



**ORGANİZASYONA ÖZGÜ İŞ YÜKÜ KURALLARINA BAĞLI
KAYNAK KISITLI ÇİZELGELEME**

Fatih ÇELİK

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih ÇELİK

16/07/2024

ORGANİZASYONA ÖZGÜ İŞ YÜKÜ KURALLARINA BAĞLI
KAYNAK KISITLI ÇİZELGELEME

(Doktora Tezi)

Fatih ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Yapılan işin niteliğine bağlı olarak her bir iş kolu, ana çerçevesi yasal düzenleyiciler tarafından belirlenmiş kendine özgü çalışma kurallarına sahiptir. Havacılık sektörü, taşıdığı riskler nedeniyle çok sıkı çalışma kurallarının uygulandığı iş kollarından biridir. Bu çalışmada, sivil havacılıktakinden nispeten farklı düzenlemelere tabi olan askerî havacılık alanında görev yapan deniz kuvvetleri helikopter pilotlarının çalışma kurallarından esinlenen organizasyona özgü ve literatürde rastlanmayan bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır. İşler, işlem süreleri bakımından yüksek multiplisiteye (az çeşit yüksek sayı) sahiptir. Gündüz ve gece olarak ikiye ayrılan gün temelli çizelge yapısında, işlerin yapıldığı periyoda göre operatör ek kaynağının tüketilmesi farklılık göstermektedir. Yorgunluk katsayısı uygulanan gece periyodunda yapılan işler öncesi ve sonrasında özel dinlenme süreleri bulunmakta, gece periyodunda yapılan işlerin hem süre hem de sayı olarak gündüz periyoduna etkileri bulunmaktadır. Operatörün günlük iş yükü, normal ve ağır olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Ardışık günlerde ağır kategori iş yükü oluştuğunda özel dinlenme süreleri uygulanmaktadır. Çalışmada, özellikle ‘tek makine bir operatör’ ve ‘tek makine iki operatör’ konfigürasyonları incelenmiştir. Problemin tam sayı programlama modeli sunulmuştur. NP-zor yapısı nedeniyle problem boyutları büyüdükçe tam çözüm yaklaşımında makul sürelerde optimal çözümlerin garanti edilmesi ve uygun çözümlere ulaşılması zorlaşmaktadır. Problemin çözümü için tam çözüm yaklaşımı ve tavlama benzetimi yaklaşımı kullanılmıştır. Geliştirilen açgözlü kurucu sezgisel algoritmalarından kısa sürede elde edilen çözümler; tam çözüm yaklaşımında hem üst sınır hem de sıcak başlangıç olarak, tavlama benzetimi yaklaşımında ise başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Son olarak, çözüm yaklaşımlarının etkinliği farklı konfigürasyon ve büyüklükteki örnek test problemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 90610

Anahtar Kelimeler : İş yükü, çalışma saatleri, tek makine çizelgeleme, ek kaynak, yüksek multiplisite, tam çözüm yaklaşımı, tam sayı programlama, açgözlü kurucu sezgisel, metasezgisel, tavlama benzetimi

Sayfa Adedi : 104

Danışman : Prof.Dr. Ertan GÜNER

RESOURCE CONSTRAINED SCHEDULING WITH ORGANIZATION SPECIFIC WORKLOAD RULES

(Ph. D. Thesis)

Fatih ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

Depending on the type of the work performed, each line of work has its own specific work regulations, the main framework of which is set by the legal authorities. The aviation sector is one of the lines of work where, due to the risks involved, very strict work regulations are applied. Inspired by the working rules of naval helicopter pilots in military aviation, which is subject to relatively different regulations than civil aviation, this study addresses an organisation-specific scheduling problem that is not found in the literature.. Jobs have a high multiplicity structure in terms of processing times. The schedule is daily with daytime and nighttime periods. The operator is considered as an additional resource whose consumption varies according to the period of the day. A fatigue coefficient is applied for the nighttime period. There are specific rest periods before and after nighttime period jobs, and affect both daily working time and number of jobs in the daytime period. The operator's daily workload is divided into two categories: normal and heavy. When the workload is heavy on consecutive days, specific rest periods must be scheduled. In the study, 'single machine one operator' and 'single machine two operator' configurations were investigated. The mathematical model of the problem is presented. Due to its NP-hard nature, as the problem size increases, it becomes difficult to guarantee optimal Exact solution approach and simulated annealing approach were used to solve the problem. solutions and to reach feasible solutions in reasonable time in the exact solution approach. The feasible solutions obtained in a short time with greedy constructive heuristic algorithms are used in the exact approach as both upper bound and warm-start point, and in the simulated annealing approach as the initial solution. Finally, the effectiveness of the solution approaches is compared via numerical experiments carried out for a variety of problem instances with different configurations and sizes.

Science Code : 90610

Key Words : Workload, working hours, single machine scheduling, additional resource, high multiplicity, exact solution approach, integer programming, greedy constructive heuristic, metaheuristic, simulated annealing

Page Number : 104

Supervisor : Prof. Dr. Ertan GÜNER

TEŞEKKÜR

Ankara’da başladığım ve İstanbul’da tamamladığım, çeşitli nedenlerden dolayı oldukça uzun süren tez çalışmamda bana rehberlik eden danışmanım Prof. Ertan GÜNER’e ilgisi ve desteği için çok teşekkür ederim. Bu süreç içerisinde çalışmalarımı dinleyen, değerlendirme ve katkılarıyla yardımcı olan Prof.Dr. Fulya ALTIPARMAK BAYKOÇ ve Doç.Dr. Mehmet Rüştü TANER’e şükranlarımı sunarım. Doktora serüvenime başlamam ve bitirmem konusunda motivasyonumu sağlayan ve desteğini esirgemeyen değerli büyüğüm Doç.Dr. Mümtaz KARATAŞ’a saygılarımı sunarım. Üzerimde emeği olan isimleri bende saklı tüm öğretmen, amir, mesai arkadaşlarım ve yakınlarıma teşekkür ederim. İstemesem de bazen vaktinden çaldığım biricik oğlum Kutay’dan özür diliyorum. Bu vesile ile evlatlarına daha aydınlık yarınlar ve daha güzel bir ülke bırakmak için mücadele etmiş ve hayatını ortaya koymuş olan kurucu ve kurtarıcı Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK ile tüm silah arkadaşlarını saygı, minnet ve rahmetle anıyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Havacılıkta İş Yüğü ve Yorgunluk Yönetimi	5
2.2. Literatürdeki Benzer Problemlere Genel Bakış.....	19
3. PROBLEM TANIMI	33
4. MATEMATİKSEL MODEL.....	39
4.1. Tek Makine 1 Operatör Modeli.....	39
4.2. Tek Makine n Operatör Modeli.....	44
5. ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI.....	51
5.1. Tam Çözüm Yaklaşımı.....	52
5.1.1. Sıcak başlatma tekniği	52
5.1.2. Alt sınır (LB) belirlenmesi	53
5.2. Açgözlü Kurucu Sezgisel Algoritmalar	54
5.2.1. Açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım-1 (GR1)	55
5.2.2. Açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım-2 (GR2)	57

