i \end{cases} \quad \textbf{(4.28)}$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} Max(Alt_i, F_{i,j-1} - T_{çevrim}) & U_{i,j-1} = 0 \\ Max(Alt_i, B_{i,j-1} - T_{çevrim}) & diğer \end{cases} \quad \forall i,j > 1 \quad \textbf{(4.29)}$$

Yukarıda Denklem 4.29'dan da görüldüğü gibi $B_{i,j}$ operatörün başlangıç konumuna bağlıdır. Günün ilk aracı için Operatör çalışma alanının başından başlar. Diğer araçlar için ise operatör bir önceki aracı yardım ihtiyacı duymadan tamamlayabiliyorsa $B_{i,j}$ eşitliğinin ilk satırı kullanılır. Burada $(j-1)$. aracın işlemlerinin bitiş zamanı $F_{i,j-1}$'dir. Her $T_{çevrim}$ zamanında iş istasyonuna yeni bir araç vardığından dolayı $F_{i,j-1} - T_{çevrim}$ operatörün çalışma alanı içerisinde yeni aracı yakalayabileceği noktayı verir. $F_{i,j-1} - T_{çevrim} \leq Alt_i$ ise $j$. araç iş istasyonuna gelmeden önce operatörün istasyonun uç sınırlarına kadar geriye yürümeye vakti olur.

$F_{i,j-1} - T_{çevrim} > Alt_i$ ise $j$. araç iş istasyonunun pratikteki sınırlarını aşmıştır ve operatör $j$. aracının işlemlerine $B_{i,j} = F_{i,j-1} - T_{çevrim}$'de başlayabilir. $B_{i,j}$ eşitliğinin ikinci satırında $(j-1)$ aracının atlanacağı (yardımcı operatör tarafından tamamlanır) anlatılmaktadır. Burada $(j-1)$. araç için düzenli çalışan operatör işi bitiremediğinden operasyonların bitiş zamanı $B_{i,j-1}$'e karşılık gelir. Operatör $j$. aracı tamamlamak için yürüyebilir.

Bu modelde $T_{i,j} > T_{çevrim}$(iş yükü fazla) olan araçlar bir acil durum alarmına sebep olabilir; fakat $T_{i,j} \leq T_{çevrim}$olan bir araç yoğun operatörün gecikmesini telafi etmek için iş yüküne sahip bir araçtan sonra sıralanabilir. Böylece yardımcı operatörün kullanılmasından kaçınılır. Bu metot yardımcı operatörların kullanım sayısını minimize eden bir araç sıralamasını bulmak için kullanılır. Bunun gibi bir yaklaşım El Hadj-Khallaf(2006) tarafından test edilmiştir ve klasik araç sıralama problemleri metotlarıyla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar alındığını kanıtlamıştır (Lesert ve diğ., 2010). Ancak, bu yaklaşımları direkt uygulamanın bazı deavantajları vardır: birincisi bu yaklaşım işlem süreleri, operatör hareketi, istasyonların özellikleri ve görevlerle ilgili ciddi miktarda veri toplamayı gerektirir. İkincisi ise PSA Peugeot

Citroën gibi araba üreticileri oran kısıtlarının kullanımına dayanan araç sıralama optimizasyon araçlarını kullanmaktadırlar ve bilgi sistemlerinin gerektirdiği değişikliklerin maliyeti potansiyel yararlarının çok daha ötesindedir. Bundan dolayı Lesert ve diğ. (2010) kaliteli oran kısıtlarının tanımını kolaylaştırmak için mevcut yöntemleri geliştirmeyi önermektedir.

***Oran kısıtı kriterinin tanımlanması***

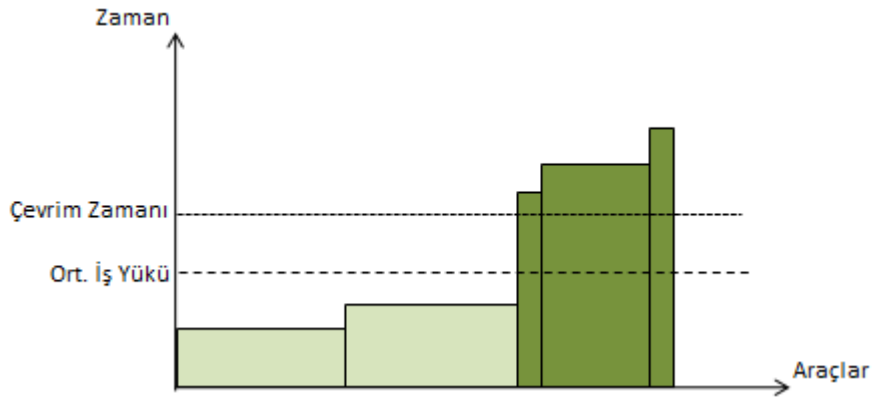
Yardımcı operatör sayısının çağrılma sayısının minimize edilmesi probleminde yoğun iş yüküne sahip araçlar aralıklı olarak dizilir. Eğer bu araçlar nitelendirilirse, oran kısıtlarının bir kriterinin oluşması sağlanır. Bu bölümde öncelikle nitelendirme işlemi nasıl yapılır anlatılacak.

Klasik araç sıralama probleminde bir iş istasyonu için bir oran kısıtı tanımlanmıştır. Buradaki iş istasyonlarında iki türlü araç vardır; birincisi fazla iş yükü getiren özelliklere sahip araçlar ve bu özelliklere sahip olmayan yani hafif iş yüküne sahip araçlar. Bu durum bir seçenek-iki zamanlama problemi olarak adlandırılmaktadır (Lesert ve diğ, 2010).

Lesert ve diğ. (2010)'nin çalışmasında otomobil montaj hatlarının ilk dönemleri göz önünde bulundurmuştur. Buna rağmen şimdiki montaj hatlarında araç farklılıkları şu şekildedir: bir operatör farklı birçok seçeneğin montajını yapabilir; seçeneklerin değişkenlikleri (farklı motor çeşitleri) veya farklı miktarlardaki aynı seçenekler (hava yastığının sadece sürücü tarafında olması ya da hem yolcu hem de sürücü tarafında olması vb.). Bu da iş istasyonlarındaki farklı zamanlarla sonuçlanır.

***Bir operatörün iş yükü***

Bir iş istasyonunda yürütülen montaj işlemleri oldukça çeşitlidir ve dolayısıyla aldığı süre de farklılık gösterir. Şekil 4.7'de $i$ istasyonunda üretilen bütün araçlar artan $T_{i,j}$ sürelerine göre sıralanmıştır. Şekilde aynı $T_{i,j}$ süresine sahip araçlar birlikte gruplandırılarak gösterilmiştir. Beş adet farklı işlem süresi görülmektedir. $T_{i,j} < T_{çevrim}$ olan iki grup ve $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan üç araç grubu bulunmaktadır. İlk araçların çevrim zamanlarına bakıldığında (operatörün başıboş kalması bir yana bırakılırsa) iş yükleri oldukça düşüktür, sonraki araçlar ise operatör için ağır iş yükü oluşturmaktadır(ve operatör için zorunlu bir gecikme).




**Şekil 4.7 :** Bir operatörün istasyonundaki iş yükü (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 970)

***Çalışma istasyonları ve oran kısıtı kriteri arasındaki ilişki***

Oran kısıtlarının oluşturulmasındaki amaç $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan araçların arasında $T_{i,j} < T_{çevrim}$olan araçları ekleyerek dengeleme yapmaktır. Bu durumda oran kısıtlarının $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan araçları temsil etmesi beklenir. Bir $i$ istasyonundaki kriterleri sayısallaştırmak için o istasyondaki araçları iki ayrı küme olarak değerlendirmek gerekir. $V$ bir montaj hattında üretilecek olan araçlar olsun. $V_{C_k} \neq \emptyset$ ve $V_{p_i} \neq \emptyset$ olduğunda;

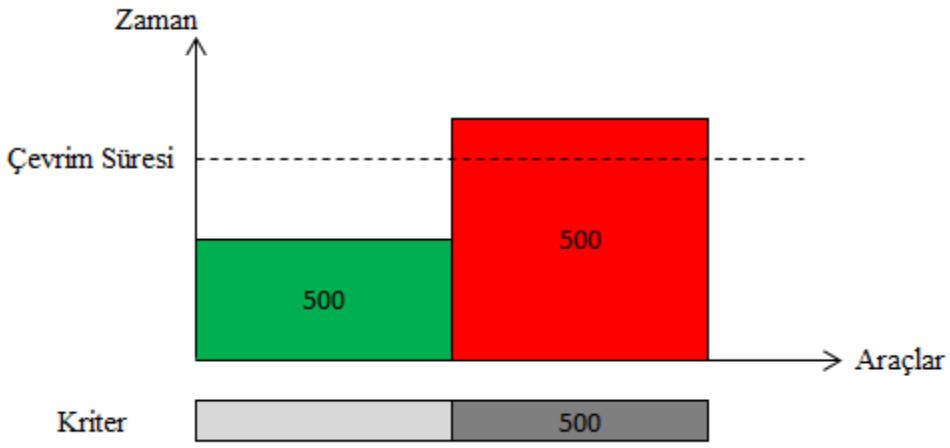
$V_{C_k} = \{v \in V | v\ c_k$ kriterine sahip araçlar$\}$ ,

$V_{p_i} = \{v \in V | T_{i,v} > T_{çevrim}\}$,

$V_{p_i} = \emptyset$ olan istasyonlarda operatör gecikmesi olmayacağı için herhangi bir sıra kabul edilebilir. $V_{C_k} = 0$ olması da aralarına mesafe konulacak araçların olmadığı anlamına gelir.

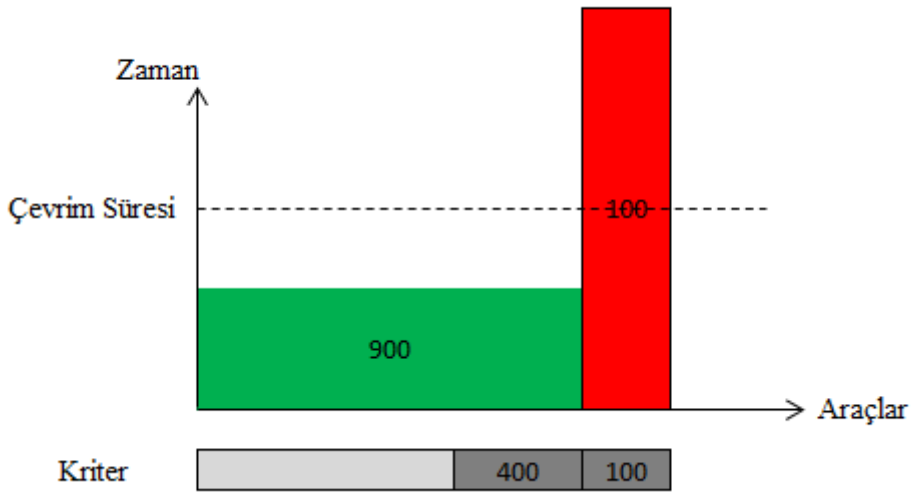
$i$ istasyonu ile $k$ oran kısıtı arasında beş farklı ilişki vardır. Bu ilişkilere bağlı olarak bir oran kısıtı bir iş istasyonunda meydana gelen fazla iş yüklerini daha az ya da daha çok etkin bir şekilde kontrol eder.

$V_{C_k} = V_{p_i}$ ise; bu $i$ istasyonunda süre aşımına neden olan araçların hepsi $c_k$ kriterine sahip olan araçlardır. Bu istasyon için $c_k$ kriteri ile aralıklandırılması gereken araçlar arasında mükemmel bir eşleşme oluşmaktadır. Şekil 4.8'de bu durum için örnek görülmektedir. Bu durum için "$i$ istasyonu $k$ oran kısıtı ile kısıtlanabilir" diyebiliriz.



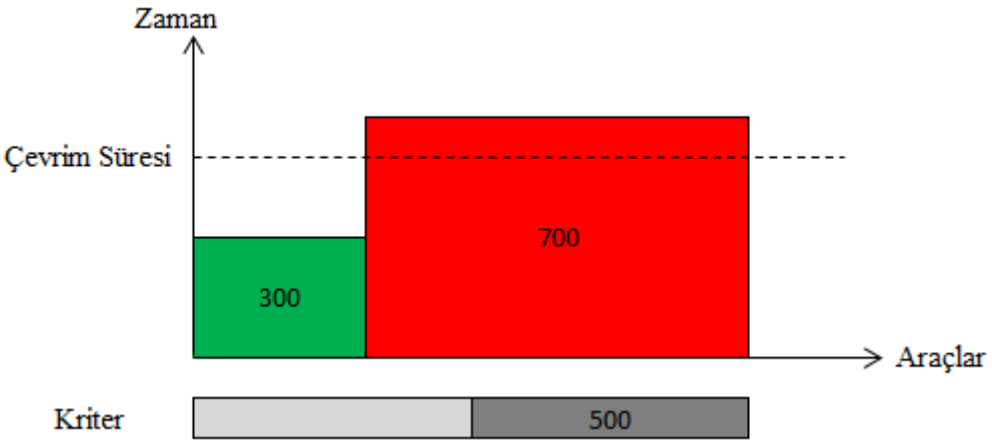

**Şekil 4.8 :** Oran kısıtı ile kısıtlanan istasyon (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 971).

$V_{C_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ ve $V_{C_k} - V_{p_i} \neq \emptyset$ ise $c_k$ sadece $i$ istasyonunda süre aşımına uğratan araçları değil daha fazlasını kapsar. 900 aracın 400 tanesi istasyonu süre aşımına uğratmaz ve bu araçlar aynı kısıt ile nitelendirilmektedir. Kısıtlara göre bu 400 aracın da aralıklandırılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle $c_k$ sıkıntılı araçlardan daha fazlasını kısıtlamaktadır. Bu durum için "$i$ istasyonu $k$ oran kısıtı ile aşırı kısıtlanmıştır" denir.



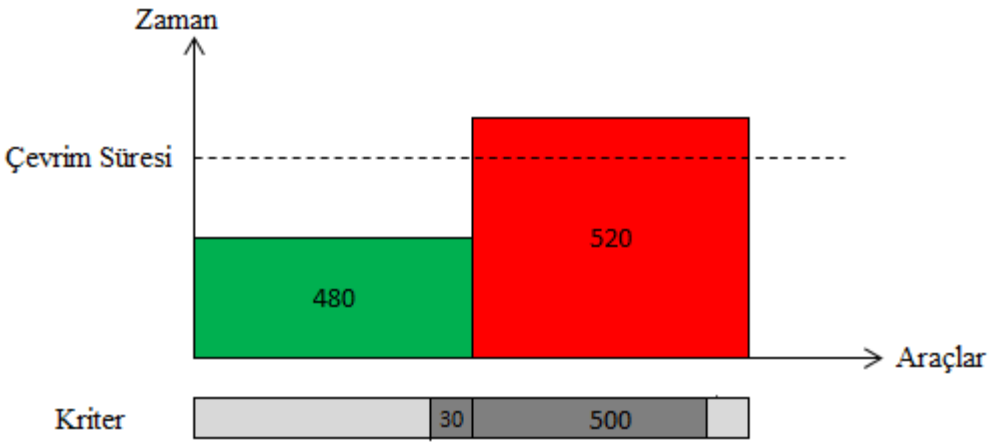

**Şekil 4.9 :** Oran kısıtı ile aşırı kısıtlanmış istasyon (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 971).

$V_{C_k} \cap V_{p_i} = V_{c_k}$ ve $V_{p_i} - V_{c_k} \neq \emptyset$ durumunu düşünelim. Şekil 4.10'da $i$ istasyonunda 700 iş yükü yoğun araçta sadece 500'ü $c_k$ kısıtına sahiptir ve geri kalan 200 tanesi aralıklandırılması gerekmeyen araçlar olarak ele alınmaktadır yani $i$ istasyonunda aşırı iş yüküne neden olan araçları kapsayamamaktadır.




**Şekil 4.10 :** Oran kısıtı ile kısıt altında kalan istasyon (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 972).

$V_{C_k} \cap V_{p_i} \neq \emptyset$ , $V_{C_k} \cap V_{p_i} = V_{c_k}$, $V_{C_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ olduğunu düşünelim. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere $i$ istasyonunda süre aşımına uğratan araçların bir kısmı $c_k$ kriteri ile nitelendirilmemiş.$T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan 520 araçtan 50 tanesi $c_k$ kriterine sahip değildir. Ayrıca istasyonda herhangi bir sıkıntı yaratmayan 50 araç ise araç sırasında birbirinden uzak aralıklı dizilmesi gerekmektedir. $c_k$ kriteri araçların sadece bir kısmını ele almaktadır. Bundan dolayı $i$ istasyonu $k$ kısıtından etkilenir diyebiliriz.




**Şekil 4.11 :** Oran kısıtından etkilenen istasyon (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 972).

Son olarak $V_{C_k} \cap V_{p_i} \neq \emptyset$ ise $i$ istasyonundaki hedef araçların hiçbiri $c_k$ kriterine sahip değildir. Bu durumda "$i$ istasyonu $k$ oran kısıtından etkilenmez" denir.

Yukarıdaki durumlardan yola çıkarsak bir oran kısıtı için seçilen kriterin her istasyonu farklı etkileyebilir: bazı istasyonlar için hiçbir etkisi olmazken bazı istasyonlar için ise kriter seçimi mükemmeldir. Sonuç olarak her istasyon için bir kriter tanımlanamaz. Bir otomotiv montaj hattında yüzlerce istasyon vardır. Her bir

kısıtı sağlayan bir araç sırası bulmak mümkün olamayacağından dolayı her istasyon için bir oran kısıtı tanımlamak mantıklı olmaz. Uygulamada oran kısıtlarının sayısı istasyon sayısından daha azdır.

Diğer bir konu ise ilişkilerin birbiri arasında nasıl sıralandırılacağıdır. Doğal olarak $i$ istasyonundaki $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan bütün araçları nitelendirebilen kriter iyi bir kriterdir. İlk ve son durumlar için bu durum çok basittir. İlk durum en iyi durumdur ve sıralamanın başında yer alır. Son durumda ise herhangi bir etki oluşmadığından sıranın sonunda yer alır. Asıl zorluk diğer durumlar içindir. Herhangi bir durumu seçmek durumunda kalırsak hangisini almalıyız?

***Etki faktörleri***

Yukaridaki soruyu cevaplamak için üç seviyede etki faktörü önerilmektedir: Birincisi bir oran kısıtının kriterinin bir istasyona göre uygunlugunu göstermek için kullanılmaktadır. Bu değer bir çalışma istasyonundaki tüm oran kısıtlarının etki faktörünü sağlamak için tüm kriterleri birleştirir daha sonra tüm montaj hattı için bir ölçü elde etmek için tüm iş istasyonları ile ilgiliş olarak bir kez daha birleştirilir.

***Bir istasyondaki kriterin etki faktörü***

$c_k$ kriterinin $i$ istasyonuna uygunluk seviyesini değerlendirmek için $f_{p_i,k}$ etki faktörü Denklem 4.30'deki gibi önerilmiştir.

$$f_{p_i,k} = \frac{s(V_{c_k} \cap V_{p_i})}{s(V_{p_i})} * \frac{s(\overline{V_{c_k}} \cap \overline{V_{p_i}})}{s(\overline{V_{p_i}})} \qquad \textbf{(4.30)}$$

Burada $s(Y)$ Y kümesinin eleman sayısı anlamına gelir

$f_{p_i,k}$ değeri 0 ile 1 arasında değişir. '0' oran kısıtından etkilenmyen bir istasyona karşılık gelir, '1' ise oran kısıtı ile kısıtlanan istasyona karşılık gelir.

$\frac{s(V_{c_k} \cap V_{p_i})}{s(V_{p_i})}$ ; $T_{i,j} > T_{çevrim}$ süresine sahip araçların $c_k$ kriterini içerme yüzdesini verir.

$\frac{s(\overline{V_{c_k}} \cap \overline{V_{p_i}})}{s(\overline{V_{p_i}})}$ ise $T_{i,j} < T_{çevrim}$ süresine sahip araçların $c_k$ kriterini içermeme yüzdesini verir.

Oran kısıtından etkilenmeyen bir istasyon için $f_{p_i,k} = 0$ çünkü $V_{c_k} \cap V_{p_i} = \emptyset \Leftrightarrow s(V_{c_k} \cap V_{p_i}) = 0$. Tam tersi olarak da bir oran kısıtından etkilenen istasyon $f_{p_i,k} = 1$ çünkü $V_{c_k} = V_{p_i} \Leftrightarrow V_{c_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ ve $\overline{V_{c_k}} \cap \overline{V_{p_i}} = \overline{V_{p_i}}$

***Bir istasyondaki kriter kümesinin etki faktörü***

Tüm montaj hattında kriter sayısının belli bir sayıda olduğunu düşünelim. Bir istasyon için bu kriterlerden her birinin farklı faktör değeri var. Bu istasyon için ortak bir etki faktörü belirleyebilmek için bir $f_{p_i}$ etki faktörü önerilmektedir. Denklem 4.31'deki en yüksek etki faktörüne sahip ilişki bu istasyondaki iş yükü fazla olan araçların aralıklandırmasını belirleyecektir.

$$f_{p_i} = \max(f_{p_i,k}) \quad k \in K \tag{4.31}$$

K seçilen oran kısıtlarının kümesidir.

***Montaj hattındaki kriterlerin etki faktörü***

Bir montaj hattındaki seçilen oran kısıtlarının toplam etkisini değerlendirmek için $T_{i,j} > T_{çevrim}$sahip en az bir araca sahip istasyonların $f_{p_i}$ etki faktörlerinin ortalaması olan bir $f_p$ etki oranı önerilmektedir. $f_p$ farklı oran kısıtları kümelerinin karşılaştırılması ya da bir $c_k$ kriterini başka bir kriter ile değişiminin etkisini değerlendirmek için kullanılabilir.

$$f_p = \frac{\sum_{i \in I_y} f_{p_i}}{|I_y|} \tag{4.32}$$

$I_y$, en az bir tane $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan araç bulunduran istasyonlar kümesidir.

***Bir oran kısıtının oranının tanımlanması***

Oran kısıtının tanımlanması iş yükü fazla olan araçları göstermek için kriterin seçimi ve sıralamada bu araçların aralıklandırılması için oran hesaplanmasıdır. Bir önceki bölümde en uygun kriterin seçimi ile ilgili bir metot önerilmiştir. Bu bölümde ise her bir kriter ile ilgili oran hesaplaması metodu anlatılacaktır.

***Montaj işlem sürelerinin basitleştirilmesi***

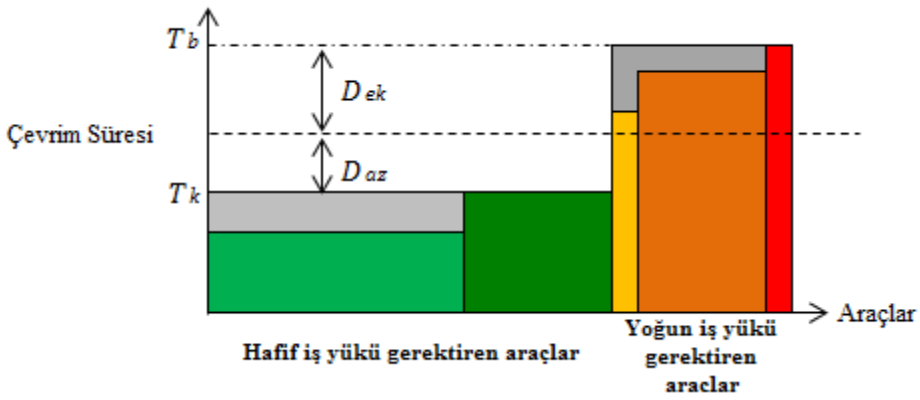
Araç çeşitliliğinin yüksek olduğu bir montaj hattında, istasyonlarda farklı işlemlerden kaynkalanan farklı $T_{i,j}$ değerleri oluşur. $p/q$ değerlerinin hesaplanması için her bir $T_{i,j}$ değerini ayrı ayrı ele alırsak, çok fazla hesaplama zorluğuna neden olur. Lesert ve diğ. (2010) bunu çözebilmek için Giard ve Jeunet (2006)'nın farklı işlemlerin olduğu istasyonları iki zamanlamalı bir istasyona getiren bir metot önerdiğini belirtmiştir.

i) $T_b$, $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan tüm araçlara atanır

ii) $T_k$, $T_{i,j} < T_{çevrim}$ olan tüm araçlara atanır

Şekil 4.12'de bu basitleştirme işleminin bir örneği görülmektedir. $T_b$ ve $T_k$, $T_{i,j} > T_{çevrim}$ ve $T_{i,j} < T_{çevrim}$ sürelerine sahip araçların en yüksek $T_{i,j}$ değerleridir. Bu karşılaşabilecek en kötü durumdur. Bu çalışmada da oran kısıtları oluşturulurken en kötü senaryo göz önünde bulundurulacaktır.

$p/q$ oranını hesaplamak için $T_b$ ve $T_k$ kullanılır. Gerçek hayatta bu istasyonda beş farklı montaj işlemi gerçekleştirilecektir. Peki bu basitleştirme işlemine göre bu hesaplamalar nasıl yapılıyor?




**Şekil 4.12 :** Bir istasyonunun proses sürelerinin basitleştirilmesi örneği (Lesert ve diğ, 2010, Sf. 977).

***Bir istasyon için oran hesaplaması***

$p$ ve $q$ değerleri; ilgili kritere sahip araçların sayısı ve üretilecek toplam araç sayısı olarak tanımlanır. Kriterin gerektirdiği montaj işlemleri ve ek iş yükü gerektiren diğer araçlar ele alınır. Bir aracın yarattığı gecikmenin büyüklüğü işlemlerin uzunluğuna bağlıdır ve bu gecikmeler ilgili kritere sahip olmayan araçların işlem uzunluğuna bağlı olarak az ya da çok telafi edilir. Bunun için $p$ ve $q$'nun hesaplanmasında sadece üretim hacmini kullanmak yetmez.

Literatürdeki yaklaşımlarda operatör iş yükü ve montaj işlem süreleri bilgisi dikkate alınarak $p/q$ oranı hesaplanır. Bolat ve Yano (1992a) iyileştirici bir sıralama prosedürü önermiştir (Lesert ve diğ, 2010). Yardımcı operatör ihtiyacı olmadan kabul edilebilen $T_{i,j} > T_{çevrim}$ olan maksimum sayıda araç ilk olarak sıralanır($p$).

Daha sonra $T_{i,j} < T_{çevrim}$olan maksimum sayıda araç gecikmeleri telafi etmek için sıralanır$(q - p)$.

Literatrüde benzer yaklaşımlar yer almaktadır. Lesert ve diğ.(2010) son dönemlerde Giard ve Jeunet (2006)'nın operatörün iş yüküne ve montaj sürelerini ele alarak bir $p/q$ oranı hesapladıklarını belirtmiştir. Yine literatürde Bolat ve Yano (1992a,b) ve Yano and Rachamadugu (1991) gibi önerilen hesaplama yöntemleri yer almaktadır. Bolat ve Yano(1992a) yenilemeli bir sıralama prosedürü önermişlerdir. Burada yardımcı operatöre gerek duymadan istasyonun kabul edebileceği (yani $p$) maksimum sayıda $T_{i,j} > T_{çevrim}$ aracın ilk olarak sıralanması gerektiği önerilmektedir. Daha sonra maksimum sayıda $T_{i,j} < T_{çevrim}$ araçlar$(q - p)$ gecikmeyi telafi etmek için ard arda dizilmelidir. Operatör boşa çıktında bu prosedürün tekrarlanması sırayı yenileyecektir, çünkü yardımcı operatörün çağrılmasından sonra ya da aracın tamamlanmasından sonra operatör başlagıçtaki yerine dönecektir. Bolat ve Yano(1991a) iş istasyonunun uzunlunu yapılacak iş sayısı bakımından tanımlamıştır. Buna göre Lesert ve diğ. (2010) aşağıda belirtilen zamanlamaları vermiştir, yine $p/q$'nun hesaplanışı aynı kalmıştır. Her bir sembol $i$ istasyonu içindir, basitleştirmek adına $i$ indisi kaldırılmıştır

$T_b$ ve $T_k$ önceki bölümlerde tanımlanmıştı. $D_{max}$ Operatörün yapabileceği maksimum gecikme, $D_{ek}$ ise $T_{i,j} > T_{çevrim}$ süresine sahip aracın operatörün iş yüküne ekleyeceği ek gecikmedir. $D_{az}$ ise $T_{i,j} < T_{süre}$ süresine sahip aracın sıraya eklenmesiyle gecikmedeki azalmadır. Buna göre $p$ ve $q$ aşağıdaki Denklem 4.36'deki gibi hesaplanır:

$$D_{az} = T_{çevrim} - T_k \quad \textbf{(4.33)}$$

$$D_{ek} = T_b - T_{çevrim} \quad \textbf{(4.34)}$$

$$R_{max} = (\text{Ust} - \text{Alt}) - T_{çevrim} \quad \textbf{(4.35)}$$

Önceden de belirtildiği gibi Ust ve Alt operatörün istasyondaki sınırlarıdır.

$$p = \frac{D_{max}}{D_{ek}} \text{ ve } q = p + \frac{p * D_{ek}}{D_{az}} \quad \textbf{(4.36)}$$

İlk yapılan çalışmalarda $p/q$ tek bir istasyon için ya da birden fazla istasyon olduğunda tüm istasyonları sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. Bu iki varsayımda endüstriyel uygulamalarda gerçekçi değildir. Bir sonraki bölümde birden fazla istasyonun iş yükü için bulunan $p/q$ değerinin nasıl seçileceği anlatılmaktadır.

***Bir oran kısıtının oranının hesaplanması***

Bir oran kısıtının kriteri birçok istasyon için kısıtlayıcı etken olabilir. Bir önceki bölümde hesaplanan oran sadece bir istasyonun verileri kullanılarak bulunmuştur. Sonuç olarak, birçok istasyon için geçerli olan bir kriter için farklı oranlar bulunabilir, fakat bir oran kısıtının sadece bir tane $p/q$ oranı olmalıdır.

Lesert ve diğ.(2010) belirli bir oran kısıtı için oran hesaplaması ile ilgili bir metot önermişler. Yöntem ile ilgili bazı tanımlar var:

**Tanım 1:** Eğer bir $q_0$ sırasındaki iş yükü yoğun $p_0$ araçlarının tüm olası kombinasyonları $p/q$ oranı ile ilgili ise Bir $p_0/q_0$oranı $p/q$ oranı ile uyumludur. Aşağıdaki Denklem 4.37 sağlanırsa $p'/q'$ oranı $p/q$ ile uyumludur.

$$\left\lfloor \frac{q}{q'} \right\rfloor * p' + \min\left(q - q' * \left\lfloor \frac{q}{q'} \right\rfloor, p'\right) \leq p \qquad \textbf{(4.37)}$$

Tanımdan dolayı $p_0 = p = 1$ ise $q' \geq q$'dur. $p_0/q_0 = 1/2$ olsun. $1/2$oranı $2/4$ oranı ile uyumludur çünkü $1/2$ oranına uyan her sıra $2/4$ oranına da uyar, fakat $2/4$ oranı $1/2$ oranı ile uyumlu değildir çünkü 2/4 oranına göre yapılandırılabilen sıralar $1/2$ oranını sağlamaz.

**Tanım 2:** Bir $p_{(o_k)}/q_{(o_k)}$ oranına sahip $o_k$ kriteri için Denklem 4.38 kullanılarak bir oran kümesi $R_{o_{P_k/Q_k}}$tanımlanabilir. Bu küme $p_{(o_k)}/q_{(o_k)}$ oranı ile uyumlu tüm $p'/q'$ oranlarını içerir. Bu eşitlikle oluşturulan küme sonsuz kümedir.

$$R_{o_{p_k/q_k}} = \left\{ p'_{(o_k)}/q'_{(o_k)} \middle| p'_{(o_k)} * \left\lfloor \frac{q_{(o_k)}}{q'_{(o_k)}} \right\rfloor + min\left( \begin{matrix} q_{(o_k)} - q'_{(o_k)k} * \\ \left\lfloor \frac{q_{(o_k)}}{q'_{(o_k)}} \right\rfloor, p'_{(o_k)} \end{matrix} \right) \leq \right.$$
$$\left. p_{(o_k)}, \forall \left(p'_{(o_k)}, q'_{(o_k)}\right) \in N^2, 0 < p'_{(o_k)} < q'_{(o_k)} \right\} \qquad \textbf{(4.38)}$$

$o_k$ kriterinin birçok istasyonu kısıtladığını farzedelim. Yukarıdaki tanımlar kullanılarak $o_k$'nın $p_{(o_k)}/q_{(o_k)}$ oranı hesaplanır: $o_k$ tarafından kısıtlanan her

$i$ istasyonu için Denklem 4.36 kullanılarak oran hesaplanır. Her olası oran için, Denklem 4.38 kullanılarak uyumlu oranların kümesi oluşturulur. Daha sonra ise Denklem 4.39 kullanılarak her bir istasyon için ortak oranlar bulunur. Son olarak da bu oranlar arasından en büyük $p_{(o_k)}/q_{(o_k)}$ oranı seçilir.

$$C_{o_k} = \bigcap_{i \in q_{o_k}} R_{o_{p_i/q_i}} \quad \textbf{(4.39)}$$

$q_{o_k}$ , $o_k$ tarafından kısıtlanan istasyonların kümesidir.

$$p_{(o_k)}/q_{(o_k)} = \max(\mathrm{x}) \quad x \in C_{c_{p_q/q_q}} \quad \textbf{(4.40)}$$

Yukarıdaki prosedürü bir örnekle anlatalım. Kriterin kayar kapı olup olmaması için bu kriterin oran kısıtının üç istasyonu kısıtladığını varsayalım. İlk istasyon 1/3 oranı ile ele alınsın(yani araç sırasında üç araçtan bir tanesi kayar kapılı olabilir). İkinci oran 2/4 ve üçüncü oran 2/3 olsun. Denklem 4.38 kullanılarak 1/3'ün uyumlu oran kümesi $R_{1/3} = \left\{\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \dots\right\}$'dir. Aynı şekilde $R_{2/4} = \left\{\frac{2}{4}, \frac{2}{5}, \frac{2}{6}, \dots, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots\right\}$ ve $R_{2/4} = \left\{\frac{2}{3}, \frac{2}{4}, \frac{2}{5}, \frac{2}{6}, \dots, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots\right\}$'dir. Bu istasyonların ortak uyumlu oranlarının kümesi $C_{o_k} = \{\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \dots\}$'dır(Denklem 4.39). Bu üç istasyondaki iş yükü yoğun araçların en büyük sayısını ürettiğimizde 1/3'ü seçeriz.

# 5. GELİŞTİRİLEN METODOLOJİ

Bu çalışmada ROADEF'2005'in araç araç sıralama probleminin yüksek öncelikli oran kısıtlarının birinci öncelikli, renk kısıtlarının ikinci öncelikli olduğu problemleri için bir sezgisel geliştirilmiştir. Yüksek öncelikli oran kısıtlarının optimzasyonu yapılmadan önce ilk olarak başlangıç algoritması ile bir başlangıç sırası oluşturulur, daha sonra bu sıra üzerinden yüksek öncelikli oran kısıtlarının ihlal sayısı minimize edilmeye çalışılır, çıkan en iyi sonuç üzerinden bu sonucu kötüleştirmeden renk kısıtlarının ihlal sayıları minimize edilmeye çalışılmaktadır. Algoritmanın ana akış şeması Şekil 5.1'deki gibidir. Bu bölümde algoritmanın aşamaları detaylı olarak anlatılacaktır.

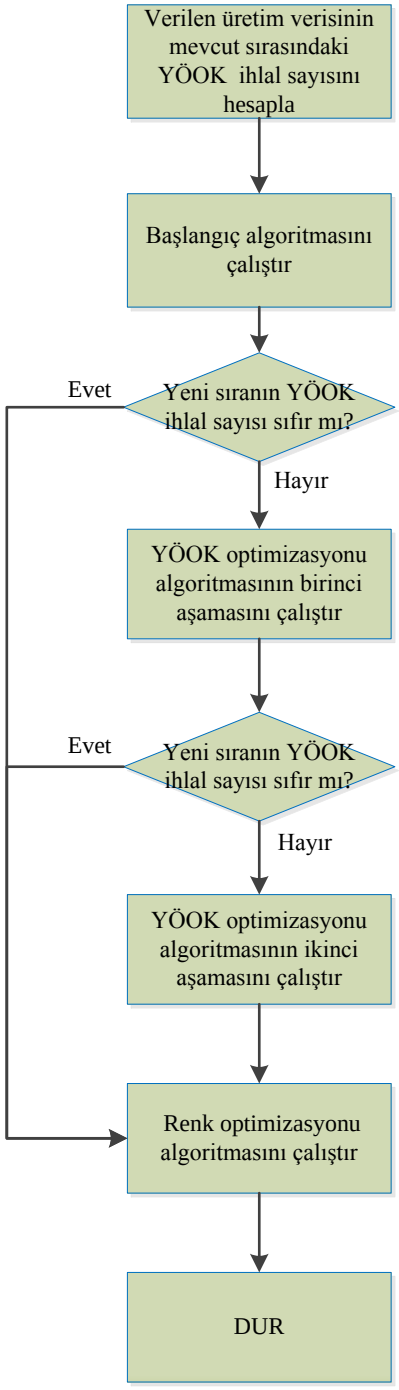
## 5.1 Başlangıç Algoritması

Bu çalışmada başlangıç algoritması olarak Gottlieb ve diğ.(2008)'nin önerdiği başlangıç algoritması ve seçim sezgisellerinden yararlanılmıştır

ROADEF 2005'de sunulan araç sıralama problemi verisinde D-1 yani bir önceki günden $q_{max}$ değeri kadar araç verilmektedir. Bu araçlar bir önceki günden çizelgelendiği için sabittir ve kesinlikle sırası değiştirilmeyecektir.

Başlangıç algoritması çizelgelenmiş ve çizelgelenmemiş iki araç kümesinden oluşur. Burada çizelgelenmemiş araçlar minimum ihlal oluşturma kriterine göre tek tek değerlendirilerek çizelgelenmiş araç kümesine eklenir. İhlal sayısı her bir araç çizelgelenmiş araç listesine eklendikten sonra Bölüm 2'de anlatıldığı şekilde hesaplanır. Önce her araç birinci sıraya eklenebilmesi için değerlendirilir. Minimum ihlal sayısı oluşturan araç çizelgelenmiş araç kümesinde birinci sıraya eklenir ve çizelgelenmemiş araç kümesinden çıkarılır. Aynı işlem çizelgelenmemiş araç kümesinde araç kalmayana dek tekrarlanır. Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de algoritmaların yapısı anlatılırken kullanılacak örnek veriye ait bilgiler yer almaktadır. Şekil 5.2 ve 5.3'de görüldüğü gibi öncelikle sıraya eklenecek birinci aracı bulmak için bütün araçlar sıraya eklenerek değerlendirilir, minimum ihlal sayısı

oluşturan araç sıraya eklenir. Daha sonra ikinci araç seçimi için geri kalan çizelgelenmemiş araçlar ikinci sıraya eklenerek değerlendirilir, minimum ihlal sayısı oluşturan araç ikinci sıraya kalıcı olarak eklenir.




**Şekil 5.1** Geliştirilen algoritmanın ana akış şeması.

**Çizelge 5.1 :** Örnek verisindeki bir önceki günden çizelgelenmiş araçlar.

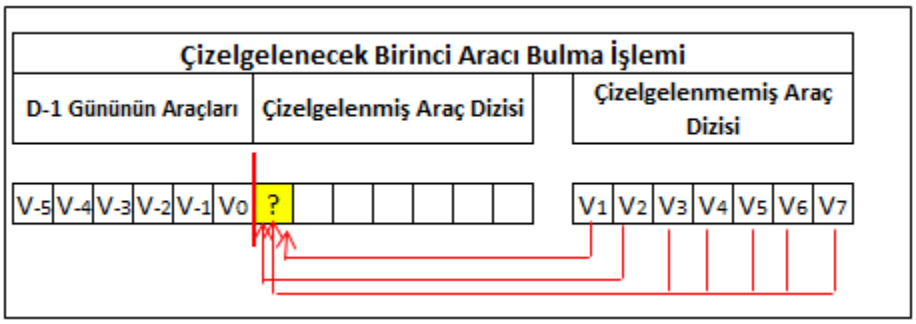
| D-1 gününden gelen araçlar | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Araç \ Kısıt | $O_1$ | $O_2$ | $O_3$ | $O_4$ |
| $V_{-5}$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $V_{-4}$ | 1 | 0 | 1 | 1 |
| $V_{-3}$ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| $V_{-2}$ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| $V_{-1}$ | 1 | 1 | 0 | 0 |
| $V_0$ | 1 | 1 | 0 | 1 |

**Çizelge 5.2 :** Örnek verisindeki çizelgelenecek araçlar.

| D Gününde Çizelgelenecek Araçlar | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Araç \ Kısıt | $O_1$ | $O_2$ | $O_3$ | $O_4$ |
| $V_1$ | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $V_2$ | 0 | 1 | 0 | 1 |
| $V_3$ | 1 | 1 | 0 | 0 |
| $V_4$ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| $V_5$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $V_6$ | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $V_7$ | 0 | 0 | 0 | 1 |

**Çizelge 5.3 :** Örnek verisinde kullanılacak oran kısıtları.

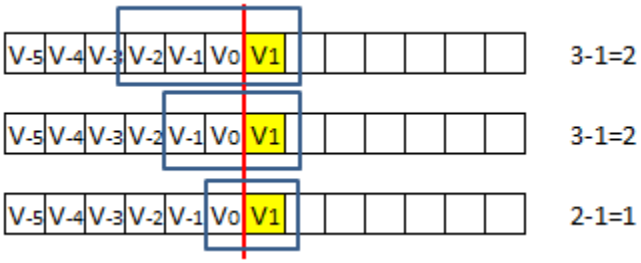
| Oran Kısıtları | | | |
|---|---|---|---|
| $O_1$ | $O_2$ | $O_3$ | $O_4$ |
| 1/2 | 1/4 | 3/5 | 2/7 |




**Şekil 5.2 :** Çizelgelenecek aracı bulma işlemi örneği.

Yukarıdaki örneğin bilgilerine göre işlemleri yaparsak, öncelikle $v_1$ aracını birinci sıraya koyabilmek için deniyoruz.

$v_1$ aracı birinci sıraya konulduğunda $o_2$ kısıtı için oluşan toplam ihlal sayısının hesaplanması Şekil 5.3'deki gibidir.




**Şekil 5.3 :** İhlal sayısı hesaplama örneği.

Diğer kısıtlar ve araçlar için ortaya çıkan ihlal sayıları Çizelge 5.4'deki gibidir.

**Çizelge 5.4 :** Çizelgelenecek araçların birinci sıra için oluşturdukları ihlal sayısı.

| **Araçların Oluşturdukları İhlal Sayısı** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Kısıt / Araç** | **O1** | **O2** | **O3** | **O4** | **Toplam** |
| **V1** | 1 | 5 | 0 | 6 | 12 |
| **V2** | 0 | 5 | 0 | 10 | 15 |
| **V3** | 1 | 5 | 0 | 6 | 12 |
| **V4** | 0 | 2 | 0 | 10 | 12 |
| **V5** | 1 | 5 | 0 | 10 | 16 |
| **V6** | 1 | 2 | 0 | 10 | 13 |
| **V7** | 0 | 2 | 0 | 10 | 12 |

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi birinci sıraya eklendiğinde, $v_1$, $v_3$, $v_4$ ve $v_7$ araçlarının dördü de minimum ihlal sayısını oluşturmaktadır. Eğer sadece bu araçlardan biri minimum ihlal sayısını oluştursaydı, o aracı birinci sıraya yerleştirecektik. Karşılaştığımız bu durumda bu dört araçtan birini seçebilmek için öncelikle $F_1$ fonksiyonu değerlerine bakmak gerekir. $F_1$ fonksiyonunun Denklem 5.1'de tanımlanmıştır.

Bu bölümde Bölüm 2'de araç sıralama probleminin matematiksel tanımında belirtilen semboller ve tanımlar kullanılacaktır.

Eğer minimum ihlal sayısı oluşturan birden fazla araç mevcut ise burada bu araçlardan birini seçebilmek için Gottlieb ve diğ.'nin 2003 yılında önerdiği Dinamik Düzgün Dağılım olan $F_1$ fonksiyonu devreye girer. $F_1$ fonksiyonu Denklem 5.1'deki gibi tanımlanmıştır. $F_1$ fonksiyonunun amacı çizelgelenmiş ve D gününde üretilecek araçların kümesinde ilgili kısıta sahip araçların bulunma oranlarını dengelemektir. Başka bir deyişle hem çizelgelenmiş araç kümesinde hemde D gününde üretilecek araçların kümesinde ilgili kısıta sahip araç sayısı bakımından homojenliğin sağlanmasıdır.

$$F_1(v,\pi) = \sum_{j=1}^{m} \left\{ (r(v,o_k) = 0) XOR \left( \frac{r(V,o_k)}{n} > \frac{r(\pi,o_k)}{|\pi|} \right) \right\} \quad \textbf{(5.1)}$$

Örneğin bir kısıta sahip bir aracı ekleyip ekleyemeyeceğimizi değerlendiriyoruz. Eğer bu kısıta sahip araçları sıraya homojen bir şekilde almazsak, sonlarda toplu olarak aldığımızda bu kısıtdan meydana gelen ihlal sayısı fazlalaşır.

Yukarıdaki örnekte birinci sıraya yerleştirebilecek dört aday araç vardı. Bu araçlara uygulanan $F_1$ fonksiyonunun örneği şu şekildedir:

$v_1$ aracı için $F_1$ fonksiyonunu hesaplayalım;

$$F_1(v_1,\pi) = \sum_{k=1}^{4} (r(v_1,o_k) = 0 \; XOR \; (\frac{r(V,o_k)}{n} > \frac{r(\pi,o_k)}{|\pi|}))$$

$$= \left( r(v_1,o_1) = 1 \; XOR \; \left( \frac{r(V,o_1)=8}{n=13} < \frac{r(\pi,o_1)=4}{|\pi|=6} \right) \right)$$

$$+ \left( r(v_1,o_2) = 1 \; XOR \; \left( \frac{r(V,o_2)=8}{n=13} < \frac{r(\pi,o_2)=4}{|\pi|=6} \right) \right)$$

$$+ \left( r(v_1,o_3) = 1 \; XOR \; \left( \frac{r(V,o_3)=7}{n=13} < \frac{r(\pi,o_3)=4}{|\pi|=6} \right) \right)$$

$$+ \left( r(v_1,o_4) = 0 \; XOR \; \left( \frac{r(V,o_4)=10}{n=13} < \frac{r(\pi,o_4)=5}{|\pi|=6} \right) \right)$$

=0+0+0+1=1

Aynı işlemler uygulandığında diğer araçlar için çıkan $F_1$ değerleri Çizelge 5.5'deki gibidir.