	Sayfa
5.3. Metasezgisel Yaklaşım: Tavlama Benzetimi	59
6. TEST PROBLEMLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
6.1. Test Problemleri	70
6.2. Sayısal Sonuçlar	73
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	104



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Helikopter uçuş görev tanımları	16
Çizelge 2.2. Hemşire çizelgeleme problemi zamanla ilgili kısıt tipleri	21
Çizelge 2.3. FMCSA hizmet saatleri yönetmeliğinin özeti	25
Çizelge 4.1. Karar değişkeni sayısı	49
Çizelge 5.1. Komşuluk mekanizmaları seçim olasılıkları	66
Çizelge 5.2. Çözüm yaklaşımlarının isimlendirilmesi	68
Çizelge 6.1. Test problemlerinde kullanılan ortak parametreler ve değerleri	71
Çizelge 6.2. Tek makine 1 operatör tam yaklaşım sonuçları	80
Çizelge 6.3. Tek makine 2 operatör tam yaklaşım sonuçları	84
Çizelge 6.4. Tek makine 1 operatör tavlama benzetimi sonuçları	87
Çizelge 6.5. Tek makine 2 operatör tavlama benzetimi sonuçları	88
Çizelge 6.6. Tek makine 3 operatör tam yaklaşım sonuçları	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ek kaynakların sınıflandırılması.....	28
Şekil 2.2. Çizelgeleme problemleri çözüm teknikleri.....	29
Şekil 5.1. Çözüm yaklaşımlarının sınıflandırılması.....	51
Şekil 5.2. <i>GR1</i> yaklaşımı <i>FFD</i> algoritması sözde kodu.....	56
Şekil 5.3. <i>GR2</i> yaklaşımı <i>FFD</i> algoritması sözde kodu.....	57
Şekil 5.4. Tavlama benzetimi (SA) algoritması sözde kodu.....	62
Şekil 5.5. Sola Kaydır ($h = 2$) komşuluk mekanizması.....	64
Şekil 5.6. Sağa Kaydır ($h = 12$) komşuluk mekanizması.....	64
Şekil 5.7. Kaydır Gündüz ($d = 1, h = 4$) komşuluk mekanizması.....	65
Şekil 5.8. Kaydır Gece ($d = 2, h = 16$) komşuluk mekanizması.....	65
Şekil 5.9. Sola Kaydır Son İş ($d = 3, h = 8$) komşuluk mekanizması.....	66
Şekil 6.1. Test problemlerinin isimlendirilmesi.....	70
Şekil 6.2. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>GR1</i> çözümü.....	73
Şekil 6.3. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>GR2</i> çözümü.....	74
Şekil 6.4. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>ES1</i> çözümü.....	75
Şekil 6.5. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>ES2</i> çözümü.....	76
Şekil 6.6. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>WS1</i> çözümü.....	77
Şekil 6.7. <i>tP60-j60-(60-00-00)-o02</i> test problemi <i>WS2</i> çözümü.....	78
Şekil 6.8. <i>tP60-j30-(10-10-10)-o03</i> test problemi <i>GR2</i> çözümü.....	90
Şekil 6.9. <i>tP60-j30-(10-10-10)-o03</i> test problemi <i>ES2</i> çözümü.....	91
Şekil 6.10. <i>tP60-j30-(10-10-10)-o03</i> test problemi <i>WS2</i> çözümü.....	92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Chinook CH-47 helikopteri	35
Resim 3.2. Seahawk SH-70B helikopteri	35
Resim 3.3 AB-212. helikopteri	36
Resim 3.4. Super Cobra AH-1W helikopteri	36



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
K	İş tipi kümesi
J	İş kümesi
J_k	J iş kümesine ait k tipi iş alt kümesi
T	Zaman periyotları kümesi
D	Günler kümesi
T_d	Gün periyotları kümesi
$T_d^{gündüz}$	Gündüz periyotları kümesi
T_d^{gece}	Gece periyotları kümesi
p_j	j işinin işlem süresi
α	Yorgunluk katsayısı
L^{ay}	Aylık en fazla çalışma süresi
$L^{gün}$	Günlük en fazla çalışma süresi
L^{normal}	Normal kategori için günlük en fazla çalışma süresi
L^{gece}	Gece yapılabilecek en fazla toplam iş süresi
N^{gece}	Gece yapılabilecek en fazla iş adedi
$L^{gündüz}$	Gece iş yapılması durumunda gündüz yapılabilecek en fazla toplam iş süresi
$N^{gün}$	Günlük en fazla iş adedi
$N^{gündüz}$	Gece iş yapılması durumunda gündüz yapılabilecek en fazla toplam iş adedi
R^{gece}	Gece işi öncesinde kesintisiz dinlenme süresi
$R^{gece'}$	Gece yapılan son iş sonrasında kesintisiz dinlenme süresi
$R^{ağır}$	Ardışık ağır kategori iş yükü sonrasında kesintisiz dinlenme süresi
β	Ağır kategori iş yapılabilecek ardışık gün sayısı (ardışıklık)
γ	Ağır kategori iş yapılabilecek ardışık gün döngüsünün planlama ufku boyunca azami tekrar sayısı (ardışıklık tekrarı)

Simgeler Açıklamalar

<i>M</i>	Büyük bir sayı
<i>LB</i>	Alt sınır
<i>UB</i>	Üst sınır

Kısaltmalar Açıklamalar

AGARD	Havacılık ve Uzay Araştırma ve Geliştirme Danışma Grubu
EASA	Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı
ES1	Tam Çözüm Yaklaşımı-1
ES2	Tam Çözüm Yaklaşımı-2
EUROCONTROL	Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı
FAA	Federal Havacılık İdaresi
FFD	Azalan İlk Sığan
FFI	Artan İlk Sığan
FMCSA	Federal Motorlu Taşıt Güvenliği İdaresi
FRMS	Yorgunluk Risk Yönetim Sistemi
GR1	Açgözlü Sezgisel Yaklaşım-1
GR2	Açgözlü Sezgisel Yaklaşım-2
ICAO	Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
MCH	Modifiye Cooper-Harper
NATO	Kuzey Atlantik Anlaşması Örgütü
NASA-TLX	ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi-Görev Yüğü İndeksi
OPL	Optimizasyon Programlama Dili
SA1	Tavlama Benzetimi Yaklaşımı-1
SA2	Tavlama Benzetimi Yaklaşımı-2
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
SWAT	Öznel İş Yüğü Değerlendirme Tekniğı
WS1	Sıcak Başlangıç Yaklaşımı-1
WS2	Sıcak Başlangıç Yaklaşımı-2

1. GİRİŞ

Modern anlamda çalışma hayatının başlangıcı olarak kabul edilen Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar çeşitli alanlarda (Sosyal, ekonomik, teknolojik, sağlık vb.) yaşanan gelişmelerin çalışma hayatı üzerinde büyük etkileri olmuştur. Hükümetler, sivil toplum kuruluşları, ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından çalışma koşulları ve sürelerine yönelik düzenlemeler getirilmiştir. Gelecek dönemde yaşanacak gelişmelere göre düzenlemelerin yeniden güncellenmesi kaçınılmazdır. Bu düzenlemelere uyulması kanunî zorunluluktur ve bu düzenlemeler işgücü planlamasını ve üretimi doğrudan etkilemektedir. İşgücü planlamasının daha etkin yapılarak üretim verimliliğinin dolayısıyla kârlılığın artırılması maksadıyla işgücü, malzeme ve zaman gibi kaynakların düzenlemeler dikkate alınarak optimal kullanımı hedeflenir.

Mal veya hizmet üretimi kapsamında yapılan işlerin çalışan personel üzerinde yarattığı iş yükü ve yorgunluk, iş kollarının çeşitliliği ve işlerin özellikleri nedeniyle sektöre göre değişiklik gösterebilir. Hatta aynı iş kolunda kamu ve özel sektörde farklı çalışma ve dinlenme süreleri uygulanabilir. İş yükü ve yorgunluk doğru yönetilmediğinde dikkatsizlik, uykusuzluk vb. sebeplerle oluşabilecek iş kazaları sonucunda ilave maliyetlerin yanı sıra telafisi mümkün olmayan can kayıpları da ortaya çıkabilir. İlk bakışta kaynak kullanımı kısıtlayan bir düzenleme olarak gözüксе de organizasyonların çalışma ve dinlenme sürelerine özen göstermesi itibar ve imajlarına da katkıda bulunur.

İş yüküne göre çalışma ve dinlenme sürelerinin düzenlenmesi kapsamında çizelgeleme tekniklerinden yararlanılabilir. Klasik çizelgeleme problemlerinin çoğunda iş-makine problemi ele alınır, işler makinelerle atanır ve işlerin ihtiyaç duyduğu tek kaynağın makine olduğu varsayılır. Ancak işler, başta operatör olmak üzere kalıp, vinç, robot vb. ek kaynaklara da ihtiyaç duyabilir. Çizelgeleme alanında “Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems” adlı başvuru niteliğindeki kitapta, makine çizelgeleme ve personel çizelgelemeyi birleştiren daha spesifik modellere yönelik çalışmaların yapılmasının gelecekte ilgi çekici bir alan olabileceği belirtilmektedir (Pinedo, 2022: 566). Diğer taraftan personelin sadece işe atandığı ve makinelerin bulunmadığı çizelgeleme problemleri de bulunmaktadır. Makineli veya makinesiz personelle ilişkilendiren tüm problemler “Personel Çizelgeleme Problemleri” çatısı altında incelenebilir.

Personel çizelgeleme probleminde temel olarak, bir amaç fonksiyonunu gerçekleştirmek üzere verilen kısıtlar altında hangi personelin ne zaman hangi işleri yapacağı çizelgelenir. Literatürde öne çıkan çizelgeleme problemleri; hemşire çizelgeleme problemi, şoför çizelgeleme problemi, ekip çizelgeleme problemi olarak sıralanabilir. Tüm bu problemler çalışma ve dinlenme süreleri açısından ortak bazı kısıtlara sahip olsa da kendi iş kollarına yönelik farklı kısıtlar içermektedir. Örneğin; en çok çalışılan problem olan hemşire çizelgeleme probleminde haftalık olarak çalışabilecek azami vardiya sayısına yönelik kısıt bulunurken kamyon şoförü çizelgeleme probleminde vardiya uygulanmadığından vardiyaya yönelik kısıtlar bulunmaz.

Tüm iş kollarına ait kısıtları kapsayan ve çözen tek bir personel çizelgeleme modeli geliştirilmesi mümkün gözükmemektedir. İş kolları, tabi oldukları düzenlemelere göre kendilerine özel modellere sahip olmak durumundadır. Taşıdığı riskler nedeniyle çalışma ve dinlenme sürelerine yönelik sıkı düzenlemelerin bulunduğu, çalışanların iş yüklerinin hassas bir şekilde takip edildiği önemli sektörlerden biri havacılıktır. Havacılık sektöründeki iş yükü temelli düzenlemeler dâhil çok sayıda düzenleme, ulusal ve uluslararası otoriteler (SHGM, ICAO, EUROCONTROL, EASA, FAA vb.) tarafından belirlenmektedir. Bu otoritelerin görevleri arasında sivil ve askerî havacılık koordinasyonunun sağlanmasına yönelik konular da bulunmaktadır. Ancak, askerî havacılıkta kullanılan hava araçlarının özellikleri, uçuş ekipleri ve pilotların aldıkları eğitimler, görev koşulları vb. çok sayıda faktör nedeniyle sivil otoritelerin belirlediklerinden nispeten farklı düzenlemeler bulunabilir. Bahsedilen farklı düzenlemelere göre uçuş planlamaları ve ekip atamalarının yapılması, genel anlamda uçuş harekâtlarının planlanması gerekir.

Kapsamlı ve karmaşık bir süreç olan harekât planlamasında, bütüncül bir bakış açısıyla tüm personel ve lojistik hususlar dikkate alınmalıdır. Keşif, karakol, nakliye, personel ve malzeme transferi, arama kurtarma vb. görevlerin yanı sıra denizaltılara karşı da çok kritik görevler icra edebilen deniz karakol uçakları ve helikopterlerden oluşan deniz hava unsurlarının planlanması da bu sürecin önemli bir parçasıdır. Bu tez kapsamında, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı bağlısı Deniz Hava Komutanlığı bünyesinde görev yapan helikopter pilotlarının iş yüküne bağlı çalışma ve dinlenme düzenlemelerinden esinlenerek kurgulanan bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır.