**Çizelge 5.5 :** Örnek veri için F1 değerleri.

| Araç | F1 Değeri |
|---|---|
| **V3** | 2 |
| **V4** | 2 |
| **V7** | 2 |

Yukarıdaki örnekte $F_1$ fonksiyonunu maksimize eden araç $v_3$ aracı olsaydı ikinci araç olarak sıraya yerleştirecektik fakat üç araç için de $F_1$ değerleri eşit çıkmıştır.

$F_1$ fonksiyonu çalıştıktan sonra hala bu araçlar arasında eşitlik varsa Gottlieb ve diğ. (2003) 'nin önerdiği kullanım oranlarının dinamik toplamı olan $F_2$ fonsiyonu devreye girecektir. $F_2$ fonksiyonu Denklem 5.2'deki gibi formüle edilmiştir. Burada amaç

çizelgelenmemiş araç sırasında oran kısıtı değerini daha fazla aşan araçların çizelgelendirilmesidir ki yine araç kümeleri arasındaki homojenlik bozulmasın.

$$F_2(v,\pi) = \sum_{k=1}^{m}\{r(v,o_k).\,dinamik\ kullanım\ oranı\ (o_k,\pi)\} \qquad \textbf{(5.2)}$$

Dinamik kullanım oranı çizelgelenmiş araç kümesine her yeni araç eklenmesinden sonra hesaplanır ve her bir kısıt için hesaplanır. Amacı çizelgelenmemiş araç sırasındaki ilgili kısıta sahip araçların bu kümedeki araç sayısına oranının oran kısıtını ne kadar sağladığını görmektir. Aşağıdaki gibi formülize edilmiştir.

$$Dinamik\ Kullanım\ Oranı(o_k) = \left(\frac{r(V/\langle\pi\rangle,o_k)}{|V/\langle\pi\rangle|} \Big/ \frac{p(o_k)}{q(o_k)}\right) \qquad \textbf{(5.3)}$$

Görüldüğü gibi yukarıdaki örnekte üç araç $F_1$ fonksiyonu için maksimum değer vermiştir. Bu yüzden bu araçlara $F_2$ fonksiyonu uygulanacaktır.

Öncelikle Denklem 5.3 kullanılarak her bir kısıtın dinamik kullanım oranlarının hesaplanması gerekmektedir, $o_1$ kısıtı için hesaplanan dinamik kullanım oranı aşağıdaki gibidir.

$$Dinamik\ Kullanım\ Oranı(o_1) = \left(\frac{r(V/\langle\pi\rangle,o_1)}{|V/\langle\pi\rangle|} \Big/ \frac{p(o_1)}{q(o_1)}\right) = \left(\frac{4}{7} \Big/ \frac{1}{2}\right) = 1{,}142857$$

Diğer kısıtlar için çıkan dinamik kullanım oranı sonuçları Çizelge 5.6'daki gibidir

**Çizelge 5.6 :** Diğer kısıtlar için dinamik kullanım oranları.

| Kısıt | Dinamik Kullanım Oranı |
|---|---|
| **O1** | 1,142857143 |
| **O2** | 2,285714286 |
| **O3** | 0,952380952 |
| **O4** | 2,500 |

Daha sonra her bir araç için kullanım oranlarının dinamik toplamı hesaplanmaktadır ve bu değeri maksimum yapan araç çizelgelenecek araç olarak seçilmektedir, örnek olarak $v_3$ aracı için hesaplayalım:

$F_2(v_3,\pi) = \sum_{k=1}^{4}\{r(v_3,o_k).\,dinamik\ kullanım\ oranı\ (o_k,\pi)\}$

$=(1 * 1{,}142857143) + (1 * 2{,}285714286) + (0 * 0{,}952380952) + (0 * 2{,}5)$

$= 3{,}428571$

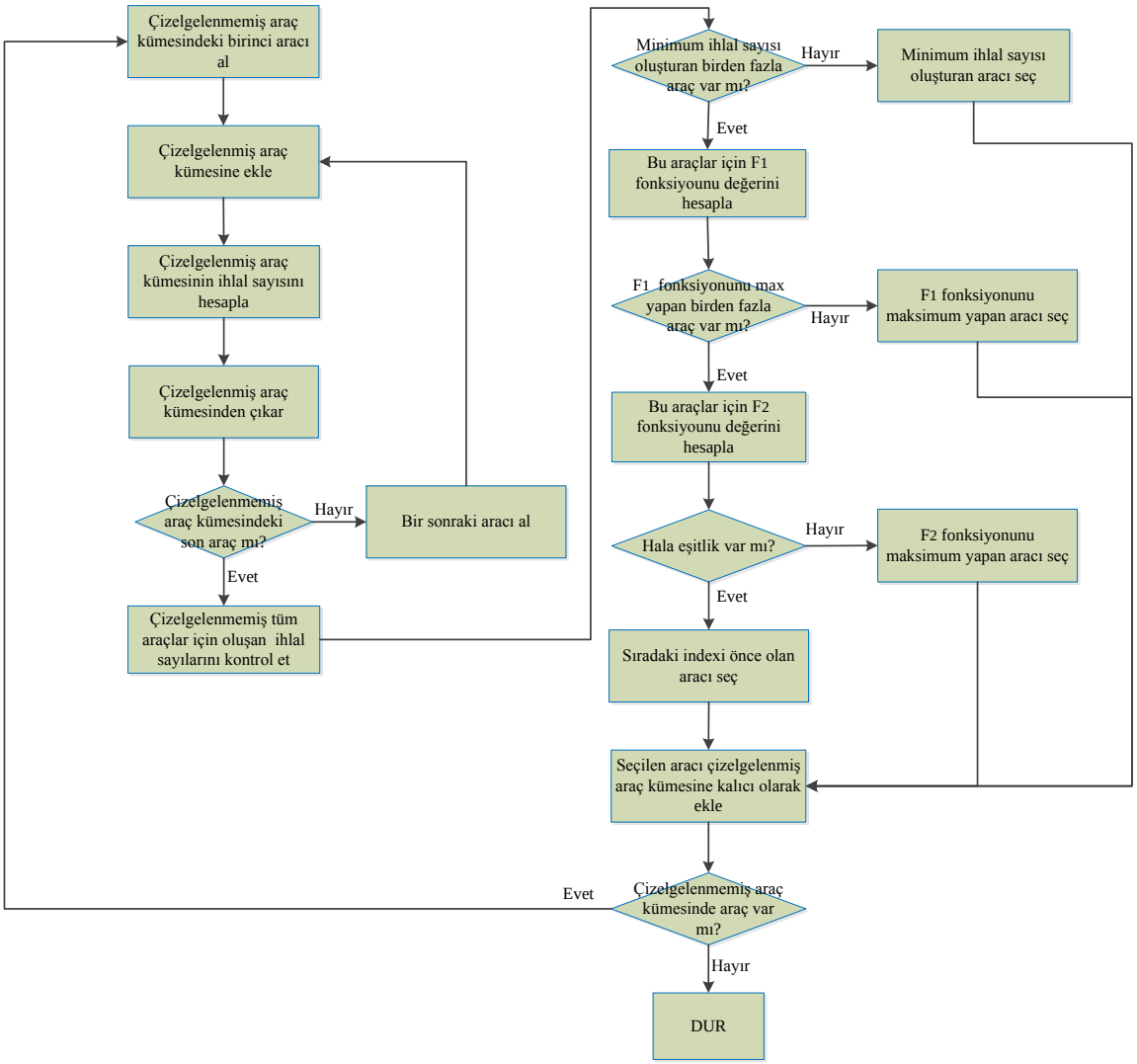
Diğer araçlar için bulunan $F_2$ değerleri Çizelge 5.7'deki gibidir.

**Çizelge 5.7 :** Diğer araçlar için F2 değerleri.

| Araç | F2 Değeri |
|---|---|
| **V3** | 3,428571 |
| **V4** | 3,452381 |
| **V7** | 3,452381 |

Hala araçlar arasında bir eşitlik varsa (bu örnekte $v_4$ ve $v_7$ araçlarında olduğu gibi) bu durumda çizelgelenmemiş araç listesinde indeksi önce olan araç (bu örnekte $v_4$) seçilir.

Başlangıç Algoritmasının akış şeması Şekil 5.4'deki gibidir.




**Şekil 5.4 :** Başlangıç algoritmasının akış şeması.

## 5.2 Yüksek Öncelikli Oran Kısıtlarının Optimize Edilmesi

Bu çalışmada yüksek öncelikli oran kısıtlarının azaltılması için arama yaparken hamle olarak yer değiştirme kullanılacaktır ve hangi araçların yer değiştirileceğine karar veren iki sezgisel önerilmektedir. Ek olarak, birinci sezgiselde yer değiştirilecek aday araç çifti aramasını genişletmek için tavlama benzetimi algoritması kullanılacaktır.

### 5.2.1 Yer değiştirilecek araçların bölgesel ihlal sayısı değişimlerine göre karar verilmesi

Yüksek öncelikli oran kısıtlarının optimizasyonunda ilk aşama yer değiştirilen araçların bulundukları konumlarını ne kadar iyileştirdiğine göre değerlendirilerek seçilmesidir. Araçlar yer değiştirildiğinde tüm sırayı iyileştirmesine rağmen kendi bölgelerinde kötüleştirebilir. Bu çalışmada öncelikli olarak bölgesel ihlal sayılarını iyileştiren araç değişimleri kalıcı değişim olarak kabul edilerek uzun vadede iyileşmelere daha çok katkıda bulunması hedeflenmektedir. Burada bölgesel ihlal sayısı, aracın bulunduğu pozisyonun dahil olduğu alt kısıt sıralarının oluşturduğu ihlal sayısıdır. Örneğin Çizelge 5.8 ‘de başlangıç algoritması anlatılırken kullanılan örneğin başlangıç algoritması, çizelgelenmiş son hali, Şekil 5.5’de ise 3. ve 6. pozisyonlardaki araçların 1/4 kısıtı için dahil olduğu sıraların başlangıç pozisyonları görülmektedir. Görüldüğü gibi $v_4$ aracı D-1 gününden gelen araçların son pozisyonundan başlayan 3. pozisyona kadar başlayan 4’lü sıralarda yer almaktadır ve bu pozisyonlarda oluşan toplam ihlal sayılarında etkisi bulunmaktadır. Aynı şekilde $v_2$ aracının da 3,4,5 ve 6. pozisyonlardan başlayan alt sıralarda oluşan ihlal sayılarında etkisi vardır. $v_4$ aracının yani 3. pozisyonun etkisinin bulunduğu toplam ihlal sayısı 1+1+1+1= 4, $v_2$ aracının yani 6. pozisyonun etkisinin bulunduğu toplam ihlal sayısı ise 1+2+1+1=5 ‘dir. Araçlar yer değiştirildiğinde ise 3. pozisyonun etkisinin bulunduğu toplam ihlal sayısı 2+2+2+1=7, 6. pozisyonun etkisinin bulunduğu toplam ihlal sayısı ise 1+1+0+0=2’dür. Görüldüğü gibi 3. pozisyon için 3 ihlal sayısı kadar kötüleşme görülürken, 6. pozisyon için 3 ihlal sayısı iyileşme görülmektedir. Bu çalışmada algoritmanın öncelikle iki taraf için de iyileşme sağlayan araç değişimlerini aday araç olarak kabul ediyoruz. Bu koşulu sağlamayan aday araçlar ise tavlama benzetimi yaklaşımı kullanılarak belli bir olasılıkla kabul edilmektedir.

**Çizelge 5.8 :** Başlangıç algoritması ile oluşturulan örnek veri sırası.

| | Pozisyon | Araç | O1 | O2 | O3 | O4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D-1 gününden gelen araçlar | - | V-5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | - | V-4 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| | - | V-3 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | - | V-2 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | - | V-1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | - | V0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| D gününde çizelgelenecek araçlar | 1 | V7 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 2 | V3 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 3 | V4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 4 | V1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | 5 | V6 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 6 | V2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 7 | V5 | 1 | 1 | 1 | 0 |

| V-5 | V-4 | V-3 | V-2 | V-1 | V0 | V7 | V3 | V4 | V1 | V6 | V2 | V5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

**Şekil 5.5 :** Bölgesel ihlal sayısını etkileyecek sıraların başlangıç pozisyonları.

Şekil 5.6'da bu yöntemin akış şemasını göstermektedir. Akış şemasında kullanılan simgeler ve açıklamalar aşağıdaki gibidir:

$S^*$: Bulunan en iyi ihlal sayısı

$S_1$: Geçici yer değiştirmeden önce bulunan ihlal sayısı

$S_2$: Geçici yer değiştirmeden sonra bulunan ihlal sayısı

$b_i$: $i$ ve $j$ pozisyonundaki araçlar geçici olarak yer değiştirildiğinde $i$ pozisyonunun yer değiştirmeden önce dahil olduğu bölgesel ihlal sayısı

$b_j$: $i$ ve $j$ pozisyonundaki araçlar geçici olarak yer değiştirildiğinde $j$ pozisyonunun yer değiştirmeden önce dahil olduğu bölgesel ihlal sayısı

$c_i$: $i$ ve $j$ pozisyonundaki araçlar geçici olarak yer değiştirildiğinde $i$ pozisyonunun yer değiştirmeden sonra dahil olduğu bölgesel ihlal sayısı

$c_j$: $i$ ve $j$ pozisyonundaki araçlar geçici olarak yer değiştirildiğinde $j$ pozisyonunun yer değiştirmeden sonra dahil olduğu bölgesel ihlal sayısı

$\Delta$: Geçici yer değiştirme hamlesi gerçekleştirildiğinde $i$ ve $j$ pozisyonlarındaki oluşan bölgesel ihlal sayısı farklarının toplamıdır.

$\Delta^*$: En iyi $S^*$ değerini veren $i$ ve $j$ pozisyonlarındaki araçların yer değişiminde oluşan $\Delta'$dir.

$Poz^*$: $j$ döngüsü sonunda $S^*$ değerini sağayan $j$ pozisyonudur.

Bu aşamada kullanılan algoritmayı ayrıntılı olarak ele alalım:

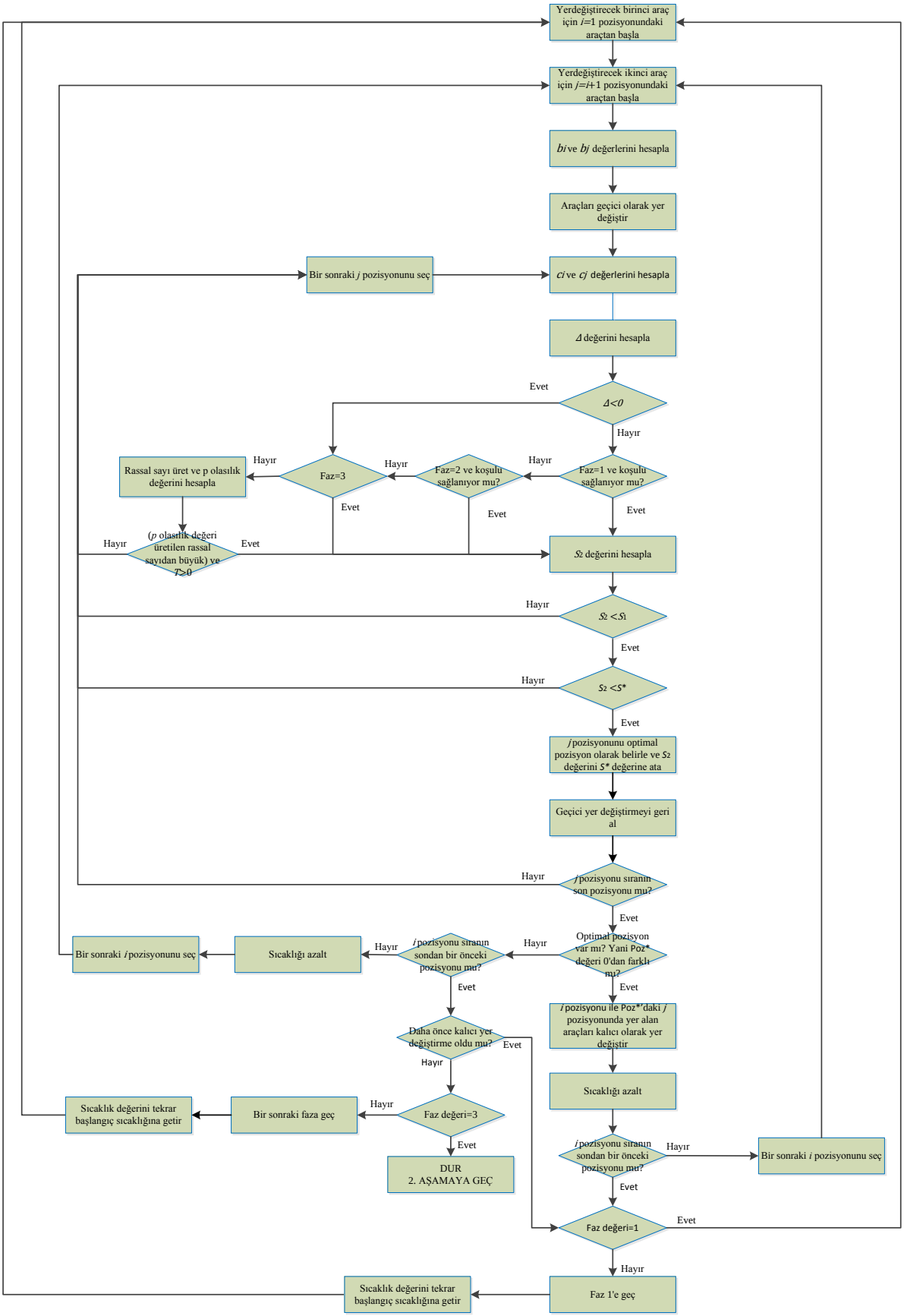
Algoritma üç fazdan oluşmaktadır. Fazların kullanılma sebebi bu aşamanın amacı olan iki taraflı bölgesel iyileşme sağlayan araç yer değiştirmelerine öncelik verilerek bu koşulun sağlanmama durumunda farklı seçenekleri de değerlendirebilmektir. Her faz için ayrı bir döngü oluşturulmamakla birlikte bütün fazlar kullanılan faz koşullarının değerlendirilmesiyle aktif hale gelmektedir. Bu kurallar algoritmanın akışına göre sırası geldiğinde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Genel algoritma döngüsü üç faz boyunca kalıcı yer değiştirme yapılamayana kadar çalışır.

Genel algoritma döngüsü faz 1 ile başlar ve yer değiştirilecek $i$ ve $j$ araçlarının arama uzayının oluşturulduğu iki ana döngüden oluşmaktadır. Bu döngüler temel olarak şu şekilde çalışmaktadır; ilk döngü $i = 1$ pozisyonu ile başlayan $i$ döngüsüdür. $i$ döngüsünde seçilen $i$ pozisyonundaki araç $j = i + 1$ ve $i$. araçtan sonra gelen tüm araçlar teker teker $j$ aracı döngüsünde geçici olarak yer değiştirilerek değerlendirilir. $j$ aracı döngüsüne ait kurallar ve yaklaşımlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Bir $i$ pozisyonundaki araç için değerlendirilmeye alınan $j$ pozisyonundaki araçların geçici yer değiştirilmesi sonucunda bulunduğu faza ait koşullara göre iyileşme sağlayan araçlar var ise en iyi sonucu veren araçla kalıcı olarak yer değiştirilir ve bir sonraki $i$ pozisyonundan devam edilir, sağlanamıyorsa da herhangi bir kalıcı yer değiştirme yapılmadan bir sonraki $i$ pozisyonundaki araç için $j = i + 1$ ve sonrasındaki pozisyonundaki araçlar değerlendirilir. $i$ döngüsü boyunca herhangi bir uygun kalıcı yer değiştirme bulunamazsa faz değeri artırılarak $i$ döngüsü tekrar başlatılır.

Ele alınan bir $i$ pozisyonundaki araç ile $j$ pozisyonundaki aracın kalıcı olarak yer değiştirilip değiştirilemeyeceğinin değerlendirilmesi $j$ aracı döngüsü içerisinde şu şekilde olacaktır:

***Bölgesel ihlal sayılarının oluşturulması***

Araçlar geçici olarak yer değiştirilmeden önce pozisyonların bölgesel ihlal sayıları ($b_i$ ve $b_j$) hesaplanır. Bölgesel ihlal sayıları Denklem 5.4'deki gibi formülize edilmiştir.




**Şekil 5.6 :** YÖOK optimizasyonu birinci aşamasının akış şeması.

$$b_i = \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=i-(q(o_k)-1)}^{i} \sum_{\substack{\pi' \\ |\pi'|=q(o_k) \\ \pi' \subseteq \pi}} max\{0, r(\pi', o_k) - p(o_k)\} \quad \textbf{(5.4)}$$

Araçlar geçici olarak yer değiştirilir ve yeni sıra için $i$ ve $j$ pozisyonlarının bölgesel ihlal sayıları ($c_i$ ve $c_j$) yine Denklem 5.4'deki gibi hesaplanır.

***Δ değerinin hesaplanması ve Δ< 0 kontrolünün yapılması***

Δ değeri Denklem 5.5'deki gibi hesaplanır.

$$\Delta = (b_i - c_i) + (b_j - c_j) \quad \textbf{(5.5)}$$

Δ değerinin 0'dan küçük olup olmadığının kontrolü yapılır. Bu kontrol iki tarafı da iyileştiren yer değişimlerinin aday çözüm olarak kabul edimesi ile ilgilidir, bu kuralın konulma sebebi tüm sırayı iyileştiren çözümlerin yer değiştirildiği pozisyonların bölgelerini de iyileştirerek uzun vadede daha iyi sonuçlar elde etmektir, fakat bu yaklaşım çözüm uzayını oldukça daraltmaktadır. Çünkü iki tarafı da bölgesel olarak kötüleştiren fakat toplam ihlal sayısını iyileştiren yer değiştirmeler varolabilir. Bundan dolayı yer değiştirilecek araçların aday olarak seçilmesi Δ değerine bağlı olarak fazlara bölünmüştür. Faz koşullarını sağlayan aday araçların toplam sırayı iyileştirip iyileştirmediği kontrol edilir.

***Faz koşulları***

Algoritmanın fazlara ayrılma sebebi, yerdeğiştirmeleri sonucunda $\Delta > 0$ olan araçların öncelikli olarak aday çözüm olarak seçilmesidir. Bu koşulun sağlanmaması durumunda da arama uzayını daraltmamak için farklı faz değerleri ile diğer durumlar da değerlendirilir..

*Faz 1:* Hem $i$ hem de $j$ pozisyonlarının bölgesel ihlal sayılarının iyileşmesidir. ($(b_i - c_i) > 0$ ve $(b_j - c_j) > 0$). Bu faz için bu koşul sağlanmadığında bir sonraki $j$ aracı $i$ aracı ile değerlendirilmeye alınır.

*Faz 2*: $i$ ve $j$ pozisyonlarından birinin bölgesel ihlal sayısının kötüleşirken diğerinin iyileşmesi ve iyileşmenin kötüleşmeden daha fazla olması durumunda ($\Delta > 0$) da bu araçlar değerlendirilmeye alınacaktır.

*Faz 3*: $\Delta < 0$ olma durumu da değerlendirmeye alınacaktır.