Tezin amacı; belirli varsayımlar altında özellikle planlama safhasında gemiye konuşlu bir helikoptere verileceği değerlendirilen görev setinin en kısa ne zaman tamamlanabileceğini araştırmaktır. Tek helikopter konuşlu gemide 1 pilot ve uçuş ekibi ile yine tek helikopter konuşlu gemide 2 pilot ve uçuş ekibi bulunacağı varsayılmıştır. Helikopter makine, pilotlar operatör ve görevler iş olarak düşünülmüştür. Helikopter yakıt kapasitesi diğer bir deyişle makine çalışma süresi kısıtı nedeniyle işler yüksek multiplisiteye sahiptir. İşlem süreleri açısından az çeşitte fakat yüksek sayıda iş bulunmaktadır. İşlem süreleri 1, 2 ve 3 saat olarak kabul edilmiştir. İşlem sürelerine yönelik hazır veri setleri bulunmadığından test problemleri rastgele üretilmiştir. Gerçek hayatta uygulanan hazırlık ve bakım süreleri dikkate alınmamıştır. Ayrıca, tüm planlama ufku boyunca makine ve operatörler için çizelge müsait varsayılmıştır.

Tez problemi, bazı personel çizelgeleme problemlerine benzerlikler gösterse de farklı kısıt yapılarıyla birlikte bütün olarak değerlendirildiğinde bildiğimiz ve araştırdığımız kadarıyla özgün bir problemidir. Standart vardiya düzeni ile hafta içi ve hafta sonu ayrımı yoktur. Operatörlere, çalışma ve dinlenme süreleri ihlal edilmeden 7 gün 24 saat içerisinde herhangi bir zamanda iş yaptırılabilir. Çizelge, günlük yapıda gündüz ve gece olarak iki periyoda ayrılmakta, gece yapılan işler için yorgunluk katsayısı uygulanmaktadır. Ayrıca gece yapılan işlerin, gündüz periyoduna hem süre hem de sayı bakımından etkileri bulunmaktadır. Günlük iş yüklerine göre normal ve ağır şeklinde kategorilendirme yapılmaktadır. İş yükü kategorilerine göre ardışık gün çalışma ve dinlenme süreleri uygulanmaktadır. Aylık olarak ağır kategori çalışılabilecek ardışık gün sayısı sınırlıdır. Bununla birlikte aylık, günlük ve gecelik azami çalışma süreleri, gece yapılabilecek azami iş sayısı, gece işi öncesi ve sonrasında kesintisiz dinlenme süreleri bulunmaktadır. Gece işleri, gece işlerinin gündüz periyoduna etkileri ve ağır kategori ardışık gün çalışmayla ilgili kısıtlar probleme özgünlük katmaktadır.

Ek kaynak olarak ele alınan operatörlerin çalışma sürelerine yönelik üst sınır, çizelgenin farklı periyotları için farklı değerlere sahiptir. Aylık azami çalışma süresinin yanı sıra günlük azami çalışma süresi de mevcuttur. Bu ek kaynak yapısı, proje çizelgeleme alanında zaman bazında yapılan çift yönden kısıtlı kaynak sınıflandırması ile uyumludur. Buradan hareketle, tez problemi kaynak kısıtlı makine çizelgeleme problemi olarak da ele alınabilir. Literatürde mevcut buna benzer problemler NP-Zor sınıfında olduğundan tez probleminin de aynı zorluk sınıfında olduğu değerlendirilmektedir.

Problemin çözümünde, tam çözüm yaklaşımı ve metasezgisel yaklaşım kullanılmıştır. Tam çözüm yaklaşımında CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Metasezgisel yaklaşımda ise tavlama benzetimi, probleme uyumlu komşuluk mekanizmaları tanımlanarak uygulanmıştır. Çok kısa sürede uygun çözümler üretebilen açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu açgözlü sezgisel algoritmalarla elde edilen çözümler; tam çözüm yaklaşımında hem üst sınır hem de sıcak başlangıç olarak, tavlama benzetiminde ise başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır.

Her iki konfigürasyon için, ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’, çeşitli büyüklükteki test problemleri kullanılarak çözüm yaklaşımları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm konfigürasyonlar için tam çözüm yaklaşımında; optimal çözüm garanti edilmese de çalıştırma limiti içerisinde problemlerin neredeyse tamamına uygun çözümler üretilebildiği, problem boyutu arttıkça optimal çözümün garanti edilmesinde zorluklar yaşandığı, sıcak başlatma tekniğinin çok belirgin bir iyileşme sağlamadığı ancak çalıştırma limiti içerisinde çözücünün uygun çözüm üretemediği durumlarda en azından çözücüye uygun bir başlangıç çözümü sağladığı görülmüştür. Tavlama benzetimi yaklaşımının bilinen en iyi çözümleri iyileştiremediği ancak duruma göre daha kısa sürede uygun çözümler sağlayabildiği görülmüştür. Operatör sayısı artışının mevcut komşuluk mekanizmalarının etkinliğini ve dolayısıyla tavlama benzetimi performansını düşürdüğü görülmüştür.

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde yer alan literatür araştırmasında havacılıkta iş yükü ve yorgunlukla ilgili çalışmalara değinilmiş, benzerlik ve farklılıklar üzerinden tez probleminin literatürdeki yerine yönelik tespitler sunulmuştur. Literatür araştırmasında kısıt yapılarına ve çözüm yöntemlerine odaklanılmıştır. Üçüncü bölümde, tez probleminin tanımı, amacı, varsayımları ve sınırlıkları sunulmuştur. Dördüncü bölümde, geliştirilen matematiksel model açıklanmıştır. Beşinci bölümde, problemin çözümü maksadıyla kullanılan yaklaşımlar anlatılmıştır. Altıncı bölümde, test problemlerinin sonuçları üzerinden kullanılan yaklaşımların performansı ve etkinliği karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümünde, öncelikle havacılıkta iş yükü ve yorgunluk yönetimiyle, sonrasında personel çizelgeleme problemi alanında tez problemine benzer problemlerle ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Benzer problemler araştırılırken öncelikle kısıt yapıları ve çözüm yaklaşımlarına odaklanılmıştır.

2.1. Havacılıkta İş Yükü ve Yorgunluk Yönetimi

İş kollarının çeşitliliği ve işlerin özellikleri nedeniyle yarattıkları iş yükü ve yorgunluk değişiklik gösterir. Bir maden işçisinin yer altındaki iş yükü ve yorgunluğu ile bir banka görevlisinin iş yükü ve yorgunluğunun aynı olduğu söylenemez. Maden işçisi fiziksel iş yükü ve yorgunluk ile karşılaşırken banka görevlisi ise zihinsel iş yükü ve yorgunluk ile karşılaşır. Her bir iş kolunda, iş gücü ve yorgunluk hesaplamalarının kendine özgü ölçümlerle yapılması beklenir. İşin yapıldığı ortam, işin özellikleri, iş sağlığı ve güvenliği gibi birçok faktör çalışma ve dinlenme saatlerini etkilediğinden farklı meslek gruplarına özel düzenlemeler yapılması gerekebilir. Hükümetler gibi dış düzenleyicilerin yanı sıra organizasyonların yapabileceği ilave düzenlemeler çalışma ve dinlenme sürelerinin daha fazla özelleşmesini ve organizasyona özgü bir hâl almasına yol açabilir. Hatta aynı iş kolunda kamu ve özel sektörde nispeten farklı çalışma ve dinlenme süreleri uygulanması bile söz konusu olabilir.

Tüm iş kollarına ait kısıtları kapsayan ve çözen tek bir personel çizelgeleme modeli geliştirilmesi mümkün gözükmemektedir. İş kolları, tabii oldukları düzenlemelere göre kendilerine özel modellere sahip olmak durumundadır. Bu düzenlemelerin iş yükü esas alınarak yapılması mantıklı ve doğaldır. Ancak iş yükünün ve iş yükü sonucu oluşan yorgunluğun hesaplanması ve modellere yansıtılması düşünüldüğü kadar basit olmayabilir. Kas gücüne dayalı işlerde bedensel yorgunluk üzerinden yapılan iş yükü ve yorgunluk hesaplamaları daha kolayken zihinsel yorgunluğun ön planda olduğu iş kollarında daha zor olabilir. Aslında yorgunluk tiplerinin her bir çalışan üzerindeki etkisi de farklı olabilir. Bireysel farklılıklardan kaynaklanan sebeplerle aynı iş yükü farklı kişiler tarafından farklı biçimde algılanabilir. Ancak, iş kolunu ilgilendiren düzenlemeler, ortalamalar üzerinden belirlenen standart değerlerle tüm çalışanların aynı olduğunu varsayar.

Yoğun şekilde makine ve araç operatörlüğü gerektiren havacılık sektöründe pilotlar, çeşitli sistem ve ekipmanları kontrol etmek, göstergeleri izlemek gibi iş yükünü oluşturan çeşitli görevleri yerine getirirken fiziksel ve zihinsel efor sarf eder. Bunun sonucunda pilotlar, insan fizyolojisinin sınırlılığı nedeniyle yorgunluk yaşamaya başlar.

Doğru şekilde yönetilmeyen iş yükü ve yorgunluğun kazaların yanı sıra genellikle uzun dönemde pilotların sağlığı üzerinde de olumsuz etkileri olabilir. İş yükü ve yorgunluk yönetimi; sosyoloji, davranış bilimi, biyoloji, psikoloji, fizyoloji, ergonomi gibi özellikle sağlık ve tıp ile ilgili çok sayıda alanla ilişkili disiplinler arası yaklaşımla ele alınan çok kapsamlı konulardır. Bu kısımda, iş yükü ve yorgunluk yönetiminin tez problemi ile ilgili olduğu değerlendirilen yönlerine genel bir bakış açısıyla değinilecek ve havacılık alanındaki taraflarına odaklanılacaktır.

Cain (2007) tarafından, konuya olan ilgiye rağmen iş yükü kavramının net ve evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımı bulunmadığı belirtilmektedir. Huey ve Wickens (1993) tarafından, iş yükü teriminin 1970'lerden önce çok yaygın bir şekilde kullanılmadığı ve iş yükü kavramının çeşitli sektörlerdeki operasyonel tanımının kaynaklar, mekanizmalar, sonuçlar ve ölçüm konularında farklılıklar göstermeye devam ettiğine dikkat çekilmiş, iş yükü ve performans arasındaki ilişkinin başlangıçta düşünüldüğünden çok daha karmaşık olduğunun kanıtlandığı belirtilmiştir. Lysaght, Hill, Dick, Plamondon ve Linton (1989) tarafından, işin miktarı ve yapılacak işlerin sayısı, zaman ve zamanın ilgilenilen belirli yönü ve operatörün öznel psikolojik deneyimleri olmak üzere üç geniş kategoride iş yükü kavramı tartışılmıştır.

İş yükü kavramının çeşitli formel tanımları yapılmıştır. Curry, Jex, Levison ve Stassen (1979) tarafından, "İş yükü, operatörün kontrol ve/veya gözetim için harcadığı zihinsel çabanın kapasitesine göre tanımlanır. Bu tanıma göre, iş yükü hiçbir zaman birden büyük değildir; davranış gibi, iş yükü de insan merkezli bir değişkendir." şeklinde tanımlama yapılmıştır.

Gopher ve Donchin (1986) tarafından; "Zihinsel iş yükü, görev performansının performans beklentilerini karşılaması için gerekli olan bilgi işleme sistemi kapasiteleri ile herhangi bir zamanda mevcut olan kapasite arasındaki fark olarak görülebilir." şeklinde açıklamada bulunulmuştur.

Lysaght ve diğerleri (1989) tarafından; iş yükü tanımlarına yönelik yazarlar arasında fikir birliği olmadığı, kavramsal tanımlardan ziyade iş yükünü değerlendirmekle ilgili teknik tanımların daha fazla ortak noktaya sahip olduğu belirtilerek aşağıda sıralanan ilkeler ortaya konmuştur. Bu ilkelerden yola çıkılarak iş yükü kavramının daha net bir şekilde tanımlanabileceği öne sürülmüştür.