Faz 1 ve Faz 2 için ($\Delta < 0$) olma durumu ortaya çıkarsa bu araçlar belirli bir olasılıkla aday araç olarak kabul edilir

***j Aracının toplam ihlal sayısına etkisi açısından değerlendirilmesi***

Yer değiştirmeleri sonucundaki bölgesel ihlal sayıları değişimine göre kabul edilen araçlar bu kısımda yer değiştirmelerinin toplam ihlal sayısını iyileştirip iyileştirmediğine göre değerlendirilir. Yer değiştirdikten sonra ihlal sayısını azaltan ($S_2 < S_1$) araçlar değerlendirilmeye devam eder.

***j Aracının i aracı ile değiştirilebilecek optimal araç olarak kabul edilmesi***

Optimal araç kabul edilme kriteri $S_2 < S^*$ olmakla birlikte ilk $S^*$ değişkeninin değeri başlangıç algoritması ile çizelgelenen araç sırasının oluşturduğu toplam ihlal sayısıdır. Örneğin Çizelge 5.8 'deki örnek için başlangıç algoritması sonucunda bulunan ihlal sayısı 38 çıkmaktadır yani bu örnek için algoritmanın ilk $S^*$ değeri 38'dir. Geçici yer değiştirmelerde $S^*$'ı iyileştiren hamleler sonucunda $S^*$ güncelleneceği için her kalıcı yer değiştirmeden sonra oluşan ihlal sayısı değeri yeni $S^*$ değeri olur ve bir sonraki döngüde yeni değeri kullanılır. $S_2 < S^*$ eşitliğini sağlayan $j$ değeri optimal pozisyon değeri ($Poz^*$) olarak belirlenir ve en iyi ihlal sayısı değişkeni($S^*$) $S_2$ değeri olarak güncellenir.

$j = i + 1$ ile başlayıp sıranın sonuna kadar tüm araçlar bu döngü içerisinde $i$ aracı ile yerdeğiştirilerek yukarıda belirtilen aşamalar ile değerlendirilir. Sıranın son aracı da değerlendirildikten sonra eğer Poz$^*$ değeri 0'dan farklı ise $i$ ve $j$ pozisyonlarındaki araçlar kalıcı olarak yer değiştirilir.

Döngüde $S_1$ değerlerinin ilk değerleri yine başlangıç algoritması ile çizelgelenen araç sırasının oluşturduğu toplam ihlal sayısıdır. Belirli bir $i$ aracı için her $j$ aracı geçici olarak yer değiştirildiğinde yer değiştirme sonrası oluşan ihlal sayısı $S^*$ değerinden küçükse $S^*$ bu değer olarak güncellenir. En sonunda $i$ aracı için $S^*$ değeri sonucu veren $j$ aracı optimal araç olarak kabul edilir ve bu araçlar kalıcı olarak yer değiştirilir.

#### 5.2.1.1 Tavlama benzetimi yaklaşımı

Araçların değerlendirilmeye alınma koşulları yukarıda belirtildiği gibi fazlara göre değişiklik göstermektedir. Bu fazlara göre ($\Delta < 0$) olma durumunda araçlar Faz 1 ve Faz 2'de değerlendirilmeye alınmayacak sadece Faz 3'de değerlendirmeye alıncaktır.

fakat bu durum arama uzayını daraltacağı için ($\Delta < 0$) olma durumundaki araçlar da Faz 1 ve Faz 2'de tavlama benzetimi yaklaşımı kullanılarak belirli bir olasılıkla aday araç olarak kabul edilip değerlendirilmeye alıncaktır.

Kullanılan parametreler ve fonksiyonlar aşağıdaki gibidir:

**Soğuma oranı ($\alpha$):** Bölüm 6'da tavlama benzetimi yaklaşımı için oluşturulan deney tasarımın ayrıntılarından görülebileceği gibi en iyi sonuç veren soğuma oranı değeri 0.99 çıkmıştır.

**Başlangıç sıcaklığı($t$)**: Yine deney tasarımında belirlenen en uygun başlangıç sıcaklığı değeri 10000'dir

**Aynı sıcaklık değerinde çözüm üretme sayısı:** Sıcaklık değeri $i$ döngüsündeki her $i$ aracı değişiminde yapılır. Örneğin $n$ adet araçtan oluşan bir sıra için $i$ araç sayısı öncelikle $n, j$ araç sayısı da $n-1$ adet içindir yani örneğin $i = 1$ aracı için aynı sıcaklık değerinde yer değiştirilmesi denenecek $j$ aracı sayısı olan $(n-1)$ o sıcaklık değerinde üretilecek çözüm sayısı olacaktır. Bu değer bu algoritmada sabit bir sayı olmayacak $i$ aracı değiştikçe dinamik olarak azalacaktır.

**Soğutma fonksiyonu:** Soğutma fonksiyonu Denklem 5.6'daki gibi tanımlanmıştır. Bu denklemde $F(t)$ mevcut durumdaki sıcaklık, $F(t+1)$ soğuma gerçekleştikten sonraki sıcaklıktır.

$$F(t+1) = F(t) * \alpha \qquad \textbf{(5.6)}$$

### 5.2.2 Kısıtların toplam ihlal sayısına etkisine göre yer değiştirilecek araçların karar verilmesi

Bu aşamada amaç çözümdeki ihlal sayılarına neden olan araçların öncelikli olarak ele alınarak çözümde de hızlı bir iyileşme sağlamaktır. Bu düşüncenin temeli, Pareto Prensibine dayanmaktadır: "Sonuçların %80'i etkenlerin %20'sinden kaynaklanır". Bu aşamada oran kısıtlarının birinci aşamada bulunan sıranın ihlal sayısına etkileri hesaplanarak problem ele alınır.

Bu aşamaya ait akış şeması Şekil 5.7'deki gibidir. Akış şemasında kullanılan semboller ise aşağıdaki gibidir.

$S_1$: Geçici yer değiştirmeden önce bulunan ihlal sayısı

$S_2$: Geçici yer değiştirmeden sonra bulunan ihlal sayısı

$\Delta_1$: Eski delta değeridir. Bu değer geçici yer değiştirmeden sonra yeni deltanın daha iyi olma durumunda güncellenir ve her kalıcı yer değiştirmeden sonra sıfırlanır.

$\Delta_2$: Yeni delta değeridir. Geçici yer değiştirme sonucunda bulunan delta değeridir. Aşağıdaki Denklem 5.7 ile açıklanabilir.

$$\Delta_2 = S_1 - S_2 \quad \textbf{(5.7)}$$

$E_1$: İlgili oran kısıtı için en çok bölgesel ihlal sayısına sahip araçların %20'sinin en az bölgesel ihlal sayısına göre sıralandığı liste

$E_2$: İlgili oran kısıtı için araçların en az bölgesel ihlal sayısından en çok bölgesel ihlal sayısına göre sıralandığı liste.

$k : E_1$ listesinden seçilen aracın mevcut sıradaki pozisyonu

$l : E_2$ listesinden seçilen aracın mevcut sıradaki pozisyonu

Bu aşamada geliştirilen metodolojiyi ayrıntılı olarak ele alalım:

***Oran kısıtlarına göre ihlal sayılarının hesaplanması***

Hangi oran kısıtının toplam ihlal sayısını en çok etkilediğini belirleyebilmek için mevcut sıra üzerinden her bir kısıt için ihlal sayısı hesaplanır. Daha sonra kısıtlar ihlal sayılarına göre büyükten küçüğe göre sıralanır ve bu sıraya göre kısıtlar değerlendirilmeye başlanır.

Çizelge 5.8'deki örnek durumu ele alırsak; her bir kısıtın oluşturduğu ihlal sayısı büyükten küçüğe doğru sıralanmış Çizelge 5.9'daki gibidir ve görüldüğü gibi toplam ihlal sayısına en çok etkisi olan oran kısıtı 26 ihlal sayısı ile $o_4$'dür. Bundan dolayı $o_4$ oran kısıtından başlamak üzere sırasıyla tüm kısıtlar için değerlendirme yapılacaktır.

**Çizelge 5.9 :** İhlal sayılarına göre kısıtların sıralanışı.

| Oran Kısıtları | İhlal Sayısı |
|---|---|
| **Toplam** | 38 |
| **O4** | 26 |
| **O2** | 11 |
| **O1** | 1 |
| **O3** | 0 |

Her bir kısıt için araçların bulundukları mevcut pozisyonlarındaki bölgesel ihlal sayıları hesaplanır.

***Oran kısıtları bazında her bir araç için bölgesel ihlal sayısının hesaplanması***

Bu kısımda oran kısıtlarının oluşturduğu ihlal sayılarını araçların ilgili oran kısıtı ile kısıtlanıp kısıtlanmadığı etkilediği için, her bir aracın o oran kısıtı için içerisinde yer aldığı $q(o_k)$ sıralarındaki ihlal sayılarının toplamı olan bölgesel ihlal sayıları hesaplanır

Bölgesel ihlal sayılarının hesaplanması bir önceki başlık altında ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştı.

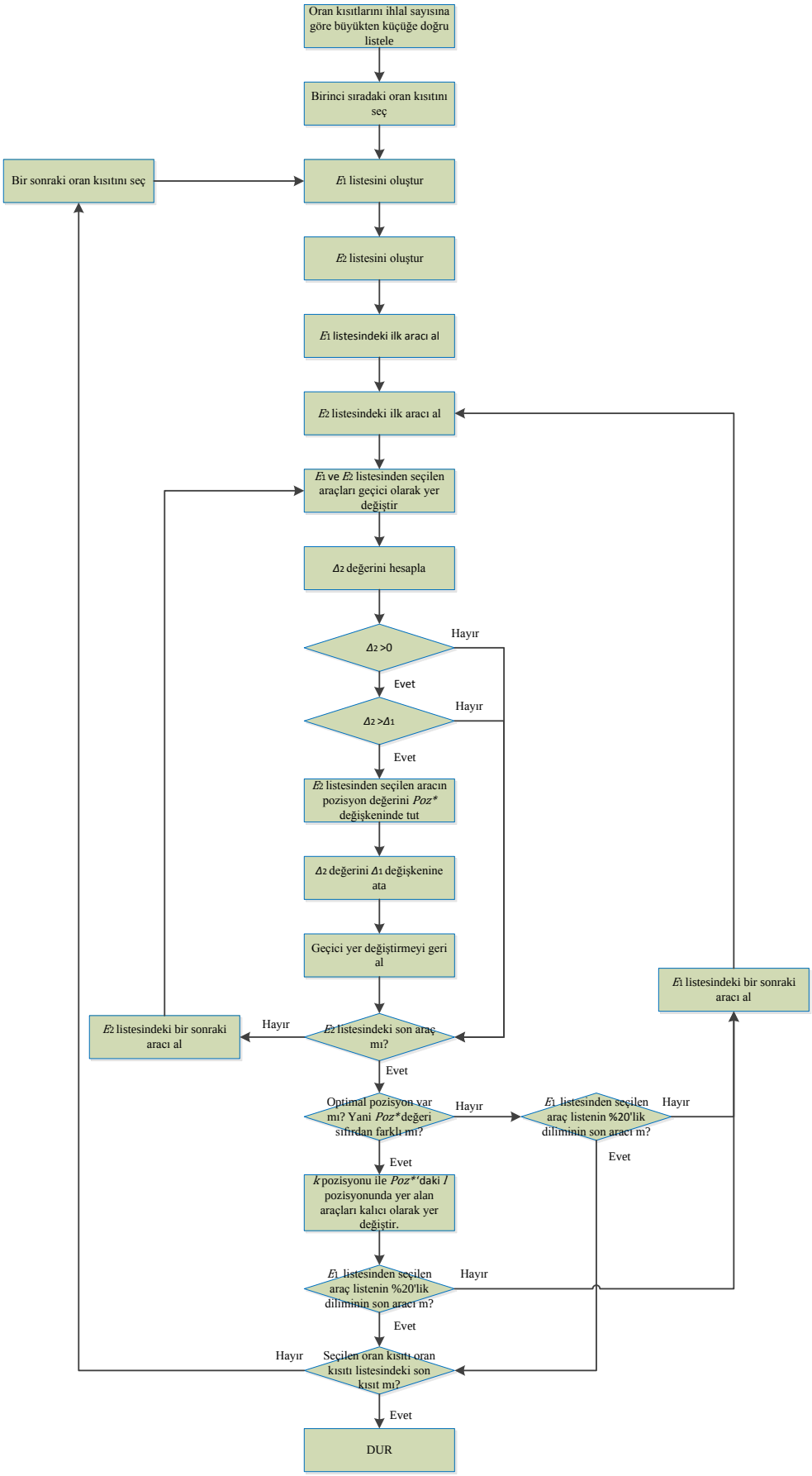
Aynı örnekten devam edersek ilk olarak $o_4$ kısıtı için her aracın bölgesel ihlal sayıları Çizelge 5.10'daki gibidir. Araçların bölgesel ihlal sayılarına göre büyükten küçüğe göre sıralandıkları bir liste oluşruturulur, aynı şekilde küçükten büyüğe göre sıralandıkları bir liste daha oluşturulur.

**Çizelge 5.10 :** Araçların bölgesel ihlal sayıları.

| Araçlar | Bölgesel İhlal Sayısı |
|---|---|
| **V7** | 20 |
| **V3** | 18 |
| **V4** | 17 |
| **V1** | 15 |
| **V6** | 14 |
| **V2** | 12 |
| **V5** | 9 |

***Geçici yer değiştirmelerin yapılması***

En yüksek ihlal sayısı etkisine sahip oran kısıtından başlamak üzere her bir kısıt için en çok bölgesel ihlal sayısına sahip ilk %20'den oluşan araçlar($E_1$ listesi) $E_2$ listesindeki araçlarla geçici olarak yer değiştirilerek değerlendirilir. Geçici yer değiştirme işlemlerinin döngüsü şu şekilde çalışmaktadır: $E_1$ listesindeki ilk araç ile başlayarak(burada amaç öncelikle en fazla problemli araçları ele alıp onlar üzerinden iyileştirme yapmaktır) bu listeden seçilen araç için $E_2$ listesindeki ilk araçtan başlayarak listenin sonuna kadar tüm araçlarla geçici olarak yer değiştirilir, her yer değiştirilmeden sonra mevcut sıra üzerinde iyileştirme oluyorsa ve bir önceki en iyi geçici iyileştirmeden daha iyi bir sonuç alınıyorsa $E_2$ listesinden seçilen aracın pozisyonu ve ihlal sayısı değeri tutulur.




**Şekil 5.7 :** YÖOK optimizasyonu ikinci aşamasının akış şeması.

Yukarıdaki örneğe göre $o_4$ oran kısıtı için en yüksek bölgesel ihlal sayısına sahip araç $v_7$ aracıdır. $v_7$ aracı için geçici yer değiştirmeler sonucuda oluşan iyileşmeler Çizelge 5.11'deki gibidir. $v_7$ aracı için yapılan geçici yer değişiklikleri sonucunda hiçbir araç daha iyi sonuç vememiştir. Bundan dolayı $E_1$ listesindeki bir sonraki araç alınır ve değerlendirilmelere devam edilir.

**Çizelge 5.11 :** Geçici yer değiştirmeler sonucundaki iyileşmeler**.**

| Araç Çifti | İhlal Sayısı Değişimi |
|---|---|
| **V7-V5** | +3 |
| **V7-V2** | +1 |
| **V7-V6** | +2 |
| **V7-V1** | +3 |
| **V7-V4** | 0 |
| **V7-V4** | +3 |

***Kalıcı Yer Değiştirmelerin Yapılması***

$E_1$ listesinden alınan araç ile $E_2$ listesindeki tüm araçlar geçici olarak yer değiştirildikten sonra $E_1$ listesinden alınan araç en fazla iyileştirme sağlayan $E_2$ listesindeki araç ile kalıcı olarak yer değiştirir ve $E_1$ listesindeki bir sonraki araca geçilir.

Ele alınan oran kısıtı için tüm $E_1$ listesindeki araçların %20'sinin tümü değerlendirildikten sonra bir sonraki oran ksıtları için aynı döngüler tekrarlanır. Tüm kısıtlar denendikten sonra algoritma durur.

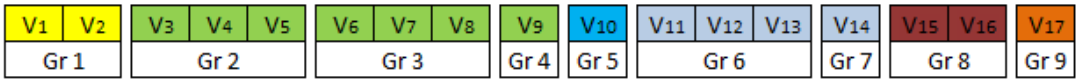
## 5.3 Renk Kısıtlarının Optimizasyonu

Yüksek öncelikli oran kısıtları optimize edildikten sonra bu optimizasyon kötüleştirilmeden renk kısıtları optimize edilecektir. Bu optimizasyon için kullanılan yaklaşımda var olan aynı renk araç gruplarını bozmadan, bu araç gruplarını diğer araç gruplarının yanına yerleştirerek iyileşme sağlamaktır. Renk optimizasyonu için önerilen yaklaşım şu aşamalardan oluşmaktadır.

***Araç gruplarının oluşturulması***

YÖOK optimizasyonu sonucunda oluşan sıra üzerinden renklerine ve renk limitine göre araç grupları oluşturulur. Şekil 5.8'de gruplandırılmış araçların bir örneği görülmektedir. Bu örnekte renk limiti=3 'dür. Bundan dolayı yeşil renkli $v_3 - v_9$

araçları üç grup olmuştur. Aynı renk olsalar bile renk limitini aştıkları için üç gruba ayrılmıştır. Renk grupları oluşturma kısmının akış şeması Şekil 5.9'daki gibidir.




**Şekil 5.8 :** Renklere ve renk limitine göre gruplama örneği.

***Renk düzenlemesinin yapılması***

Araç grupları oluşturulduktan sonra birinci araç grubundan başlamak üzere her bir araç grubu sırasıyla bir sonraki pozisyona eklenir ve bu şekliyle sıra tekrar değerlendirilir. Bu kısımın algoritmasını ayrıntılı olarak ele alalım.

Yeni pozisyona eklenecek araç grubu kaynak grup, kaynak grubun ekleneceği pozisyonda bulunan araç grubu ise hedef grup olarak düşünülebilir.

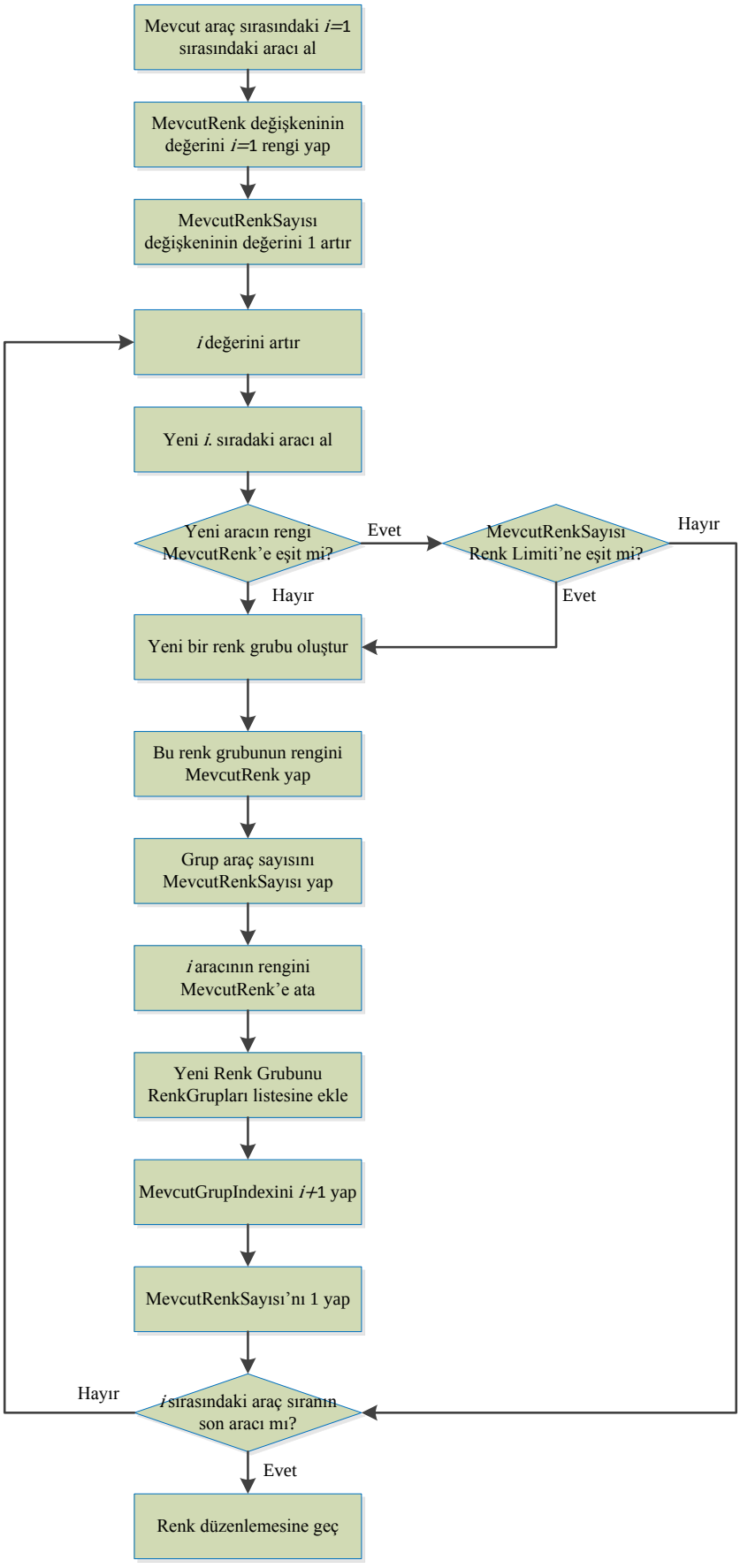
Kaynak grubu için birinci araç grubundan başlayan bir döngü ve hedef grup için de seçilen kaynak grubundan sonraki araç grubundan başlayan bir döngü oluşturulur. Seçilen kaynak araç grubu seçilen hedef araç grubunun sonuna komşu olacak şekilde eklenerek yeni sıra öncelikle YÖOK ihlal sayısı açısından değerlendirilir. Burada üç durum karşımıza çıkmaktadır:

1.Eğer sonucu kötüleştiriyorsa sıra eski haline getirilir ve kaynak grubu bir sonraki hedef grubunun önüne eklenerek değerlendirme işlemi devam eder.