- İş yükü görecelidir. Hem dış taleplere hem de bireyin iç yeteneklerine bağlıdır. Bu görecelik hem miktar hem de zaman boyutlarında mevcuttur. Örneğin; bir kişi için zaman içinde değişebilir veya aynı iş yükü farklı kişiler için aynı sonucu doğurmaz.
- İş yükü, kişinin çeşitli şekillerde tepki vermesine neden olur. İş yükü, bireyin iş veya görevler karşısındaki performansı ile aynı şey değildir.
- İş yükü, kişinin iş veya görevler karşısındaki performansı ile aynı şey değildir. İş yükü, işi başarmak için iç kaynakların tüketilmesini içerir. İş yükü arttıkça kaynaklar daha hızlı tükenir.
- Çeşitli görev talepleri ve bu taleplerin üstesinden gelmek için buna karşılık gelen çeşitli iç yetenekler ve kapasiteler vardır. Kişiler, sahip oldukları bu yeteneklerin miktarı bakımından farklılık gösterirler.

Lysaght ve diğerleri (1989) aynı çalışmalarında, iş yükü ve performansın yakından ilişkili olduğunu göstermişler ve asıl ilgi çekici olanın performansın hızlı bir şekilde düşmesinden hemen önceki anın tahmin edilmesi olduğunu belirtmişlerdir.

Benzer şekilde pilot iş yükü kavramının da literatürde çok çeşitli tanımları bulunmaktadır. Cooper ve Harper (1969), pilot iş yükünü belirli bir pilotluk görevini yerine getirmek için gereken bütünleşik fiziksel ve zihinsel çaba olarak tanımlamışlardır.

Tennstedt (1973), pilot iş yükünü uçak içinden veya dışından kaynaklanan etkilere uyum sağlamak maksadıyla algılama, değerlendirme, karar verme ve gerçekleştirilen eylemler gibi süreçlerin toplamı olarak tanımlamıştır. Jenney, Older ve Cameron (1972) tarafından ise belirli bir aktiviteyi veya karmaşık görevleri yerine getirmek için gereken çaba düzeyi şeklinde tanımlanmıştır. Tanımlar çeşitli olsa da, pilot iş yükü kavramının “görevle ilgili” ve “pilotla ilgili” olmak üzere iki ana boyutun olduğu kabul edilmektedir (AGARD, 1978).

Pilot iş yükü, alışlageldiği şekilde fiziksel ve fiziksel olmayan veya zihinsel bileşenler olarak ikiye ayrılabilir. Ancak, bu bileşenler arasında net bir ayırım yapmanın kolay olmadığı belirtilmektedir (AGARD, 1978).

Cooper ve Harper (1969) fiziksel ve zihinsel efor arasında ayırım yapmıştır. Rolfe ve Lindsay (1973) ise iş yükünün fiziksel ve zihinsel yönleri arasında ayırım yapmanın önemini vurgulamıştır.

Rolfe, Chappelow, Evans ve Browning (1974) pilot iş yükünü fiziksel, algısal ve zihinsel olmak üzere üç bileşene ayırmış ve bunların ayırımına yönelik bir simülatör deneyi tanımlamışlardır.

Fiziksel iş yükü

Vücudun metabolizmasını değerlendirmek için kabul görmüş ölçüm tekniklerini kullanarak saf fiziksel iş yükünü değerlendirmek nispeten basit bir konudur. Pilot iş yükünün fiziksel içeriği, kas gücüne dayalı meslekler ile kıyaslandığında, oldukça düşüktür (AGARD, 1978). Billings, Bason ve Gerke (1970) ile Littell ve Joy (1969) tarafından yapılan metabolik çalışmalar kapsamında, helikopter ve hafif sabit kanatlı uçakların uçurulmasıyla ilgili fiziksel aktiviteler hafif iş olarak sınıflandırılmıştır. Blix, Stromme ve Ursin (1974) tarafından helikopter ve büyük nakliye uçakları uçuran pilotlar üzerindeki metabolik etki değerlendirilmiş ve fiziksel iş yükü seviyesinin düşük olduğu raporlanmıştır.

Zihinsel iş yükü

Zihinsel iş yükünün tanımlanması ve çerçevesinin çizilmesi fiziksel iş yüküne göre çok daha fazla karmaşıktır. Cohen ve Silverman (1958) zihinsel çabanın ölçümünün; pilotun çevresel, bütünleştirici ve motor yeteneklerinin yanı sıra duygusal, fizyolojik ve hormonal tepkilerinin değerlendirilmesini içerebileceğini öne sürmüştür.

Firth (1973), bilgi özümseme ve karar verme gibi zihinsel işlevlerin karmaşıklığı ve gizli doğası nedeniyle, zihinsel iş yükünün doğası hakkında bilgi eksikliği olduğuna dikkat çekmiştir.

Zihinsel faaliyetler, özellikle de bilgi işleme ve karar verme üzerine yapılan birçok çalışma, geri bildirim döngüleri ve nörofizyolojik bileşenler tanımlanarak daha karmaşık hâle getirilen modellerin oluşturulmasını içermektedir. Deneysel kanıtlar, insanın bilgiyi işlemek ve karar vermek için yalnızca tek bir kanal kapasitesine sahip olduğu hipotezini desteklemektedir. Bu hipotez, görevin gerektirdiklerinin aşılması hâlinde aşırı yüklenmeye ve bunun sonucunda performansta bozulmaya yol açacak bir maksimum zihinsel işlem kapasitesi fikrine dayanmaktadır (Miller, 1960; Welford, 1967; AGARD, 1978).

İnsanların dikkat ve bilgi işleme kapasitelerinin sınırlı ve farklı kaynaklara dayandığını öne süren Çoklu Kaynak Teorisi (Multiple Resource Theory - MRT) ile ilgili çalışmasında Wickens (2008), göreve dair taleplerin çokluğunun zihinsel performansı olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Zihinsel iş yükü, fazladan harcanan çabanın seviyesine yönelik his ve algılarla da yakından ilişkilidir.

Reid ve Nygren (1988) tarafından zihinsel iş yükü; öznel, psikolojik ve davranışsal (ya da performansa dayalı) olmak üzere 3 kategoriye ayrılmıştır. Öznel zihinsel iş yükünde, bireyin kendinden kaynaklı bilişsel olarak fazladan çaba göstermeye yönelten faaliyetler bulunurken, psikolojik zihinsel iş yükünde ise bazı ruhsal çatışmalardan kaynaklı zihinsel çaba faaliyetlerinin fazlalığından bahsedilmektedir. Çalışanın ailevi sorunlar nedeniyle kendini işine yoğunlaştıramayıp, kendisine verilen işle ilgili görevleri zihinsel açıdan fazla olarak algıladığında psikoloji iş yükü oluşabilir. Davranışsal iş yükünde ise çalışanın iş faaliyetlerinde bizzat yaptığı planlama, belleğe alma, bir problemi analiz etme gibi zihinsel olarak harcanan çabanın fazlalığından bahsedilebilir (Acar ve Çeken, 2022).

Operatörler, aşırı zihinsel iş yükü altında, işlem yaparken gecikme gösterebilir ve bazı durumlarda işlem kapasitelerini aştıkları için gelen taleplere hiç yanıt vermeyebilir. Buna karşın, zihinsel iş yükü uygun seviyenin çok altında ise operatörlerin sıkılma ve hata yapma eğilimi artabilir (Ryu ve Myung, 2005).

Pilotlarda yorgunluk sonucu ortaya çıkabilecek acil durumlara fiziksel iş yükünden daha fazla zihinsel iş yükünün neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, kalp atış hızı ölçümüne dayalı yapılan çalışmada aynı uçakta bulunan kaptan pilotların zihinsel iş yükünü yardımcı pilotlara göre daha fazla yaşadıkları belirtilmektedir (Hart ve Hauser, 1987).

İş yükünün süresi

İş yükü, süreye göre de sınıflandırılabilir. Howitt (1969) tarafından aşağıda belirtilen üç zaman ölçeğine göre sınıflandırma yapılmıştır.

- Anlık iş yükü: Kalkış, alçalma, iniş, askerî uçaklarda bombalama, saldırı aşaması vb. kısa süreli yaşanan iş yükü.
- Görev günü iş yükü: Bir iş günü boyunca yaşanan kısa süreli iş yüklerinin toplamı.
- Uzun süreli iş yükü: Uyku düzeni ve saat dilimi değişiklikleri gibi hususları da içeren belirli bir düzen içerisinde ardışık çalışma günlerinde yaşanan iş yüklerinin kümülatif toplamı.

Howitt (1969) tarafından, anlık iş yüküyle ilgili olarak biyokimyasal ve fizyolojik ölçümlerin kullanılabileceğine yönelik güçlü kanıtlar olduğu, görev günü iş yükünün ölçümü içinse sadece pilotun öznel görüşlerinin bulunduğu ve uzun süreli iş yükünün ölçümü kapsamında uçuş ekibi tarafından doldurulan formlardan yararlanılabileceği belirtilmiştir.

Farklı uzunluklardaki uçuşlarla ilişkili uzun süreli iş yükünün uçak ekibi üzerindeki psikofizyolojik etkilerinin ayrıntılı şekilde incelendiği birçok çalışma vardır. (AGARD, 1978). Marchbanks (1958) tarafından, bir B52 bombardıman uçağıyla icra edilen 22,5 saatlik uzun süreli bir görevin dört kişilik uçak ekibi üzerindeki etkilerine yönelik araştırmanın sonuçları rapor edilmiştir.

Hale, Anderson, Williams ve Tanne (1968) tarafından uzun süreli ve sık yapılan uçuş görevlerin farklı yönleri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Yeni Zelanda'dan Antarktika'ya giden bir C-130E orta sınıf taktik nakliye uçağında 20 saatlik görev süresince uçak ekibine yönelik uçuş stresi değerlendirmesi yapılmıştır. 6 günlük dünya turu görevleri, 7 haftalık okyanus ötesi ve kıtalararası uçuş görevleri icra eden C-135B stratejik nakliye uçaklarının ekiplerine yönelik testler icra edilmiştir. Uçuşlar arasında dinlenme süresi 2 günle sınırlandırıldığında, ekiplerin uçuş stresinden tam olarak kurtulamadığı ve hâlâ dinlenmeye ihtiyaç duydukları raporlanmıştır. Uyku yoksunluğu ve kişinin uçuş ekibi içerisindeki pozisyonunun (pilot, yardımcı pilot vb.) uçuş stresi tepkilerini değiştiren faktörler olduğu gösterilmiştir.

Buna benzer çalışmalarda, uzun süreli iş yükü, yorgunluk, değişken yeme, uyku ve çalışma alışkanlıkları, zaman dilimi değişiklikleri ve biyolojik ritimlerdeki değişiklikler arasındaki önemli ve karmaşık karşılıklı ilişki gösterilmeye çalışılmıştır. Diğer taraftan kısa süreli iş yükünün, uzun süreli iş yükü sonucu ortaya çıkan faktörlerden etkilenmediği belirtilmektedir (AGARD, 1978).

İş yükünün ölçülmesi

Hava taşıtları ve süreç kontrol tesisleri gibi modern sistemler, operatöre genellikle birden fazla eş zamanlı görev talebi yükleyebilir. Bu nedenle, bu tür çoklu görev ortamlarıyla ilişkili iş yükünün ölçülmesi sistem test ve değerlendirmesinde önemli bir konu haline gelmiştir (Lysaght ve diğerleri, 1989).

İş yükünün ölçülmesinin temel nedeninin, operatör ve sistem performansını tahmin etmek için görevleri yerine getirmenin zihinsel maliyetini ölçmek ve artan görev taleplerinin hangi noktada kabul edilemez olacağı konusunda fikir edinmek olduğu belirtilmektedir (AGARD, 1978).

Wickens (1992) tarafından, iyi bir sistem tasarımı önemli olanın sadece performans olmadığı ve sistemin operatöre yüklediği göreve yönelik taleplerin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Dolayısıyla sistem tasarımının iş yükü ölçümüne göre yapılması, kullanıcıların sistemi daha hızlı benimsemesine ve genel performans seviyelerinin artırılmasında olumlu etkiler yapabilir.

Mulder, Mulder, Meijman, Veldman ve Roon (2000) tarafından, zihinsel çalışma sırasında ve sonrasında fizyolojik aktiviteyi ölçmenin ana nedeni, zihinsel görevleri yerine getirmenin yarattığı maliyetleri değerlendirmek ve bu maliyetlerin görevi yerine getiren kişi üzerindeki etkilerinin süresini ölçmek olarak ifade edilmiştir. Çalışmada kalp atım hızı, kan basıncı ve benzeri fizyolojik ölçümlerden bahsedilmektedir.

İş yükü ölçümlerinin nihai hedefinin, iyileştirilmiş çalışma koşulları, kullanımı kolay ve ergonomik iş istasyonu tasarımı ile daha etkili çalışma prosedürleri olduğu kabul edilmektedir (Cain, 2007). Doğru şekilde belirlenmiş iş yükünün, çalışan sağlığı ve iş güvenliğine olumlu katkıları olması beklenir.