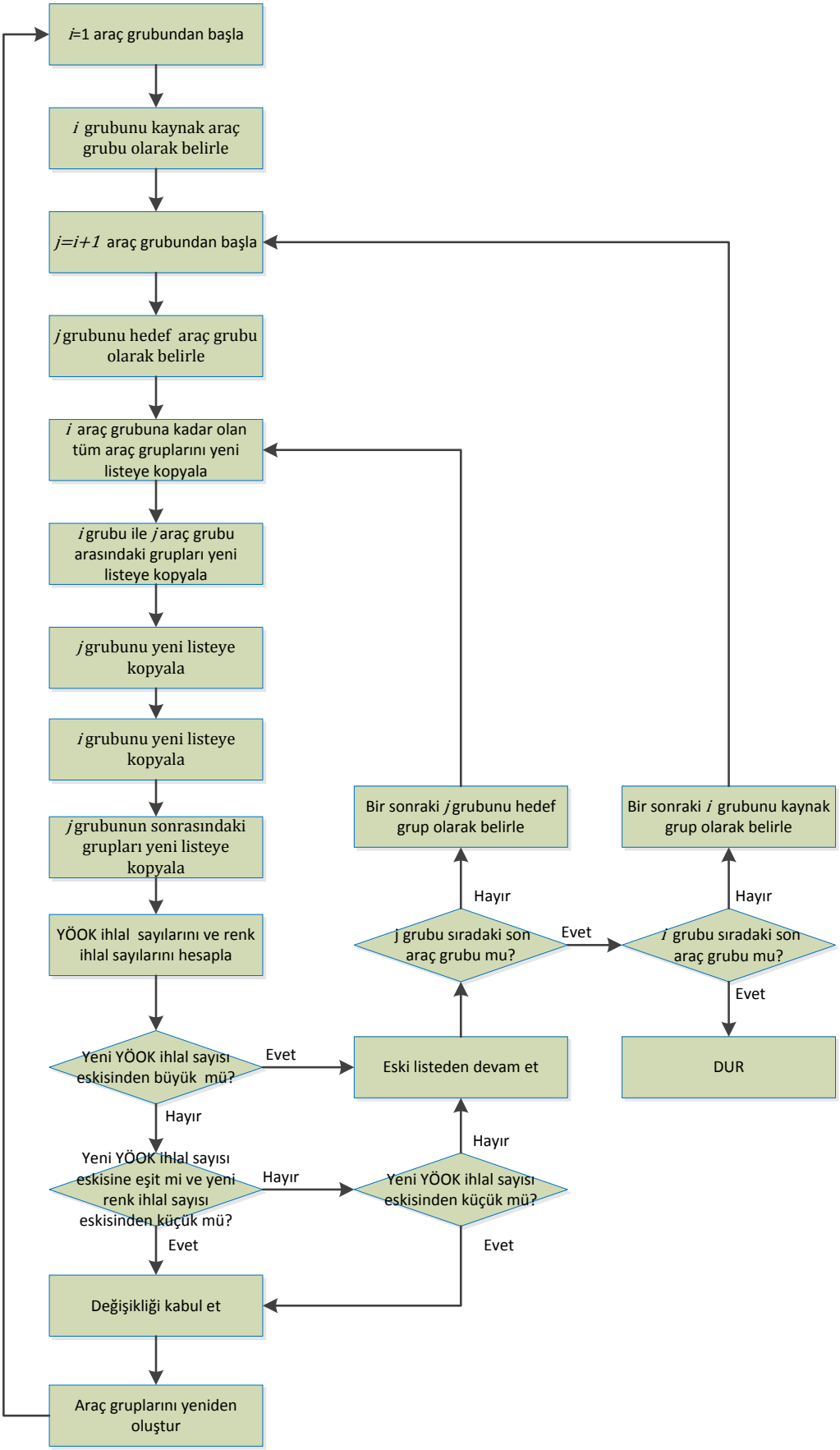
2.Eğer yeni sıranın YÖOK ihlal sayısı eski sıranın YÖOK ihlal sayısından küçükse yeni sıra kabul edilir ve araç grupları tekrar oluşturularak döngüler tekrar başlatılır.

3.Eğer yeni sıranın YÖOK ihlal sayısı eski sıranın YÖOK ihlal sayısına eşitse ve renk ihlal sayısı daha iyiyse yeni sıra yine kabul edilir ve araç grupları tekrar oluşturularak döngüler tekrar başlatılır.

Kabul edilen her bir yeni sıradan sonra araç grupları yeniden oluşturulur ve kaynak araç grubu ve hedef araç grubu döngüsü yeniden başlatılır. Sıranın sonundaki araç grubu hedef grubu olarak seçilene kadar iyileşme sağlanamazsa algoritma durur. Renk optimizasyonu yaklaşımının ayrıntılı akış şeması Şekil 5.10'daki gibidir. Renk optimizasyonunda amaç renk ihlal sayısını azaltmaya yönelik olsa da YÖOK ihlal sayısını iyileştirdiği sürece renk ihlal sayısını kötüleştiren çözümlerde kabul edilmektedir. Çünkü amaç fonksiyonunda YÖOK ihlal sayısı $10^6$ ile çarpılırken renk ihlal sayısı $10^3$ ile çarpılmaktadır.




**Şekil 5.9 :** Renklerine göre araç gruplarının oluşturulması.




**Şekil 5.10 :** Renk düzenleme aşamasının akış şeması.

# 6. UYGULAMA VE ANALİZ

Bu bölümde geliştirilen modelin sonuçlarının değerlendirilmesi yapılacaktır. Öncelikle kullanılan tavlama benzetimi yaklaşımı için parametre değerlerinin belirlenmesi için yapılan deney tasarımı anlatılacaktır, daha sonra geliştirilen modelin sonuçları çeşitli açılardan değerlendirilecektir.

Modelin değerlendirilmesi için kullanılan veri setleri ROADEF'2005'den alınmıştır ve veri setleri hakkında detaylı bilgi verilecektir. Verilerin orjinal haline Ek B'den ulaşabilirsiniz.

Geliştirilen model Eclipse geliştirme ortamında Guava 16.0.1 kütüphanesi kullanılarak Java SE 1.7 programlama dili ile kodlanmış ve geliştirilen model Intel® Core™2 Duo CPU T7500 @ 2,20 GHz işlemci ve 4,00 GB RAM'e sahip Dell marka bilgisayarda test edilmiştir. Programa Ek B CD'sinden ulaşabilirsiniz. Etkinlik ölçüsü olarak modelin sonuca ulaşma süresi ve ROADEF'2005 finalistlerinin sonuçları olarak belirlenmiştir. Model içersindeki her bir alt model(başlangıç algoritması, YÖOK otimizasyonu, renk optimizasyonu) ayrı ayrı da farklı açılardan(araç sayısı, süre, ihlal sayısı iyileştirme, vs.) değerlendirilmiştir.

## 6.1 Kullanılan Veri Setleri

### 6.1.1 Renault tarafından oluşturulan veri setleri

Renault tarafından 3 adet senaryo ve veri seti verilmiştir. Bu veri setleri adayların programlarını daha iyi hale getirmeleri olanağı sunmaktadır:

- **Veri Seti A:** Bu veri seti jürinin finalistleri belirlemek için kullandığı veri setidir.
- **Veri Seti B:** Veri Seti X'i kullanmadan önce finalistlerin programlarına ince ayar çekmeleri için verilen veri setidir.
- **Veri Seti X:** Konferans sırasında finalistleri sıralamak için kullanılan son veri setidir.

Programların ince ayarları ile veri çeşitliliğinde algoritmaların sağlamlığını geliştirmeleri beklenir. Üretim planlama(ÜP) uygulamalarında bu sağlamlık kritiktir. Çünkü Renault fabrikalarında üretim verilerinde önemli değişiklikler olduğunda (oran kısıtı, araç karakteristikleri vs. gibi), ÜP ekipleri bunu yönetemeyebilir.

***Veri setlerinin içeriği***

Her bir senaryo bir fabrikanın üretim verisini temsil etmektedir. Aynı fabrika farklı senaryoların üretimini yapıyor olabilir.

Bir senaryo aşağıdaki bilgileri içeriri:

- Yüksek öncelikli oran kısıtlar
- Düşük öncelikli oran kısıtları
- Renk limiti
- D gününün üretilecek araçları ve D-1 gününde çizelgelenmiş araçlar (D-1 gününden $q_{max}$-1 araç bulunmaktadır, burada $q_{max}$ oran kısıtları içerisindeki maximum payda değeridir)
- Bir araç şu şekilde tanımlanır: ID no, üretim gününün tarihi (D veya D-1), renk ve her bir oran kısıtı için (0/1), (0/1) ilgili oran kısıtının o araçta olup olmadığını gösterir.
- Amaç fonksiyonlarının önceliği

Bazı senaryolar düşük öncelikli oran kısıtlarını içermez, çünkü bazı fabrikalar tüm oran kısıtlarını yüksek öncelikli olarak vermektedir.

***Dosya formatı***

Bir senaryo aşağıdaki dosyaları içermektedir.

- Renk dizilerinin max limit sayısı(renk limiti): « paint_batch_limit.txt »
- Amaç fonksiyonu dosyası: « optimization_objectives.txt »
- Oran kısıtları dosyası: « ratios.txt »
- Araç Dosyası: « vehicles.txt «

### 6.1.2 Geliştirilen algoritmada kullanılacak veri setleri

Bu çalışmada B veri setlerine ulaşılamadığı için A ve X veri setleri kullanılacaktır, bu çalışmada geliştirilen model önce oran kısıtlarını daha sonra renk kısıtlarını iyileştirmeye yönelik olduğundan üretim verileri içerisinden de oran kısıtlarının birincil öncelikli, renk kısıtlarının ikincil öncelikli olduğu veri setleri seçilmiştir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi toplam 16 adet üretim verisi alınmıştır. Bunlardan 9 tanesi X veri setinden, 7 tanes ise A veri setiden alınmıştır. Bu veri setleri içerdikleri araç sayılarına göre '0-349 araç sayısına sahip üretim verisi-Araç Grubu 1', '350-699' araç sayısına sahip üretim verisi-Araç Grubu 2', '700-1049-Araç Grubu 3 araç sayısına sahip üretim verisi' ve '1050-599 araç sayısına sahip üretim verisi-Araç Grubu 4' olarak dört gruba ayrılmıştır. Üretim verilerinin genel özellikleri Çizelge 6.1'deki gibidir. ROADEF'2005 için Renault tarafından verilen veri setleri ayrıntılı bir şekilde Ek B'de yer almaktadır.

**Çizelge 6.1:** Kullanılan ROADEF verilerinin özellikleri

| Veri Grubu | Veri | Araç Sayısı | YÖOK Sayısı | SK | SZ | Renk Limiti | A Veri Seti | X Veri Seti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 655_CH2_EP_RAF_ENP_S52_J1_J2_S01_J1 (1) | 219 | 4 | x | | 10 | | x |
| | 034_VU_EP_RAF_ENP_S51_J1_J2_J3 (2) | 231 | 6 | x | | 30 | | x |
| | 064_38_2_EP_RAF_ENP_ch2 (3) | 335 | 4 | x | | 15 | x | |
| 2 | 048_CH2_EP_RAF_ENP_S49_J5 (4) | 459 | 8 | | x | 12 | | x |
| | 022_3_4_EP_RAF_ENP (5) | 485 | 3 | x | | 450 | x | |
| | 048_CH1_EP_RAF_ENP_S50_J4 (6) | 519 | 6 | x | | 12 | | x |
| | 048_39_1_EP_RAF_ENP (7) | 600 | 5 | | x | 10 | x | |
| 3 | 064_CH1_EP_RAF_ENP_S49_J1 (8) | 875 | 9 | x | | 15 | | x |
| | 064_38_2_EP_RAF_ENP_ch1 (9) | 875 | 7 | x | | 15 | x | |
| | 034_VP_EP_RAF_ENP_S51_J1_J2_J3 (10) | 921 | 3 | x | | 400 | | x |
| | 039_38_4_EP_RAF_ch1 (11) | 954 | 5 | | x | 20 | x | |
| | 039_CH3_EP_RAF_ENP_S49_J1 (12) | 1037 | 2 | x | | 20 | | x |
| 4 | 024_38_3_EP_RAF_ENP (13) | 1260 | 5 | | x | 10 | x | |
| | 023_EP_RAF_ENP_S49_J2 (14) | 1260 | 5 | x | | 40 | | x |
| | 024_38_5_EP_RAF_ENP (15) | 1315 | 5 | | x | 10 | x | |
| | 024_EP_RAF_ENP_S49_J2 (16) | 1319 | 7 | x | | 10 | | x |

## 6.2 Tavlama Benzetimi Deney Tasarımı

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi oran kısıtlarının optimizasyonunun birinci aşamasına tavlama benzetimi yaklaşımı entegre edilmişti. Bu yaklaşımda kullanılacak optimum parametrelerin belirlenmesi için bir deneye tasarımı yapılmıştır.

Tavlama benzetimi deney tasarımı bu yaklaşımda kullanılacak soğuma oranı ve başlangıç sıcaklığı parametrelerine karar vermek için yapılmıştır. Soğuma oranı için beş değer (0,99; 0,97; 0,94; 0,92 ve 0,9) değerlendirmeye alınmıştır. Başlangıç sıcaklığı için ise dört değer (1000, 10000, 100000, 10000000) değerlendirilmeye alınmıştır. Dört adet veri seti her bir başlangıç sıcaklığı ve soğuma oranı seçenekleri için iyileştirme oranı ve süre açısından değerlendirilmiştir. Veri setlerinin seçimi araç sayısının büyüklüğüne göre yapılmıştır. Araç sayılarına göre oluşturulan veri gruplarından birer tane üretim verisi seçilerek araç sayılarının homojen olması sağlanmıştır. Çünkü araç sayısının büyüklüğü süreyi oldukça fazla etkilediğinden her bir araç sayısı büyüklüğüne uygun başlangıç sıcaklığı seçilmesi amaçlanmıştır.

Tavlama benzetimi yaklaşımının entegre edildiği kısım yüksek öncelikli oran kısıtlarının optimize edildiği aşama olduğundan dolayı bu deney tasarımındaki en iyi sonuç iyileşme oranını (başlangıçtaki YÖOK ihlal sayısı-birinci aşama sonundaki YÖOK ihlal sayısı) en yüksek yapan soğuma oranı-başlangıç sıcaklığı parametre çifti olacaktır.

Dört üretim verisi için çıkan iyileşme ve süre sonuçları Çizelge 6.2'deki gibidir.

Veri Grubu 1'den alınan örnek üretim verisi için en iyi sonuçlar soğuma oranı 0,99 iken,başlangıç sıaklığı ise 10000, 100000 ve 1000000 için bulunmuştur. Aslında bu sonuç en kısa sürede 10000'de bulunduğu için 0,99-10000 değerleri en iyi sonucu vermekedir diyebiliriz.

Veri Grubu 2'den alınan örnek üretim verisi için ise en iyi sonuç 0,97-10000 değerleri için bulunmuştur. Bir sonraki en iyi sonuç ise 0,99 ve 10000,100000 ve 1000000 değerleri için bulunmuştur . Burada yine başlangıç sıcakığı=10000 olduğunda süre daha kısa olduğundan bir sonraki en iyi sonuç 0,99-10000 değerleri diyebiliriz.

Veri Grubu 3 için ise en iyi sonuç 0,99 - 1000000 için bulunmuştur fakat yine bir sonraki en iyi bulunan çözüm 0,99-1000 için bulunmuştur.

Veri Grubu 4'ün örnek verisine bakıldığında tüm değerler için aynı iyileşme oranı bulunmasına rağmen gerçekleşme süreleri oldukça değişmektedir. Oysa ki önceki verilerde sürelere bakıldığında başlangıç sıcaklığı ve soğuma oranı ile doğru orantılı olarak artan bir değişim görülmektedir.

**Çizelge 6.2 :** Tavlama benzetimi deney tasarımı sonuçları.

| 048_CH2_EP_RAF_ENP_S49_J5 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Başlangıç Sıcaklığı | | | | | | | |
| | 1000 | | 10000 | | 100000 | | 1000000 | |
| Soğuma Oranı | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) |
| **0,99** | 0,302 | 03:00 | 0,317 | 05:02 | 0,317 | 06:56 | 0,317 | 07:27 |
| **0,97** | 0,302 | 01:31 | 0,302 | 02:31 | 0,302 | 02:55 | 0,302 | 03:03 |
| **0,94** | 0,238 | 01:10 | 0,270 | 01:36 | 0,270 | 01:53 | 0,302 | 02:09 |
| **0,92** | 0,238 | 01:04 | 0,270 | 01:19 | 0,270 | 01:33 | 0,270 | 01:48 |
| **0,9** | 0,270 | 00:57 | 0,270 | 01:10 | 0,270 | 01:21 | 0,270 | 01:32 |
| **034_VU_EP_RAF_ENP_S51_J1_J2_J3** | | | | | | | | |
| | Başlangıç Sıcaklığı | | | | | | | |
| | 1000 | | 10000 | | 100000 | | 1000000 | |
| Soğuma Oranı | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) |
| **0,99** | 0,556 | 01:01 | 0,556 | 01:16 | 0,556 | 01:18 | 0,556 | 01:19 |
| **0,97** | 0,381 | 00:34 | 0,571 | 00:39 | 0,556 | 00:37 | 0,556 | 00:55 |
| **0,94** | 0,381 | 00:27 | 0,381 | 00:31 | 0,365 | 00:34 | 0,524 | 00:30 |
| **0,92** | 0,381 | 00:24 | 0,381 | 00:28 | 0,381 | 00:31 | 0,381 | 00:38 |
| **0,9** | 0,381 | 00:23 | 0,381 | 00:27 | 0,381 | 00:28 | 0,381 | 00:30 |
| **039_38_4_EP_RAF_ch1** | | | | | | | | |
| | Başlangıç Sıcaklığı | | | | | | | |
| | 1000 | | 10000 | | 100000 | | 1000000 | |
| Soğuma Oranı | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) |
| **0,99** | 0,123 | 12:43 | 0,123 | 15:46 | 0,123 | 20:03 | 0,148 | 27:20 |
| **0,97** | 0,123 | 06:25 | 0,123 | 08:45 | 0,123 | 14:06 | 0,123 | 13:19 |
| **0,94** | 0,123 | 04:41 | 0,123 | 05:38 | 0,123 | 07:45 | 0,123 | 08:52 |
| **0,92** | 0,107 | 03:58 | 0,123 | 04:52 | 0,123 | 05:47 | 0,123 | 06:17 |
| **0,9** | 0,107 | 03:15 | 0,107 | 04:27 | 0,123 | 05:02 | 0,123 | 04:40 |
| **024_38_5_EP_RAF_ENP** | | | | | | | | |
| | Başlangıç Sıcaklığı | | | | | | | |
| | 1000 | | 10000 | | 100000 | | 1000000 | |
| Soğuma Oranı | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) | İyileşme | Süre (dk:sn) |
| **0,99** | 0,194 | 52:55 | 0,194 | 51:06 | 0,194 | 47:06:00 | 0,194 | 44:13 |
| **0,97** | 0,194 | 50:45 | 0,194 | 35:10 | 0,194 | 38:08 | 0,194 | 36:23 |
| **0,94** | 0,194 | 54:34 | 0,194 | 49:14 | 0,194 | 40:67 | 0,194 | 38:53 |
| **0,92** | 0,194 | 40:25 | 0,194 | 33:22 | 0,194 | 30:02 | 0,194 | 32:34 |
| **0,9** | 0,194 | 39:55 | 0,194 | 37:12 | 0,194 | 32:11 | 0,194 | 30:12 |

Soğuma oranları değerlerine bakıldığında soğuma oranı yüksek seçildiğinde sürenin uzadığı görülmektedir fakat en fazla iyileşme oranları en yüksek soğuma oranlarında görülmüştür. Bundan dolayı soğuma oranı olarak 0,99 belirlenmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında hem başlangıç sıaklığı hem de soğuma oranı ne kadar yüksek

seçilirse daha iyi sonuçlar alınmaktadır fakat genel olarak bu seçim işlem süresini oldukça uzatmaktadır. Ayrıca başlangıç sıcaklığının en yüksek değerde olması soğuma oranı da en yüksek değerde olduğunda en iyi sonuçları vermiş olmasına rağmen diğer soğuma oranları için sonuçları çok etkilememiştir. Bu durumda da başlangıç sıcaklığını yüksek seçip süreyi uzatmamak için en fazla iyileşme oranlarının bulunduğu 10000 değeri başlangıç sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

## 6.3 Geliştirilen Algoritmanın Değerlendirilmesi

### 6.3.1 Başlangıç algoritmasının değerlendirilmesi

Çizelge 6.3'de görülen 'ROADEF'2005 Sonucu' finale kalan 18 yarışmacının YÖOK açısından çıkardığı sonuçların aralığını göstermeketedir.

Çizelge 6.3'de görüldüğü gibi araç sayısı arttıkça başlangıç algoritmasının tamamlanma süresi genel olarak doğru orantılı olarak artmaktadır diyebiliriz Özellikle Veri Grubu 1 için yani 0-350 arasında araç sayısına sahip üretim verilerinde başlangıç algoritması saniyeler alırken Veri Grubu 4 yani 1050 ve üzeri araç sayısına sahip verilerde bu süre 10dk'yı bile bulabilmektedir. Bazen verilerin değişkenlik gösterdiği de olmaktadır. Bunun sebebi kısıt sayısı, F1 ve F2 fonksiyonlarının kullanım sayısı olabilir. Ne kadar fazla kullanılırsa süre artışına neden olabilir.

Başlangıç algoritması için minimum süre 1 numaralı üretim verisi için 4 sn olmakla birlikte, maksimum süre 9 numaralı veri seti için yaklaşık 11 dk sürmüştür.

Başlangıç algoritmasının bütün veriler için YÖOK ihlal sayısını artırdığı ya da azalttığını söyleyemeyiz. Gerçekten de Çizelge 6.3'e bakıldığında başlangıç algoritmasının verilen üretim verisinin YÖOK sayısını bazen azalttığı bazen artırdığı görülmektedir fakat 'BA ile Toplam Sonuç' sütunundaki sonuçlar algoritma başlangıç algoritması ile çalıştırıldığında son çıkan çözümün YÖOK ihlal sayısı açısından çok daha iyi sonuçlar alındığını açıkça göstermektedir.

Başlangıç algoritması ile bazı verilerde en iyi sonuçlara çok yaklaşıldığı görülmektedir. Örneğin 3,5 ve 9 numaralı verilerde sadece başlangıç algoritması çalıştırılarak en iyi sonuçlara ulaşılmıştır

**Çizelge 6.3 :** Başlangıç algoritmasının sonuçları.

| Veri | Verilen YÖOK İhlal Sayısı | BA Sonrası İhlal Sayısı | BA Süresi (dk:sn) | BA ile Toplam Sonuç | BAsız Toplam Sonuç | ROADEF'2005 Sonucu |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 180 | 206 | **00:04** | 159 | 167 | 153-306,Çözümsüz |
| 2 | 63 | 65 | 00:07 | **17** | 21 | 8-12,Çözümsüz |
| 3 | 28 | 0 | 00:21 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 63 | 72 | 00:39 | 34 | 43 | 31-34 |
| 5 | 2 | 0 | 00:43 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 8 | 1 | 02:28 | 1 | 8 | 0-2 |
| 7 | 51 | 83 | 02:50 | 18 | 34 | 0-27 |
| 8 | 77 | 101 | 07:35 | 63 | 70 | 61-67 |
| 9 | 2 | 0 | **10:51** | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 22 | 1 | 07:42 | **1** | 7 | 0 |
| 11 | 122 | 142 | 04:03 | 6 | 72 | 13-84 |
| 12 | 8 | 7 | 05:04 | **7** | 7 | 0 |
| 13 | 73 | 92 | 08:43 | 57 | 57 | 4-63 |
| 14 | 6 | 1 | 08:45 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 98 | 93 | 08:59 | 57 | 78 | 4-75 |
| 16 | 73 | 42 | 09:02 | 14 | 23 | 0-49,Çözümsüz |

### 6.3.2 YÖOK optimizasyonu yaklaşımının birinci aşamasının değerlendirilmesi

Birinci aşamanın sonuçlarını süre açısından değerlendirilirse Çizelge 6.4'de görüldüğü gibi süreler genel olarak değişkenlik göstermektedir. Genellikle daha az araç sayısına sahip araçlarda daha kısa süreler görülmektedir fakat örneğin 8,9 ve 11 numaralı verilerde sürelerin, verinin içerdiği araç sayısına göre olması gerekenden daha fazla çıktığı görülmüştür. Aynı şekilde 12 numaralı veride de oldukça kısa sürmüştür. Bu farklılıkların sebebi birinci aşamanın her bir $i$ döngüsünde kalıcı yer değiştirmenin olup olmadığına göre yeniden başlaması ve fazlarını değiştirmesidir. Eğer üç faz boyunca uygun bir kalıcı yer değiştirme bulunamazsa algoritma sona erecektir. Bu da döngünün erken tamamlanmasına neden olacaktır. Bu 12 numaralı veri için açıkça görülmektedir. 12 numaralı veri için BA ile sadece bir kalıcı yer değiştirme yapılmışken, BA'sız için ise hiç yapılamamıştır, bundan dolayı araç sayısına göre olması gereken süreler düşünüldüğünde oldukça kısa sürmüştür. 11,13 ve 16 numaralı verilere bakıldığında ise süreler oldukça uzun sürmüştür. Bu verilerdeki iyileşmelere bakıldığında oldukça yüksektir. Buradan hem araç sayılarının fazla olması hem de iyileşmelerin farklı döngülerde gerçekleşmesi neden olabilir diyebiliriz. Çizelge 6.4'dende görüldüğü üzere birinci aşama için minimum

süre 1 numaralı veri için 55 sn olmakla birlikte maksimum süre 11 numaralı veri için 2 saat 41 dk'dır.

Bu yaklaşım için algoritmanın süresini etkileyen sebepler şunlar olabilir:

- ***Verinin çizelgelenecek araç sayısı:*** Araç sayısı arttıkça döngülerin tamamlanma süresi artacaktır. Örneğin $n$ adet çizelgelenecek araca sahip bir veri için bu yaklaşımda sadece bir döngüde yer değiştirecek araç çiftinin seçilmesi için değerlendirme sayısı $\frac{n*(n-1)}{2}$ kadardır.

**Çizelge 6.4 :** YÖOK optimizasyonu birinci aşamasının sonuçları**.**

| Veri | Verilen YÖOK İhlal Sayısı | BA Sonrası İhlal Sayısı | BA İle 1. Aşama | Süre (sa;dk;sn) | BA'sız 1. Aşama | Süre (sa;dk;sn) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 180 | 206 | 177 | **00:00:55** | 177 | 00:01:42 |
| 2 | 63 | 65 | 24 | 00:01:57 | 28 | 00:01:45 |
| 3 | 28 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:06:30 |
| 4 | 63 | 72 | 35 | 00:06:36 | 43 | 00:04:30 |
| 5 | 2 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:02:47 |
| 6 | 8 | 1 | 1 | 00:02:42 | 8 | 00:06:01 |
| 7 | 51 | 83 | 31 | 00:15:09 | 48 | 00:11:53 |
| 8 | 77 | 101 | 66 | 02:06:35 | 73 | 01:37:48 |
| 9 | 2 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 01:19:23 |
| 10 | 22 | 1 | 1 | 00:54:12 | 7 | 00:43:30 |
| 11 | 122 | 142 | 72 | **02:41:34** | 104 | 02:00:51 |
| 12 | 8 | 7 | 7 | 00:09:43 | 7 | 00:07:39 |
| 13 | 73 | 92 | 57 | 01:08:06 | 57 | 00:47:27 |
| 14 | 6 | 1 | 0 | 01:08:44 | 0 | 01:03:39 |
| 15 | 98 | 93 | 57 | 00:49:05 | 79 | 01:59:12 |
| 16 | 73 | 42 | 16 | 02:31:41 | 55 | 03:14:16 |

- ***Döngüler sırasında oluşan kalıcı yer değiştirme sayısı:*** Döngü içerisinde kalıcı yer değiştirme sayısı arttıkça araç sırası farklılaştığında bu durum daha sonraki bulunacak kalıcı yer değiştirmelerin sayısını artırabilir ya da azaltabilir, bu durum da süreyi etkileyecektir. Ayrıca kalıcı yer değiştirme olduğu sürece faz değişimi olmayacağından algoritmanın tamamlanma süresi de uzayacaktır yani, eğer ihlal sayısında azalma sayısı oldukça fazla ise ve bu azalmalar hem az miktarda hem de her bir $i$ döngüsü boyunca az miktarda kalıcı yer değiştirme olmuş ise tamamlanma süresi uzayacaktır.

- ***YÖOK sayısı:*** YÖOK sayısı değiştikçe değerlendirilecek kısıt sayısı artacağından ya da azalacağından bu durum da tamamlanma süresini etkileyecektir.

### 6.3.3 YÖOK optimizasyonu yaklaşımının ikinci aşamasının değerlendirilmesi

Çizelge 6.5'de görüldüğü gibi birinci aşama ile elde edilen ihlal sayıları hiçbir veri için ikinci aşamada azaltılamamıştır. Sarı ile işaretlenmiş olan veriler birinci aşamadan sonra ihlal sayısını sıfır verdikleri için ikinci aşamaya girmemişlerdir. Bundan dolayı süreleri '00:00:00' olarak gösterilmiştir. Bu çizelgede ikinci aşamanın çalışmadığı düşünülsede (çünkü bu aşamanın tamamlanma süresi de oldukça kısa sürmüştür) Çizlelge 6.6'ya bakıldığında ikinci aşamanın aslında birinci aşamanın tamamlayıcısı olduğu görülmektedir. Çizelge 6.6 birinci aşama çaıştırılmadan ikinci aşama çalıştırılarak oluşan ihlal sayısı iyileştirmelerini göstermektedir. Bu yüzden ikinci aşamayı bu sonuçlar üzerinden değerlendirmek daha doğru olacaktır.

**Çizelge 6.5 :** YÖOK optimizasyonu ikinci aşamasının sonuçları.

| Veri | BA ile 1. Aşama Sonucu | BAsız 1. Aşama Sonucu | BA ile 1. Aşamadan Sonra 2. Aşamanın Sonucu | 2.Aşama Süre (sa:dk:sn) | BA sız 1. Aşamadan Sonra 2. Aşamanın Sonucu | 2. Aşama Süre (sa:dk:sn) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 177 | 177 | 177 | **00:00:05** | 177 | 00:00:05 |
| 2 | 24 | 28 | 24 | 00:00:20 | 28 | 00:00:19 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:00:00 |
| 4 | 35 | 43 | 35 | 00:04:00 | 43 | 00:02:10 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:00:00 |
| 6 | 1 | 8 | 1 | 00:02:45 | 8 | 00:02:17 |
| 7 | 31 | 48 | 31 | 00:18:50 | 48 | 00:08:44 |
| 8 | 66 | 73 | 66 | 00:09:58 | 73 | 00:06:15 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:00:00 |
| 10 | 1 | 7 | 1 | **00:33:28** | 7 | 00:26:46 |
| 11 | 72 | 104 | 72 | 00:03:28 | 104 | 00:16:11 |
| 12 | 7 | 7 | 7 | 00:02:03 | 7 | 00:01:36 |
| 13 | 57 | 57 | 57 | 00:16:11 | 57 | 00:06:55 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:00:00 |
| 15 | 57 | 79 | 57 | 00:12:39 | 79 | 00:12:30 |
| 16 | 16 | 55 | 16 | 00:03:55 | 55 | 00:03:31 |

Çizelge 6.6'daki ikinci aşamanın iyileştirmeleri birinci aşamaya nazaran daha kötü sonuçlar vermiş olmasına rağmen oldukça yakın sonuçlardır ve bu değerlere birinci

aşamaya göre çok daha kısa sürelerde ulaşılmıştır. Örneğin 8 numaralı veri için BA sonrasındaki ihlal sayısı 101'dir. Birinci aşama ile bu ihlal sayısı yaklaşık iki saatte 66'ya indirilebilmişken ikinci aşama ile bu ihlal sayısı 20 dk'da 68'e indirilmiştir. Bu yaklaşım ileriki çalışmalarda çok daha kısa sürede iyi sonuçlar elde edebilmek için daha kapsamlı bir şekilde ele alınabilir. İkinci aşama için çıkan minimum süre 1 numaralı veri için 5 sn, maksimum süre ise 7 numaralı veri için 18 dk 50 sn olduğu görülmektedir.

**Çizelge 6.6 :** YÖOK optimizasyonunun birinci aşama ve ikinci aşamasının performans karşılaştırması.

| Veri | BA İle 1. Aşama | Süre (sa:dk:sn) | BAsız 1. Aşama | Süre (sa:dk:sn) | BA İle 2. Aşama | Süre (sa:dk:sn) | BAsız 2. Aşama | Süre (sa:dk:sn) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 177 | 00:50 | 177 | 01:42 | 202 | 00:00:01 | 177 | 00:00:14 |
| 2 | 24 | 01:57 | 28 | 01:45 | 35 | 00:00:09 | 32 | 00:00:30 |
| 3 | 0 | 04:53 | 0 | 06:30 | 0 | 00:00:14 | 1 | 00:00:45 |
| 4 | 35 | 06:36 | 43 | 04:30 | 39 | 00:06:22 | 45 | 00:04:15 |
| 5 | 0 | 02:10 | 0 | 02:47 | 0 | 00:00:00 | 2 | 00:00:00 |
| 6 | 1 | 02:42 | 80 | 06:01 | 1 | 00:03:13 | 8 | 00:02:49 |
| 7 | 31 | 15:09 | 48 | 11:53 | 29 | 00:16:39 | 48 | 00:10:16 |
| 8 | 66 | 02:06:35 | 73 | 01:37:48 | 68 | 00:20:11 | 73 | 00:06:54 |
| 9 | 0 | 00:00:00 | 0 | 01:19:23 | 0 | 00:00:00 | 0 | 00:17:07 |
| 10 | 1 | 54:12 | 7 | 43:30 | 1 | 00:13:13 | 7 | 00:15:27 |
| 11 | 72 | 02:41:34 | 104 | 02:00:51 | 134 | 00:00:44 | 112 | 00:08:34 |
| 12 | 7 | 09:43 | 7 | 07:39 | 7 | 00:03:31 | 7 | 00:03:20 |
| 13 | 57 | 01:08:06 | 57 | 47:27 | 67 | 00:48:18 | 64 | 00:17:01 |
| 14 | 0 | 01:08:44 | 0 | 01:03:39 | 1 | 00:00:09 | 5 | 00:00:09 |
| 15 | 57 | 49:05 | 79 | 01:59:12 | 66 | 00:15:39 | 84 | 00:06:40 |
| 16 | 16 | 02:31:41 | 55 | 03:14:16 | 25 | 00:01:59 | 68 | 00:02:08 |

### 6.3.4 Renk optimizasyonu yaklaşımının değerlendirilmesi

Bu yaklaşımda amaç YÖOK kısıtları iyileştirildikten sonra bu ihlal sayısı kötüleştirilmeden renk ihlal sayılarını da iyileştirmektir. Çizelge 6.7'de 16 veri için çalıştırılmış olan renk opimizasyonu algoritmasının sonuçları görülmektedir. Çizelgede YÖOK optimizasyonu algoritmasının birinci ve ikinci aşaması sonucunda çıkan sonuçlar üzerinden renk optimizasyonu algoritması çalıştırılmıştır. Başlangıç algoritmasının çalıştırıldığı ve çalıştırılmadığı sonuçlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.7'deki sonuçlara bakıldığında ROADEF'2005 finalistlerinin sonuçları kadar iyi sonuçlar alınamamıştır. Bu yaklaşım ne kadar renk ihlal sayılarını azaltmak

için geliştirimiş olsa da YÖOK ihlal sayılarını iyileştirdiği sürece renk ihlal sayısını kötüleştirse bile değişimler kabul edilmektedir. 8 ve 11 numaralı örnek verilerde renk ihlal sayılarının kötüleştiği görülmüştür.

**Çizelge 6.7 :** Renk optimizasyonunun sonuçları.

| Veri | ROADEF-2005 Sonucu | BA ile Renk İyileştirme | BA ileYÖOK İyileştirme | BA ile Süre (dk:sn) | BA'sız Renk İyileştirme | BA'sız YÖOK İyileştirme | BA'sız Süre (dk:sn) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 32-57 | 115-113 | 177-159 | **00:05** | 87-85 | 177-167 | 00:03 |
| 2 | 87-191 | 153-148 | 24-17 | 00:14 | 117-112 | 28-21 | 00:09 |
| 3 | 34-54 | 81-73 | 0-0 | 00:08 | 83-74 | 0-0 | 00:08 |
| 4 | 76-151 | 352-352 | 35-35 | 01:34 | 160-160 | 43-43 | 00:14 |
| 5 | 31-112 | 71-69 | 0-0 | 00:02 | 72-69 | 0-0 | 00:02 |
| 6 | 196-209 | 284-284 | 1-1 | 01:25 | 248-248 | 8-8 | 00:55 |
| 7 | 174-105 | 512-507 | 31-18 | 05:08 | 232-228 | 48-34 | 01:24 |
| 8 | 187-279 | 782-772 | 66-63 | **40:26** | 290-291 | 73-72 | 03:27 |
| 9 | 112-240 | 243-240 | 0-0 | 07:34 | 243-240 | 0-0 | 06:23 |
| 10 | 55-145 | 97-91 | 1-1 | 00:18 | 95-83 | 7-7 | 00:34 |
| 11 | 129-512 | 613-551 | 72-6 | 34:03 | 282-283 | 104-72 | 08:58 |
| 12 | 231-285 | 303-303 | 7-7 | 01:01 | 303-302 | 7-7 | 00:25 |
| 13 | 249-746 | 848-848 | 57-57 | 12:45 | 470-470 | 57-57 | 02:57 |
| 14 | 192-314 | 265-250 | 0-0 | 09:22 | 258-251 | 0-0 | 04:55 |
| 15 | 280-842 | 1003-1001 | 57-57 | 18:26 | 569-569 | 79-78 | 13:02 |
| 16 | 337-559, çözümsüz | 783-782 | 16-14 | 34:40 | 533-510 | 55-23 | 30:04 |

Süre açısından değerlendirilirse, genel olarak veri gruplarının araç sayılarıyla ve iyileştirme miktarları ile orantılı olarak değişmektedir diyebiliriz. Bu yaklaşım için minimum süre 1 numaralı veri için 5 sn iken maksimum süre 8 numaralı veri için 40 dk 26 sn bulunmuştur.

### 6.3.5 Önerilen yaklaşımların YÖOK ihlal sayısına etkisi

Çizelge 6.8 başlangıç algoritması ile oluşturulan sıranın ihlal sayısı üzerinden eğer çalıştırılmadıysa verilen ihlal sayısı üzerinden tüm algoritmanın çalıştırılması sonucu elde edilen ihlal sayısına göre ilgili optimizasyonların iyileştirme üzerindeki etki oranları görülmektedir.

Başlangıç algoritması sonucunda %100 iyileşme görülen veriler bu kısımda değerlendirilmeye alınmamıştır fakat Çizelge 6.8'den görüldüğü üzere iyileşmelerin genellikle %80'den fazlası birinci aşama ile sağlanmaktadır. Sadece 1 ve 11 numaralı veriler için bu değer %80'in altında kalmasına rağmen yine de %50'nin üstündedir.

Başlangıç algoritmasnın çalıştırılmadığında birinci aşamanın YÖOK ihlal sayısındaki iyileştirmeye katkısı verilerin yarısında %100 oranında görülmektedir.

İkinci aşamanın ise iyileştirmelere herhangi bir etkisi olmamasına rağmen renk optimizasyonunun bazı verilerin ihlal sayısı iyileşmelerinin açısından oldukça fazla etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin 7 numaralı veri için başlangıç algoritması çalıştırılmadan alınan toplam sonucun %57 'si birinci aşama ile sağlanırken bunu %42'si renk optimizasyonu ile sağlanmıştır.

**Çizelge 6.8 :** Toplam iyileşme üzerinden YÖOK iyileşme yüzdeleri.

| | 1. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | | 2. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | | Renk Optimizasyonunun İyileşmeye Etkisi | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Veri** | **BA ile 1. Aşamanın İyileşmeye Etkisi** | **BA 'sız 1. Aşamanın İyileşmeye Etkisi** | **BA ile 2. Aşamanın İyileşmeye Etkisi** | **BA 'sız 2. Aşamanın İyileşmeye Etkisi** | **BA ile Renk Opt. İyileşmeye Etkisi** | **BA'sız Renk Opt. İyileşmeye Etkisi** |
| 1 | 61,70% | 23,08% | 0,00% | 0,00% | 38,30% | 76,92% |
| 2 | 85,42% | 83,33% | 0,00% | 0,00% | 14,58% | 16,67% |
| 3 | - | 100,00% | - | - | - | - |
| 4 | 97,37% | 100,00% | 0,00% | - | 2,63% | - |
| 5 | - | 100,00% | - | - | - | - |
| 6 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 7 | 80,00% | 17,65% | 0,00% | 0,00% | 20,00% | 82,35% |
| 8 | 92,11% | 57,14% | 0,00% | 0,00% | 7,89% | 42,86% |
| 9 | - | 100,00% | - | - | - | - |
| 10 | 0,00% | 100,00% | 0,00% | - | 0,00% | - |
| 11 | 51,47% | 36,00% | 0,00% | 0,00% | 48,53% | 64,00% |
| 12 | 0,00% | 100,00% | 0,00% | - | 0,00% | - |
| 13 | 100,00% | 100,00% | - | - | - | - |
| 14 | 100,00% | 100,00% | - | - | - | - |
| 15 | 100,00% | 95,00% | - | 0,00% | - | 5,00% |
| 16 | 92,86% | 36,00% | 0,00% | 0,00% | 7,14% | 64,00% |

Çizelgel 6.9'da ise ihlal sayısı(başlangıç algoritması sonucunda ya da verilen ihlal sayısı) üzerinden iyileşme yüzdeleri görülmektedir. Yani algoritma aşamalarının verilen ihlal sayısını toplam sonuca bakarak ne kadar iyileştirdiklerini göstermektedir. Başlangıç algoritmasının tüm sonuçar açısından çok daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür. 7. ve 8. verilerin sonuçlarına bakıldığında başlangıç algoritması ihlal sayısını %62 ve %31 civarında artırmasına rağmen toplam sonucun iyileşmesine yarı yarıya etkisi olduğu görülmektedir.

Başlangıç algoritmasının ihlal sayısını artırdığı örnekler için birinci aşamanın ihlal sayısını çok daha fazla azaltarak toplam ihlal sayısına daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. Örneğin 7 numaralı veri için başlangıç algoritması YÖOK ihlal sayısını

%62 oranında artırmasına rağmen yeni sıranın ihlal sayısını %62,65 oranında azaltarak verilen ihlal sayısını toplamda %39,22(Çizelge 6.10) oranında azaltmıştır.

**Çizelge 6.9 :** Toplam ihlal sayısına göre iyileşme yüzdeleri.

| Veri | BA ile İyileşme Oranı | BA ile 1. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | BA 'sız 1. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | BA ile 2. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | BA 'sız 2. Aşamanın İyileşmeye Etkisi | BA ile Renk Opt. İyileşmeye Etkisi | BA'sız Renk Opt. İyileşmeye Etkisi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -14,44% | 14,08% | 1,67% | 0,00% | 0,00% | 8,74% | 5,56% |
| 2 | -3,17% | 63,08% | 55,56% | 0,00% | 0,00% | 10,77% | 11,11% |
| 3 | 100,00% | - | 100,00% | - | 0,00% | - | 0,00% |
| 4 | 14,29% | 51,39% | 31,75% | 0,00% | 0,00% | 1,39% | 0,00% |
| 5 | 100,00% | - | 100,00% | - | 0,00% | - | 0,00% |
| 6 | 87,50% | - | 0,00% | - | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 7 | -62,75% | 62,65% | 5,88% | 0,00% | 0,00% | 15,66% | 27,45% |
| 8 | -31,17% | 34,65% | 5,19% | 0,00% | 0,00% | 2,97% | 3,90% |
| 9 | 100,00% | - | 100,00% | - | 0,00% | - | 0,00% |
| 10 | 95,45% | - | 68,18% | - | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 11 | 16,39% | 49,30% | 14,75% | 0,00% | 0,00% | 46,48% | 26,23% |
| 12 | 12,50% | - | 12,50% | - | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 13 | -26,03% | 38,04% | 21,92% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 14 | 83,33% | 100,00% | 100,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 15 | 5,10% | 38,71% | 19,39% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 1,02% |
| 16 | 42,47% | 61,90% | 24,66% | 0,00% | 0,00% | 4,76% | 43,84% |

**Çizelge 6.10 :** Birinci aşama sonucunda verilen ihlal sayısına göre iyileşme yüzdesi.

| Veri | BA ile Tüm Sonucun İyileşme Oranı | BA'sız Tüm Sonucun İyileşme Oranı | BA ile Birinci Aşama Sonucunda Toplam İyileşme | BA'sız Birinci Aşama Sonucunda Toplam İyileşme |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 11,7% | 7,2% | 1,67% | 1,67% |
| 2 | 73,0% | 66,7% | 61,90% | 55,56% |
| 3 | 100,0% | 100,0% | 100,00% | 100,00% |
| 4 | 46,0% | 31,7% | 44,44% | 31,75% |
| 5 | 100,0% | 100,0% | 100,00% | 100,00% |
| 6 | 87,5% | 0,0% | 87,50% | 0,00% |
| 7 | 64,7% | 33,3% | 39,22% | 5,88% |
| 8 | 18,2% | 9,1% | 14,29% | 5,19% |
| 9 | 100,0% | 100,0% | 100,00% | 100,00% |
| 10 | 95,5% | 68,2% | 95,45% | 68,18% |
| 11 | 95,1% | 41,0% | 40,98% | 14,75% |
| 12 | 12,5% | 12,5% | 12,50% | 12,50% |
| 13 | 21,9% | 21,9% | 21,92% | 21,92% |
| 14 | 100,0% | 100,0% | 100,00% | 100,00% |
| 15 | 41,8% | 20,4% | 41,84% | 19,39% |
| 16 | 80,8% | 68,5% | 78,08% | 24,66% |

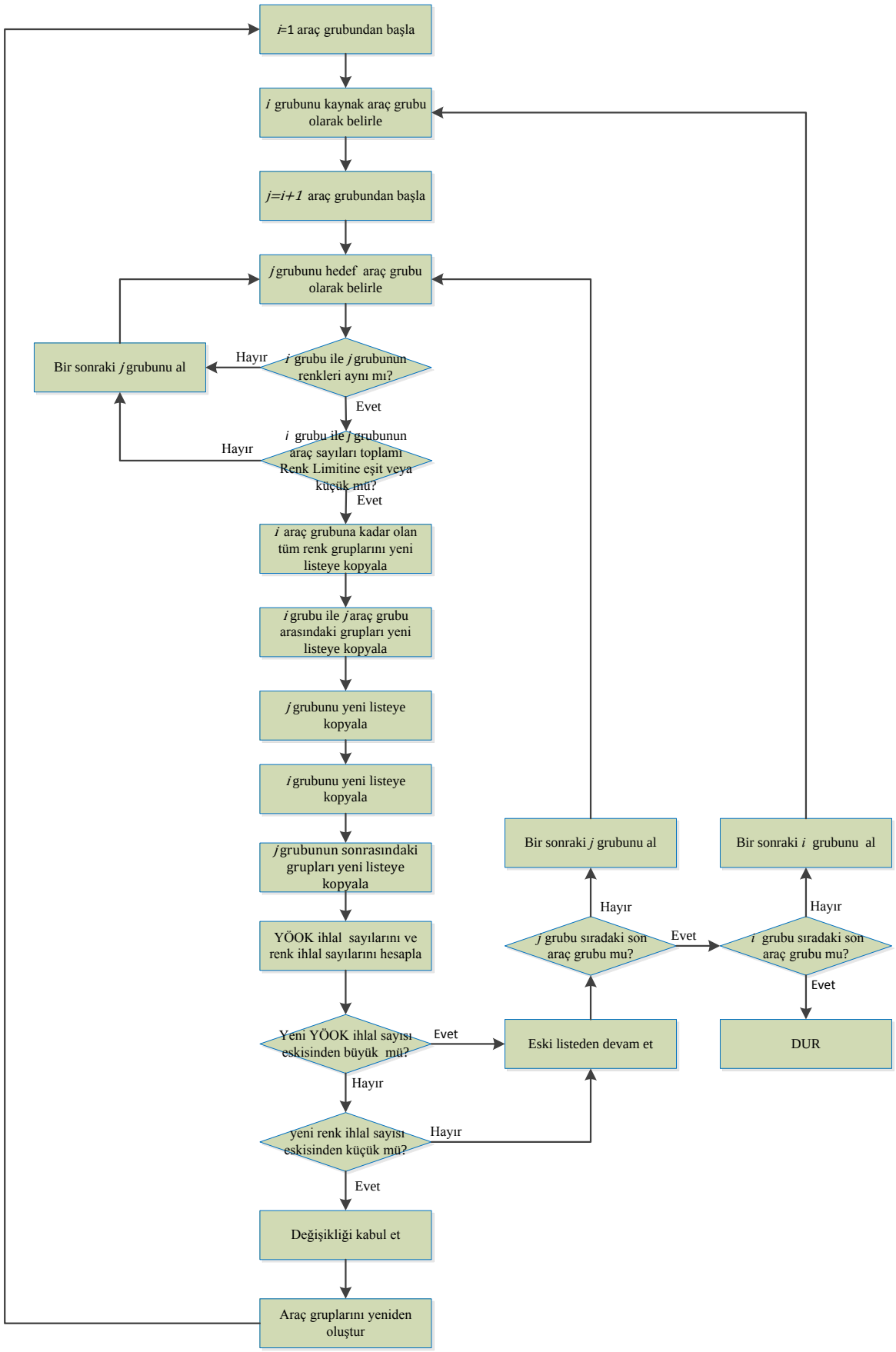
### 6.3.6 Renk optimizasyonuna ek geliştirim

Renk optimizasyonunda araç grupları herhangi bir kuraldan bağımsız bütün araç gruplarının yanına yerleştirilerek değerendirilmektedir. Bu yeni geliştirimde bir araç grubu diğer araç grubunun yanına ancak eğer bu araç grubu ile diğer araç grubunun renkleri birbirine eşit ve araç sayısı toplamları renk limitinden küçük veya eşitse eklenip değerlendirmeye alınacaktır. Değerlendirme sırasında ise YÖOK ihlal sayısı iyileşiyor olsa bile renk kısıtı ihlal sayısını artıran değişiklikler kabul edilmeyecektir. Yapılan değişiklikler Şekil 6.1 'deki akış şemasında görülmektedir.

**Çizelge 6.11 :** Renk optimizasyonu için ek geliştirim sonuçları.

| | **YÖOK Optimizasyonu Sonucu** | | **Renk Optimizasyonu Sonucu** | | **Renk Opt. Ek Geliştirim Sonucu** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Veri** | **YÖOK İhlal Sayısı** | **Renk İhlal Sayısı** | **YÖOK İhlal Sayısı** | **Renk İhlal Sayısı** | **YÖOK İhlal Sayısı** | **Renk İhlal Sayısı** |
| 1 | 177 | 115 | 159 | 113 | 164 | 111 |
| 2 | 24 | 153 | 17 | 148 | 20 | 150 |
| 3 | 0 | 81 | 0 | 73 | 0 | 81 |
| 4 | 35 | 352 | 35 | 352 | 35 | 352 |
| 5 | 0 | 71 | 0 | 69 | 0 | 71 |
| 6 | 1 | 284 | 1 | 284 | 1 | 284 |
| 7 | 31 | 512 | 18 | 507 | 26 | 502 |
| 8 | 66 | 782 | 63 | 772 | 66 | 782 |
| 9 | 0 | 243 | 0 | 240 | 0 | 242 |
| 10 | 1 | 97 | 1 | 91 | 1 | 96 |
| 11 | 82 | 611 | 6 | 551 | 79 | 567 |
| 12 | 7 | 303 | 7 | 303 | 7 | 303 |
| 13 | 57 | 848 | 57 | 848 | 57 | 848 |
| 14 | 0 | 265 | 0 | 250 | 0 | 251 |
| 15 | 57 | 1003 | 57 | 1001 | 57 | 1001 |
| 16 | 16 | 783 | 14 | 782 | 16 | 783 |

Çizelge 6.11'de ise bu geliştirim ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Görüldüğü gibi artık YÖOK sayılarında çok fazla iyileşme sağlanamazken renk kısıtı iyileşme sayılarında da kötüleşme görülmektedir. Ayrıca YÖOK ihlal sayısının eşit kaldığı durumlarda da renk ihlal sayılarının kötüleştiği durumlar olmuştur (5 ve 10 numaralı veriler). Bunun sebebi yanına ekleme yapılacağı araç grubu seçilirken burada eklenen aynı renk olma ve toplamlarının renk limitini aşmaması kontrolünden kaynaklıdır.

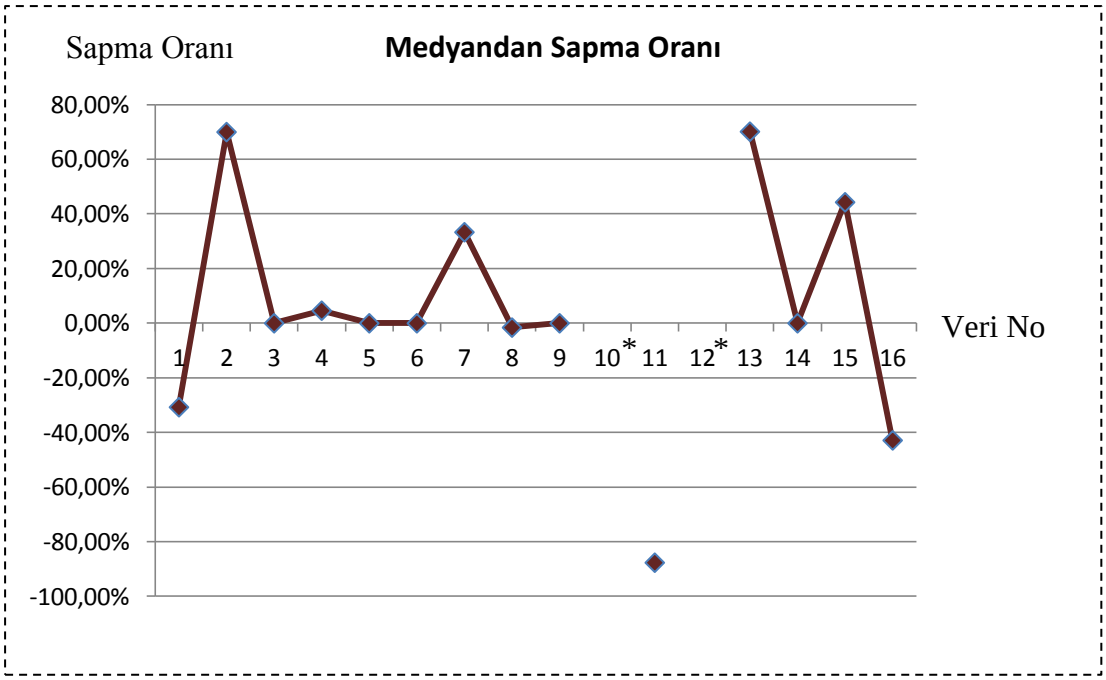



**Şekil 6.1 :** Renk optimizasyonu için ek geliştirimin akış şeması.

### 6.3.7 Tüm sonuçların ROADEF'2005 sonuçlarına göre değerlendirilmesi

Sonuçları algoritmanın tümü için değerlendirirsek, kullanılan on altı örnek üretim verisi içerisinde sadece üç verinin sonuçları YÖOK ihlal sayısı açısından ROADEF sonuçlarından fazla çıkmıştır yani %18 gibi bir oranda başarısızlık görülmektedir.

Şekil 6.2 'de elde ettiğimiz sonuçların ROADEF'2005 finalistlerinin elde ettiği sonuçların medyanından sapma oranları görülmektedir. 10 ve 12 numaralı veriler için ROADEF sonuçlarının medyanı 0 olduğundan bu veriler için sapma oranı hesaplanmamıştır fakat medyan-sonuç şeklinde değerleri sırasıyla 0-1 ve 0-7'dir. On altı veri içerisinde 9 tanesi için medyana eşit ve medyandan daha iyi sonuçlar alınmıştır.

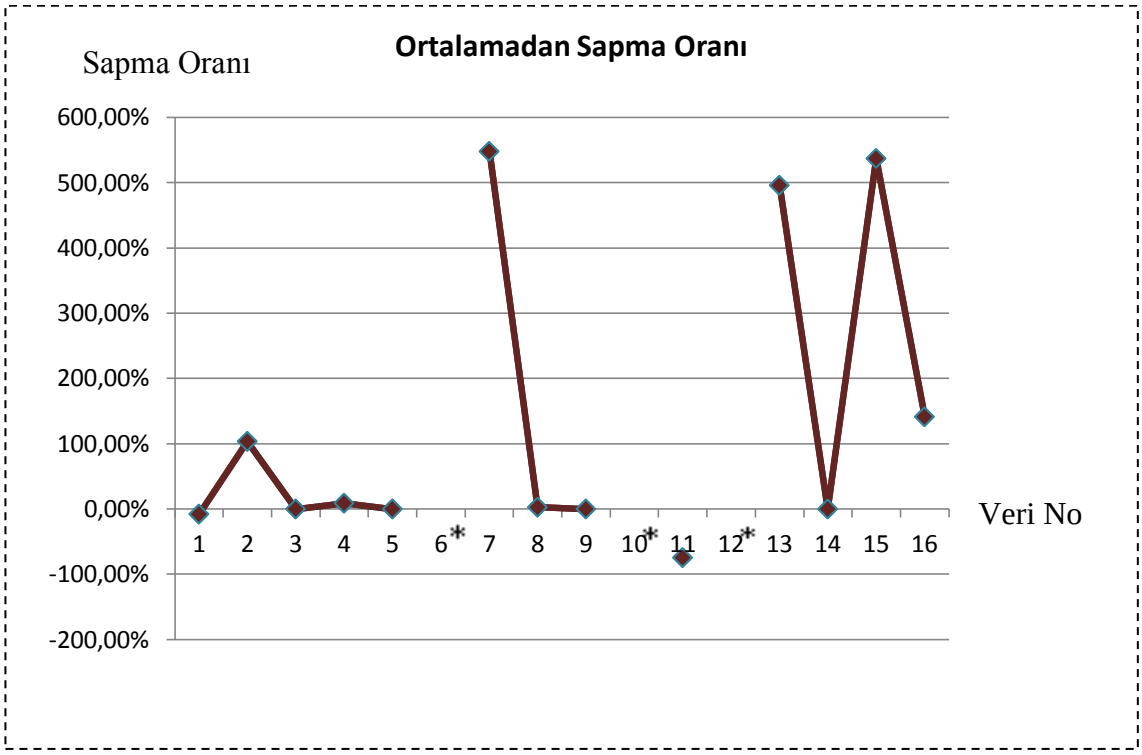



* 0≤Medyan<1 olan ROADEF'2005 verileri için sapma oranı hesaplanmamıştır

**Şekil 6.2 :** Sonuçların ROADEF sonuçlarının medyanlarından sapma grafiği.

Şekil 6.3'de ise elde ettiğimiz sonuçların ROADEF'2005 finalistlerinin elde ettği sonuçlarına göre her bir veri için ortalamadan sapma oranı görülmektedir. Verilerin çoğunluğu için ortalamadan daha kötü sonuçlar elde edilmiştir. 6, 10 ve 12 numaralı veriler için ROADEF sonuçlarının medyanı 0 ve 0-1 aralığında olduğundan bu veriler için sapma oranı hesaplanmamıştır fakat medyan-sonuç şeklinde değerleri sırasıyla 0,12-1, 0-1 ve 0-7'dir.

Hem medyan sapma oranını hem de ortalama sapma oranını hesaplarken eğer hem medyan ve ortalama değerleri 0 hem de bizim sonuçlarımız 0 ise grafikte sapma oranı % 0 olarak gösterilmiştir.




* 0≤Ortalama<1 olan ROADEF'2005 verileri için sapma oranı hesaplanmamıştır

**Şekil 6.3 :** Sonuçların ROADEF sonuçlarının ortalamalarından sapma grafiği.

# 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde montaj oran kısıtlarını ve renk kısıtarını içeren araç sıralama problemi için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir. Bu problem ROADEF'2005'in önerdiği araç sıralama problemi senaryolarından olan birinci öncelikli olarak yüksek öncelikli oran kısıtları ihlal sayısının en aza indirilmesi gerektiği ikinci öncelikli olarak da ren kısıtları ihlal sayısının minimize edildiği senaryo ele alınmıştır, fakat veri setleri sınırlı olduğu için üçüncü öncelikli olarak düşük öncelikli oran kısıtları ihlal sayısının minimize edileceği senaryoların veri setleri de değerlendirilmeye alınmıştır ve sadece YÖOK ve renk kısıtları sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

Bu tezde YÖOK kısıtları için ilk olarak açgözlü algoritma tabanlı bir başlangıç algoritması önerilmiştir. Bu yaklaşımın amacı araçların kısıtlarına göre homojen olarak yerleştirilerek ana YÖOK optimizasyonuna daha iyi bir sıra ile başlayıp daha iyi sonuçlar elde etmektir.

YÖOK optimizasyonu ise iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama araçlar yer değiştirildiklerinde bulundukları pozisyonların etkilediği ihlal sayılarını(bölgesel ihlal sayısı) iyileştiren araç çiftlerinin yer değiştirilmesine dayanır. Algoritma fazlara bölünerek ilgili fazda yer değiştirilecek uygun araç çifti bulunamadığı takdirde bölgesel ihlal sayılarını iyileştirme kuralı esnetilerek bir tarafı iyileştiren bir tarafı kötüleştiren fakat toplamda iyileştiren veya toplamda kötüleştiren araç çiftleri de belli fazlarda kabul edilmektedir. Araç çiftinin ilgili fazın kuralını sağlamadığı durumlarda bu araç çiftleri de tavlama benzetimi yaklaşımı ile belli bir olasılıkla değerlendirilmeye alınmaktadır. Tavlama benzetiminin deney tasarımı sonucunda başlangıç sıcaklığı 10000, soğuma oranı ise 0.99 olarak belirlenmiştir. İkinci aşama ise Pareto prensibine dayanmaktadır. İhlal sayısında en fazla etkisi olan oran kısıtından başlayarak tüm kısıtlar için en çok bögesel ihlal sayısına sahip sıranın %20 aracı diğer araçlar ile geçici olarak yer değiştirilerek değerlendirilir ve en iyi sonucu veren araç çifti yer değiştirilir. Bu yaklaşım birinci aşama ile çalıştırıldığında herhangi bir etkisi olmamıştır fakat iki algoritma ayrı ayrı çalıştırıldğında ikinci

aşama birinci aşama sonuçlarına çok yakın sonuçları çok daha kısa sürede elde etmiştir.

Renk kısıtı ihlal sayılarını azaltmak için ise renk optimizasyonu adı altında bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım YÖOK optimizasyonu sonucunda çıkan sıra üzerinden araçları renklerine göre gruplandırarak bu renk gruplarını bir pozisyondan alıp başka bir pozisyona ekleyerek renk ihlal sayıları azaltılmaya çalışılmıştır, fakat renk gruplarının ilgili pozisyona eklenip eklenmyeceğinin değerlendirilmesi sırasında YÖOK ihlal sayısını azalttığı sürece renk kısıtı ihlal sayısınını azaltılması göz ardı edildiğinden bazı veirleri için renk kısıtı ihlal sayısını artırdığı görülmüştür fakat bazı veriler için YÖOK ihlal sayısı azaltımında oldıukça başarılı olduğu görülmüştür.

Bu tezi diğer çalışmalardan farklılaştıran yaklaşımlar:

- YÖOK optimizasyonu için önerilen birinci ve ikinci aşamalarda kullanılan bölgesel ihlal sayılarına göre yer değiştirme yapılması ve birinci yaklaşımda tavlama benzetimi yaklaşımının kullanılması,
- İkinci aşamada pareto analizinin kullanılması,
- Renk optimizasyonunda araçların mevcut sırayı bozmadan renklerine göre gruplandırılarak yer değiştirilmesi

şeklinde sıralanabilir.

Genel olarak çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Genel olarak çıkan ihlal sayısı çözümleri YÖOK için ROADEF finalistlerinin en iyi çözüm ile en kötü çözümü arasında yer almaktadır, fakat renk optimizasyonu açısından çok iyi sonuçlar elde edilememiştir.
- Başlangıç algoritmasının çalıştırılması bazen ilk verilen sonucu kötüleştirse de tüm veriler için başlangıç algoritmasının kullanıldığı çözümlerin her zaman daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- YÖOK optimizasyonu birinci aşamasının toplam sağlanan iyileşmenin %80'nini sağladığı görülmüştür, fakat süre performansı açısından çok başarılı olduğu söylenemez.
- YÖOK optimizasyonu ikinci aşaması birinci aşaması ile çalıştırıldığında hiçbir etkisinin olmadığı fakat tek başına çalıştırıldığında birinci aşamanın sonuçlarına yakın sonuçlara çok daha kısa sürede ulaştığı görülmüştür.

- Renk optimizasyonunun YÖOK ihlal sayısını azaltması açısından bazı veriler için oldukça başarılı olduğu gçrülmüştür.

Bu tezde bulunan sonuçlar doğrultusunda ileride yapılabilecek çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Algoritmanın süresi çok uzun sürdüğünden performans artırma çalışmaları yapılabilir.
- Tüm optimizasyon yaklaşımlarında döngüler bir kurala göre çalışmaktadır, seçilecek ilk araç birinci araçtan başlayarak bu araç her zaman kendinden sonraki araçlarla değerlendirilmektedir ve kalıcı yer değiştirme seçilen ilk araç için yapılır ya da yapılmaz ve yeni sıra üzerinden döngüler devam etmektedir. Bu durum arama uzayını daraltıyor olabilir, kalıcı yer değiştirme seçilen birinci araç bazında değil tüm araçlar bazında değerlendirilmelidir, çünkü bütün araçlar arasında ihlal sayısını çok daha fazla iyileştiren araç çiftleri yer alabilir. Bu çalışmada süreyi daha fazla artırmaması için yapılmamıştır.
- Başlangıç algoritması ile renk kısıtı ihlalleri çok daha fazla çıkmaktadır, bunun sebebi başlangıç algoritması araçları sıralarken sadece YÖOK ihlal sayılarını iyileştirmeye yönelik kontroller yaptığından renk kısıtları açısından araçlar karma bir hale gelmekte ve renk kısıtı ihlal sayıları artmaktadır. Başlangıç algoritmasına renk kısıtı ile ilgili de kontroller eklenerek YÖOK ihlal sayılarına göre araçlar çizelgelenirken renk kısıtlarının da çok fazla kötüleşmemesi sağlanabilir.
- YÖOK optimizasyonu ikinci aşamasının birinci aşama ile çalıştırılırken de iyileşmeye etkisinin sağlanması için bu geliştirimler yapılabilir.
- Renk optimizayonu farklı geliştirimlerle YÖOK optimizasyonuna daha uygun hale getirilebilir.
- Araç çiftlerinin yer değiştirlmesi veya araç gruplarının bir yerden bir yere eklenmesinde araç çiftlerinin veya eklenecek araç gruplarının seçimi belli bir kurala göre yapılmaktadır ve bu durum arama uzayını daraltıyor olabilir. Arama döngülerine yer değiştirilecek araç çiftleri ve eklenecek araç gruplarının ve ekleneceği pozisyonun rassal seçimi ile ilgili fazlar eklenebilir.

Bu çalışma doğrultusunda çıkan sonuçlar haricinde, renk kısıtlarının birinci öncelikli olduğu araç sıralama problemleri için farklı yaklaşımlar geliştirilebilir. Bu çalışmada renk optimizasyonu için kullanılan araç grupları genetik algoritma kullanılarak düzenlenebilir.

## KAYNAKLAR


**Aycan, E.** (2008). Solving the course scheduling problem by constraint programming and simulated annealing, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Sf. 23-32

**Bergen, M. E., Beek, P. V., Carchrae, T.** (2001). Constraint-based vehicle assembly line sequencing, in: Proceedings of the 14th Canadian Conference on Artificial Intelligence, LNCS, Vol. 2056, Sf.. 88–99.

**Bolat, A. ve Yano, C.** (1992a). Scheduling algorithms to minimise utility work at a single station on a paced assembly line. Production Planning & Control, 3 (4), Sf. 393–405.

**Bolat, A. ve Yano, C.** (1992b). A surrogate objective for utility work in paced assembly lines. Production Planning & Control, 3 (4), Sf. 406–412.

**Brailsford, S.C., Potts, N.C., Smith, P.M.** (1999). Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications, European Journal of Operational Research, 119, Sf. 557-581.

**Briant, O., Naddef, D., Mounie, G.** (2008), Greedy approach and multi-criteria simulated annealing fothe car sequencing problem, European Journal of Operational Research, 191, Sf. 993–1003

**Cordeau, J. F., Laporte, G., Pasin, F.** (2008). Iterated tabu search for the car sequencing problem, European Journal of Operational Research, 191, Sf. 945–956.

**Drexl, A., Kimms, A.** (2001). Sequencing jit mixed-model assembly lines under station load and part-usage constraints, Management Science 47 (3), Sf. 480–491.

**Estellon, B., Gardi, F., Nouioua, K.** (2008). Two local search approaches for solving real-life car sequencing problems, European Journal of Operational Research, 191, Sf. 928–944.

**Gagne, C., Gravel, M., Price, W. L.** (2006). Solving real car sequencing problems with ant colony optimization, European Journal of Operational Research, 174, Sf. 1427-1448.

**Gavronovic, H.** (2008). Local search and suffix tree for car-sequencing problem with colors, European Journal of Operational Research, 191, 972–980.

**Golle, U.**, Boysen, N., Rothlauf, F. (2010). Analysis and design of sequencing rules for car sequencing, European Journal of Operational Research, 206, Sf. 579–585.

**Gottlieb, J., Puchta, M., Solnon, C.** (2003). A study of greedy, local search and ant colony optimization approaches for car sequencing problems, Applications of Evolutionary Computing Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2611, Sf. 246–257.

**Gravel, M., Gagne´, C., Price, W. L.** (2005). Review and comparison of three methods for the solution of the car-sequencing problem, Journal of the Operational Research Society 56 (11), Sf. 1287–1295.

**Hindi K. S. ve Ploszajski M. G.** (1994). Formulation and solution of a selection and sequencing problem in car manufacture, Computers and Industrial Engineering, 26 (1), Sf. 203–211.

**Joly, A. ve Yannick, F**. (2008). Heuristics for an industrial car sequencing problem considering paint and assembly shop objectives, Computers & Industrial Engineering, 55, Sf. 295–310.

**Kis, T.** (2004). On the complexity of the car sequencing problem, Operations Research Letters, 32, Sf. 331 – 335.

**Lesert ve diğ.** (2010). Definition of spacing constraints for the car sequencing problem, International Journal of Production Research, Volume 49, Issue 4, Sf. 963-994

**Parello, B. D. ve Kabat, W. C.** (1986). Job-Shop Scheduling Using Automated Reasoning: A Case Study of the Car-Sequencing Problem, Journal of Automated Reasoning 2, Sf. 1-42.

**Prandstetter, M.** (2005). Exact and heuristic methods for solving the car sequencing Problem, Diplomarbeit, Viyana Teknik Üniversitesi.

**Prandstetter, M. ve Raidl, G. R.** (2008). An integer linear programming approach and a hybrid variable neighborhood search for the car sequencing problem, European Journal of Operational Research, 191, Sf. 1004-1022.

**Ribeiro, C. C., Aloise, D., Noronha, T.F., Rocha, C., Urrutia, S.** (2008). A hybrid heuristic for a multi-objective real-life car sequencing problem with painting and assembly line constraints,. European Journal of Operational Research, 191, Sf. 981–992.

**Solnon, C.** (2008). Combining two pheromone structures for solving the car sequencing problem with Ant Colony Optimization, European Journal of Operational Research, 191, Sf. 1043–1055.

**Solnon C., Cung, V. D., Nguyen, A., Artigues, C.** (2008). The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem, European Journal of Operational Research 191, Sf. 912–927.

**Yano, C.A. ve Rachamadugu, R**. (1991). Sequencing to minimise work overload in assembly lines with product options. Management Science, 37 (5), Sf. 572–586.

**Nguyen, A.** (2005), Challenge ROADEF'2005 Car Sequencing Problem, Adres: http://challenge.roadef.org/2005/en/sujet.php.

**EKLER**

**EK A :** ROADEF’2005 SONUÇLARI
**EK B :** ROADEF’2005 VERİ SETLERİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMI CD’Sİ

**EK A**

**Çizelge A.1:** 1 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 655_CH2_EP_RAF_ENP_S52_J1_J2_S01_J1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Pawlak | 153.00 | 0.00 | 34.00 |
| 2 | Gavranovic | 153.00 | 0.00 | 34.00 |
| 3 | Celso | 153.00 | 0.00 | 34.00 |
| 4 | Nouioua-Gardi | 153.00 | 0.00 | 34.00 |
| 5 | Naddef | 153.00 | 0.00 | 34.20 |
| 6 | Kuipers | 153.00 | 0.00 | 34.60 |
| 7 | Jaszkiewicz | 153.00 | 0.00 | 35.20 |
| 8 | Cordeau | 153.00 | 0.00 | 35.20 |
| 9 | Gendreau | 153.00 | 0.00 | 36.00 |
| 10 | Montemanni | 153.00 | 0.00 | 41.00 |
| 11 | Gravel | 153.00 | 0.00 | 47.80 |
| 12 | Klau | 153.00 | 0.00 | 54.00 |
| 13 | Bonizzoni | 153.00 | 0.00 | 57.00 |
| 14 | Stuetzle | 186.80 | 0.00 | 30.00 |
| 15 | Benoist | 280.00 | 0.00 | 33.00 |
| 16 | Caseau | 306.00 | 0.00 | 32.00 |
| 17 | Zufferey | | çözüm yok | |
| 18 | Bloemen | | çözüm yok | |

**Çizelge A.2 :** 2 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 034_VU_EP_RAF_ENP_S51_J1_J2_J3 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Celso | 8.00 | 35.80 | 87.00 |
| 2 | Kuipers | 8.00 | 36.40 | 87.00 |
| 3 | Naddef | 8.00 | 36.40 | 87.00 |
| 4 | Nouioua-Gardi | 8.00 | 37.00 | 87.00 |
| 5 | Bloemen | 8.00 | 35.80 | 87.40 |
| 6 | Gavranovic | 8.00 | 34.40 | 88.40 |
| 7 | Gendreau | 8.00 | 48.00 | 90.00 |
| 8 | Stuetzle | 8.00 | 83.00 | 90.00 |
| 9 | Jaszkiewicz | 8.00 | 50.20 | 91.40 |
| 10 | Montemanni | 8.00 | 40.20 | 91.60 |
| 11 | Pawlak | 8.00 | 38.00 | 93.00 |
| 12 | Cordeau | 8.00 | 53.60 | 95.40 |
| 13 | Gravel | 8.00 | 54.60 | 101.00 |
| 14 | Klau | 8.00 | 61.20 | 117.60 |
| 15 | Zufferey | 9.60 | 75.60 | 191.60 |
| 16 | Bonizzoni | 12.00 | 52.00 | 103.00 |
| 17 | Benoist | | çözüm yok | |
| 18 | Caseau | | çözüm yok | |

**Çizelge A.3 :** 3 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 064_38_2_EP_RAF_ENP_ch2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Cordeau | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 2 | Kuipers | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 3 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 4 | Celso | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 5 | Gavranovic | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 6 | Bloemen | 0.00 | 51.00 | 34.00 |
| 7 | Naddef | 0.00 | 52.00 | 34.00 |
| 8 | Gendreau | 0.00 | 59.00 | 34.00 |
| 9 | Gravel | 0.00 | 62.00 | 34.00 |
| 10 | Benoist | 0.00 | 90.00 | 34.00 |
| 11 | Pawlak | 0.00 | 34.00 | 35.00 |
| 12 | Stuetzle | 0.00 | 37.00 | 36.00 |
| 13 | Jaszkiewicz | 0.00 | 56.00 | 36.00 |
| 14 | Caseau | 0.00 | 81.00 | 38.00 |
| 15 | Zufferey | 0.00 | 96.00 | 38.00 |
| 16 | Montemanni | 0.00 | 37.00 | 39.00 |
| 17 | Klau | 0.00 | 58.00 | 39.00 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 14.00 | 54.00 |

**Çizelge A.4 :** 4 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 048_CH2_EP_RAF_ENP_S49_J5 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 31.00 | 1116.20 | 76.80 |
| 2 | Naddef | 31.00 | 1118.60 | 77.60 |
| 3 | Gavranovic | 31.00 | 1114.80 | 79.00 |
| 4 | Celso | 31.00 | 1128.40 | 79.00 |
| 5 | Kuipers | 31.00 | 1113.00 | 79.60 |
| 6 | Bloemen | 31.00 | 1116.00 | 80.00 |
| 7 | Gendreau | 31.00 | 1114.00 | 88.00 |
| 8 | Pawlak | 31.00 | 1034.00 | 95.60 |
| 9 | Stuetzle | 31.00 | 1031.40 | 95.80 |
| 10 | Cordeau | 31.00 | 1118.20 | 98.60 |
| 11 | Jaszkiewicz | 31.00 | 998.80 | 103.60 |
| 12 | Montemanni | 31.00 | 1066.40 | 105.20 |
| 13 | Zufferey | 31.00 | 1097.40 | 109.80 |
| 14 | Benoist | 31.00 | 939.60 | 117.00 |
| 15 | Caseau | 31.00 | 966.80 | 117.00 |
| 16 | Bonizzoni | 31.00 | 931.00 | 128.00 |
| 17 | Gravel | 31.00 | 1005.00 | 134.60 |
| 18 | Klau | 34.80 | 938.00 | 150.60 |

**Çizelge A.5 :** 5 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 022_3_4_EP_RAF_ENP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 1.00 | 31.00 |
| 2 | Naddef | 0.00 | 1.00 | 31.00 |
| 3 | Cordeau | 0.00 | 1.00 | 31.00 |
| 4 | Gavranovic | 0.00 | 1.00 | 31.00 |
| 5 | Celso | 0.00 | 2.00 | 31.00 |
| 6 | Pawlak | 0.00 | 0.00 | 32.00 |
| 7 | Bloemen | 0.00 | 1.00 | 32.00 |
| 8 | Benoist | 0.00 | 3.00 | 32.00 |
| 9 | Kuipers | 0.00 | 2.00 | 33.00 |
| 10 | Gravel | 0.00 | 1.00 | 34.00 |
| 11 | Jaszkiewicz | 0.00 | 0.00 | 37.00 |
| 12 | Gendreau | 0.00 | 2.00 | 38.00 |
| 13 | Zufferey | 0.00 | 47.00 | 41.00 |
| 14 | Stuetzle | 0.00 | 0.00 | 43.00 |
| 15 | Caseau | 0.00 | 79.00 | 45.00 |
| 16 | Klau | 0.00 | 5.00 | 58.00 |
| 17 | Montemanni | 0.00 | 0.00 | 62.00 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 1.00 | 112.00 |

**Çizelge A.6 :** 6 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 048_CH1_EP_RAF_ENP_S50_J4 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Kuipers | 0.00 | 1005.60 | 196.00 |
| 2 | Celso | 0.00 | 1016.00 | 196.00 |
| 3 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 1044.80 | 196.00 |
| 4 | Naddef | 0.00 | 1053.80 | 196.00 |
| 5 | Bloemen | 0.00 | 1056.00 | 196.00 |
| 6 | Pawlak | 0.00 | 974.00 | 197.00 |
| 7 | Gavranovic | 0.00 | 972.80 | 197.20 |
| 8 | Stuetzle | 0.00 | 1104.80 | 197.40 |
| 9 | Zufferey | 0.00 | 1255.60 | 198.40 |
| 10 | Cordeau | 0.00 | 1201.20 | 200.40 |
| 11 | Gendreau | 0.00 | 1135.60 | 201.00 |
| 12 | Benoist | 0.00 | 1146.40 | 201.80 |
| 13 | Gravel | 0.00 | 1182.00 | 203.00 |
| 14 | Jaszkiewicz | 0.00 | 1109.60 | 205.40 |
| 15 | Montemanni | 0.00 | 1034.80 | 205.60 |
| 16 | Caseau | 0.00 | 1142.40 | 220.00 |
| 17 | Bonizzoni | 0.00 | 1013.00 | 233.00 |
| 18 | Klau | 2.20 | 1107.20 | 209.60 |

**Çizelge A.7 :** 5 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 048_39_1_EP_RAF_ENP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Naddef | 0.00 | 612.00 | 174.00 |
| 2 | Kuipers | 0.00 | 690.00 | 174.00 |
| 3 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 615.00 | 175.00 |
| 4 | Celso | 0.00 | 773.00 | 175.00 |
| 5 | Bloemen | 0.00 | 720.00 | 178.00 |
| 6 | Zufferey | 0.00 | 1161.00 | 182.00 |
| 7 | Stuetzle | 0.00 | 708.00 | 187.00 |
| 8 | Gavranovic | 0.00 | 659.00 | 188.00 |
| 9 | Gendreau | 0.00 | 750.00 | 191.00 |
| 10 | Gravel | 0.00 | 904.00 | 191.00 |
| 11 | Jaszkiewicz | 0.00 | 740.00 | 202.00 |
| 12 | Pawlak | 0.00 | 767.00 | 212.00 |
| 13 | Cordeau | 0.00 | 986.00 | 214.00 |
| 14 | Benoist | 0.00 | 603.00 | 241.00 |
| 15 | Caseau | 0.00 | 744.00 | 241.00 |
| 16 | Montemanni | 5.00 | 928.00 | 189.00 |
| 17 | Bonizzoni | 18.00 | 759.00 | 205.00 |
| 18 | Klau | 27.00 | 853.00 | 202.00 |

**Çizelge A.8:** 8 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 064_CH1_EP_RAF_ENP_S49_J1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 61.00 | 29.80 | 187.20 |
| 2 | Naddef | 61.00 | 29.00 | 190.40 |
| 3 | Celso | 61.00 | 81.40 | 190.80 |
| 4 | Gavranovic | 61.00 | 47.40 | 195.80 |
| 5 | Bloemen | 61.00 | 45.40 | 198.00 |
| 6 | Kuipers | 61.00 | 48.60 | 201.80 |
| 7 | Stuetzle | 61.00 | 251.00 | 211.20 |
| 8 | Cordeau | 61.00 | 219.20 | 218.40 |
| 9 | Zufferey | 61.00 | 429.00 | 223.00 |
| 10 | Jaszkiewicz | 61.00 | 118.80 | 229.40 |
| 11 | Gendreau | 61.00 | 133.60 | 234.40 |
| 12 | Bonizzoni | 61.00 | 80.00 | 241.00 |
| 13 | Pawlak | 61.00 | 140.40 | 249.40 |
| 14 | Benoist | 61.00 | 70.00 | 258.00 |
| 15 | Montemanni | 61.00 | 275.00 | 267.60 |
| 16 | Caseau | 61.00 | 113.20 | 274.20 |
| 17 | Gravel | 61.00 | 115.80 | 279.40 |
| 18 | Klau | 67.00 | 119.60 | 263.00 |

**Çizelge A.9 :** 9 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 064_38_2_EP_RAF_ENP_ch1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 759.00 | 112.00 |
| 2 | Bloemen | 0.00 | 760.00 | 112.00 |
| 3 | Celso | 0.00 | 764.00 | 114.00 |
| 4 | Cordeau | 0.00 | 766.00 | 114.00 |
| 5 | Naddef | 0.00 | 759.00 | 115.00 |
| 6 | Gavranovic | 0.00 | 759.00 | 117.00 |
| 7 | Gravel | 0.00 | 789.00 | 117.00 |
| 8 | Kuipers | 0.00 | 760.00 | 118.00 |
| 9 | Benoist | 0.00 | 776.00 | 123.00 |
| 10 | Pawlak | 0.00 | 760.00 | 124.00 |
| 11 | Gendreau | 0.00 | 773.00 | 132.00 |
| 12 | Stuetzle | 0.00 | 759.00 | 134.00 |
| 13 | Zufferey | 0.00 | 804.00 | 134.00 |
| 14 | Jaszkiewicz | 0.00 | 757.00 | 139.00 |
| 15 | Montemanni | 0.00 | 760.00 | 164.00 |
| 16 | Klau | 0.00 | 775.00 | 184.00 |
| 17 | Caseau | 0.00 | 777.00 | 205.00 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 741.00 | 240.00 |

**Çizelge A.10 :** 10 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 034_VP_EP_RAF_ENP_S51_J1_J2_J3 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Benoist | 0.00 | 794.80 | 55.20 |
| 2 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 586.80 | 55.80 |
| 3 | Naddef | 0.00 | 582.00 | 56.60 |
| 4 | Bloemen | 0.00 | 609.40 | 56.80 |
| 5 | Gravel | 0.00 | 696.00 | 57.40 |
| 6 | Celso | 0.00 | 643.60 | 58.00 |
| 7 | Cordeau | 0.00 | 680.40 | 58.80 |
| 8 | Gavranovic | 0.00 | 585.40 | 59.00 |
| 9 | Caseau | 0.00 | 883.20 | 59.80 |
| 10 | Kuipers | 0.00 | 595.80 | 60.40 |
| 11 | Gendreau | 0.00 | 750.00 | 66.00 |
| 12 | Zufferey | 0.00 | 924.20 | 72.00 |
| 13 | Stuetzle | 0.00 | 754.40 | 73.60 |
| 14 | Jaszkiewicz | 0.00 | 617.60 | 75.60 |
| 15 | Pawlak | 0.00 | 608.00 | 79.20 |
| 16 | Klau | 0.00 | 741.40 | 88.40 |
| 17 | Montemanni | 0.00 | 538.60 | 144.80 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 530.00 | 145.00 |

**Çizelge A.11 :** 11 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 039_38_4_EP_RAF_ch1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Kuipers | 13.00 | 0.00 | 129.00 |
| 2 | Bloemen | 13.00 | 0.00 | 130.00 |
| 3 | Nouioua-Gardi | 13.00 | 0.00 | 131.00 |
| 4 | Naddef | 13.00 | 0.00 | 132.00 |
| 5 | Zufferey | 13.00 | 0.00 | 144.00 |
| 6 | Benoist | 13.00 | 0.00 | 182.00 |
| 7 | Celso | 14.00 | 0.00 | 122.00 |
| 8 | Gendreau | 14.00 | 0.00 | 141.00 |
| 9 | Cordeau | 15.00 | 0.00 | 179.00 |
| 10 | Jaszkiewicz | 15.00 | 0.00 | 179.00 |
| 11 | Gravel | 15.00 | 0.00 | 196.00 |
| 12 | Stuetzle | 17.00 | 0.00 | 233.00 |
| 13 | Gavranovic | 18.00 | 0.00 | 177.00 |
| 14 | Caseau | 22.00 | 0.00 | 218.00 |
| 15 | Montemanni | 35.00 | 0.00 | 217.00 |
| 16 | Bonizzoni | 39.00 | 0.00 | 276.00 |
| 17 | Pawlak | 58.00 | 0.00 | 512.00 |
| 18 | Klau | 84.00 | 0.00 | 248.00 |

**Çizelge A.12 :** 12 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 039_CH3_EP_RAF_ENP_S49_J1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Naddef | 0.00 | 30.00 | 231.00 |
| 2 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 30.20 | 231.00 |
| 3 | Bloemen | 0.00 | 44.40 | 231.00 |
| 4 | Kuipers | 0.00 | 51.00 | 231.00 |
| 5 | Gavranovic | 0.00 | 32.20 | 232.20 |
| 6 | Benoist | 0.00 | 343.20 | 232.00 |
| 7 | Celso | 0.00 | 2162.60 | 231.00 |
| 8 | Gravel | 0.00 | 152.60 | 233.40 |
| 9 | Zufferey | 0.00 | 411.00 | 233.20 |
| 10 | Cordeau | 0.00 | 172.40 | 233.60 |
| 11 | Stuetzle | 0.00 | 223.40 | 234.60 |
| 12 | Gendreau | 0.00 | 475.40 | 235.00 |
| 13 | Pawlak | 0.00 | 94.80 | 237.40 |
| 14 | Jaszkiewicz | 0.00 | 193.20 | 239.40 |
| 15 | Klau | 0.00 | 270.00 | 250.40 |
| 16 | Caseau | 0.00 | 1243.20 | 265.60 |
| 17 | Montemanni | 0.00 | 97.00 | 272.60 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 101.00 | 285.00 |

**Çizelge A.13 :** 13 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 024_38_3_EP_RAF_ENP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 4.00 | 83.00 | 249.00 |
| 2 | Naddef | 4.00 | 83.00 | 250.00 |
| 3 | Kuipers | 4.00 | 186.00 | 256.00 |
| 4 | Celso | 4.00 | 174.00 | 257.00 |
| 5 | Bloemen | 4.00 | 162.00 | 259.00 |
| 6 | Gavranovic | 4.00 | 287.00 | 279.00 |
| 7 | Zufferey | 4.00 | 385.00 | 287.00 |
| 8 | Gendreau | 4.00 | 266.00 | 304.00 |
| 9 | Cordeau | 4.00 | 508.00 | 323.00 |
| 10 | Jaszkiewicz | 4.00 | 229.00 | 327.00 |
| 11 | Benoist | 4.00 | 239.00 | 356.00 |
| 12 | Gravel | 4.00 | 266.00 | 390.00 |
| 13 | Caseau | 4.00 | 615.00 | 471.00 |
| 14 | Stuetzle | 6.00 | 1015.00 | 278.00 |
| 15 | Montemanni | 6.00 | 739.00 | 323.00 |
| 16 | Pawlak | 15.00 | 693.00 | 746.00 |
| 17 | Bonizzoni | 19.00 | 195.00 | 371.00 |
| 18 | Klau | 63.00 | 290.00 | 376.00 |

**Çizelge A.14 :** 14 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 023_EP_RAF_ENP_S49_J2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 66.00 | 192.40 |
| 2 | Naddef | 0.00 | 68.20 | 192.80 |
| 3 | Celso | 0.00 | 77.20 | 193.00 |
| 4 | Zufferey | 0.00 | 85.60 | 195.20 |
| 5 | Bloemen | 0.00 | 64.00 | 195.80 |
| 6 | Kuipers | 0.00 | 70.40 | 197.20 |
| 7 | Gravel | 0.00 | 97.20 | 197.80 |
| 8 | Gavranovic | 0.00 | 77.00 | 203.00 |
| 9 | Benoist | 0.00 | 95.60 | 204.80 |
| 10 | Stuetzle | 0.00 | 144.40 | 211.00 |
| 11 | Cordeau | 0.00 | 79.00 | 211.80 |
| 12 | Gendreau | 0.00 | 273.20 | 215.80 |
| 13 | Caseau | 0.00 | 130.00 | 232.00 |
| 14 | Klau | 0.00 | 102.80 | 232.80 |
| 15 | Jaszkiewicz | 0.00 | 68.20 | 246.20 |
| 16 | Montemanni | 0.00 | 54.40 | 271.20 |
| 17 | Pawlak | 0.00 | 97.40 | 299.60 |
| 18 | Bonizzoni | 0.00 | 44.00 | 314.00 |

**Çizelge A.15 :** 15 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 024_38_5_EP_RAF_ENP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 4.00 | 79.00 | 280.00 |
| 2 | Naddef | 4.00 | 80.00 | 282.00 |
| 3 | Kuipers | 4.00 | 126.00 | 285.00 |
| 4 | Celso | 4.00 | 125.00 | 286.00 |
| 5 | Bloemen | 4.00 | 101.00 | 295.00 |
| 6 | Zufferey | 4.00 | 164.00 | 301.00 |
| 7 | Gavranovic | 4.00 | 126.00 | 304.00 |
| 8 | Stuetzle | 4.00 | 151.00 | 304.00 |
| 9 | Gendreau | 4.00 | 137.00 | 324.00 |
| 10 | Cordeau | 4.00 | 274.00 | 355.00 |
| 11 | Benoist | 4.00 | 145.00 | 369.00 |
| 12 | Gravel | 4.00 | 151.00 | 392.00 |
| 13 | Montemanni | 6.00 | 308.00 | 363.00 |
| 14 | Caseau | 6.00 | 289.00 | 503.00 |
| 15 | Jaszkiewicz | 7.00 | 154.00 | 347.00 |
| 16 | Bonizzoni | 26.00 | 122.00 | 415.00 |
| 17 | Pawlak | 27.00 | 453.00 | 842.00 |
| 18 | Klau | 75.00 | 143.00 | 477.00 |

**Çizelge A.16 :** 16 numaralı üretim verisi için ROADEF sonuçları.

| 024_EP_RAF_ENP_S49_J2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sıralama** | **Adaylar** | **YÖOK Sonuçları** | **DÖOK Sonuçları** | **Renk Sonuçları** |
| 1 | Nouioua-Gardi | 0.00 | 6.00 | 337.00 |
| 2 | Celso | 0.00 | 12.00 | 352.80 |
| 3 | Kuipers | 0.00 | 10.60 | 354.00 |
| 4 | Bloemen | 0.00 | 6.80 | 355.60 |
| 5 | Cordeau | 0.00 | 36.80 | 406.00 |
| 6 | Gavranovic | 0.00 | 9.80 | 409.00 |
| 7 | Jaszkiewicz | 0.00 | 25.00 | 421.40 |
| 8 | Gendreau | 0.00 | 153.80 | 427.00 |
| 9 | Gravel | 0.00 | 34.40 | 442.40 |
| 10 | Bonizzoni | 0.00 | 15.00 | 506.00 |
| 11 | Caseau | 0.00 | 133.80 | 559.60 |
| 12 | Stuetzle | 0.60 | 66.80 | 374.20 |
| 13 | Montemanni | 1.20 | 105.40 | 434.20 |
| 14 | Pawlak | 15.00 | 196.40 | 875.00 |
| 15 | Benoist | 26.60 | 18.20 | 446.40 |
| 16 | Klau | 49.40 | 33.80 | 444.80 |
| 17 | Naddef | | çözüm yok | |
| 18 | Zufferey | | çözüm yok | |



**ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad: Emek Gamze Köksoy**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Düsseldorf / 02.01.1988**

**Adres: Bulgurlu Mah. Sunar Sok. No:22/5 Üsküdar İstanbul**

**E-Posta: emekkoksoy@gmail.com**

**Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği**

**Mesleki Deneyim ve Ödüller:**

| | |
|---|---|
| **Ocak 2014 - Halen** | Intertech Bilgi İşlem ve Pazarlama AŞ<br>İş Analisti |
| **Haziran 2012-Aralık 2013** | Ford Otomotiv Sanayi AŞ<br>Endüstri Mühendisi |