Cain (2007) tarafından, iş yükünü ölçmek için yasal nedenler olabileceğine dikkat çekilmektedir. Yeni kullanıcı ara yüzlerinin değerlendirilmesi ve kullanım sertifikası alınması sırasında iş yükü ölçümü yasal bir gereklilik olabilir. Yeni uçak kokpit tasarımlarının sertifikalandırılması gibi süreçlerde yeni tasarımın bazı durumlarda aynı anda pek çok görevi yöneten pilotlara getireceği iş yükünün hesaplanmasında da iş yükü ölçümlerinden faydalanılabilir.

İş yükü ölçülmesi maksadıyla geliştirilmiş çeşitli değerlendirme ölçekleri ve teknikler bulunmaktadır. Hart ve Staveland (1988) tarafından geliştirilen öznel iş yükü değerlendirmesi maksadıyla kullanılan “NASA Task Load Index (NASA-TLX)” olarak isimlendirilen çok boyutlu ölçek bu alanda yapılmış öncül çalışmalardan biridir. Bu çalışmada, iş yükü ile ilgili 10 farklı faktörün (Genel iş yükü, görev zorluğu, zaman baskısı, öz performans, fiziksel efor, zihinsel efor, yorgunluk, stres, yorgunluk ve faaliyet türü) öznel değerlendirmeleri 3 yıl süren 16 farklı deneyden elde edilmiştir. Deneyler arasında basit bilişsel ve manuel kontrol görevleri, karmaşık laboratuvar ve denetleyici kontrol görevleri ve uçak simülasyonu yer aldığı belirtilmektedir. NASA-TLX; zihinsel talepler, fiziksel talepler, geçici talepler, yorgunluk, efor ve performans olmak üzere 6 alt ölçekten oluşmaktadır. Ölçeğin uygulandığı ortamları, değerlendiricilerin gerçekleştirdiği faaliyet türlerini, ortaklaşa ölçülen (veya ölçülmeyen) diğer değişkenleri, metodolojik sorunları ve çıkarılan dersleri özetleyen makalede havacılık alanı haricinde diğer sektörlerde de kullanıldığı belirtilmiştir (Hart, 2006).

Vidulich ve Tsang (1987) tarafından tek boyutlu olarak geliştirilen, ancak sonrasında Reid ve Nygren (1988) tarafından çok boyutlu olacak şekilde güncellenen diğer bir ölçek “Subjective Workload Assessment Technique (SWAT)” olarak isimlendirilen ölçektir. Amacının; uçuş testleri ve operasyonel test ve değerlendirme ortamlarında kullanılmak üzere bir ölçüm aracı geliştirmek olduğu belirtilmektedir. Bu ölçekte zihinsel iş yükü; zaman yükü, zihinsel efor yükü ve psikolojik stres yükü olmak üzere 3 boyutta ele alınmıştır. Ölçekte, Eggemeier (1988) tarafından yapılan çalışmada yer alan 9 ölçütten (hafıza tarama, aralıklı üretim, sürekli hatırlama, dilsel işleme, ekran izleme, dil bilgisel akıl yürütme, matematiksel işleme, kararsız izleme ve uzamsal işleme) oluşan kritik görev seti ve bunlarla ilişkili işleme fonksiyonları (görsel, işitsel, hafıza, muhakeme, motor hareketler vb.) kullanılmaktadır. SWAT ölçeği, hem simülasyon hem de gerçek ortamda uçaklar ve kontrol merkezlerinde çalışan operatörlere uygulanmıştır.

Diğer öne çıkan zihinsel iş yükü ölçeklerinden biri de, ilk önce Cooper ve Harper (1969) tarafından geliştirilen, sonrasında Wierwille ve Casali (1983) tarafından değişiklikler yapılan “Modified Cooper-Harper (MCH)” olarak isimlendirilen ölçektir. İlk çalışmada pilotlara yapılan iş taleplerini ağırlıklı olarak motor beceriler temelinde ele alan ölçek, sonraki çalışmada görevin başarılabilirliği, hatalar, zorluk, performans ve zihinsel iş yükü gibi yeni kavramlar eklenerek güncellenmiş ve modern sistemlerde yaygın olarak kullanılan algısal, bilişsel ve iletişim becerilerinin de ölçülebilmesi amaçlanmıştır.

Bahsedilen belli başlı ölçekler haricinde yaygın olarak kullanılan psikofizyolojik yöntemler; elektroensefalografi, göz hareketleri, kalp atış hızı ve solunum olarak sıralanabilir. Gelecekte ilgili bilim dallarında yaşanacak gelişmeler göre yeni psikofizyolojik ölçüm yöntemlerinin uygulanması muhtemeldir. Çeşitli psikofizyolojik ölçümlerin iş yükünün çeşitli yönleriyle makul derecede iyi korelasyon gösterdiği ve objektif iş yükü ölçümü için umut vaat ettiği konusunda hemfikir olduğu, ancak bu yöntemlerin uygun şekilde sınıflandırılması ve karakterize edilmesinin, böylece etkili şekilde uygulanabilmeleri ve genel bir değerlendirme yöntemi sağlayabilecek bir ölçüm teknikleri paketi halinde bir araya getirilebilmeleri için önemli araştırmalar yapılması gerektiği belirtilmektedir (Cain, 2007).

Bu kısımda bahsedilen iş yükü ölçüm yöntemlerinin hangisinin daha üstün olduğuna yönelik literatürde yer alan çalışma ve tartışmalarda kesin bir sonuca ulaşılmamıştır (Cain, 2007). Psikofizyolojik ölçümlerin belirli bir seviyeye kadar destek sağladığı ancak konunun öznel taraflarının daha belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

Yorgunluk yönetimi

Literatürde yorgunluk kavramıyla, yorgunluk yönetimi ve yorgunluk risk yönetimi kavramlarının birlikte kullanıldığı görülmektedir. Öngörülen ve öngörülemeyen olumsuz etkileri dikkate alındığında yorgunluğun yönetilmesi bir zorunluluk hâline gelmiştir. ICAO tarafından yorgunluk; “uykusuzluk, uzun süre uyanık kalma, sirkadyen (biyolojik saat) ritim bozukluğu ve/veya iş yükünden (zihinsel ve/veya fiziksel) kaynaklanan ve kişinin teyakkuz hâlini ve emniyetle ilgili operasyonel görevleri yerine getirme kabiliyetini bozabilecek zihinsel veya fiziksel performans kabiliyetinin azaldığı fizyolojik bir durum” olarak ifade edilmektedir.

Yorgunluğun en önemli etkileri; görev motivasyonunun azalması, tepki/reaksiyon süresinin azalması, dikkatin azalması, konsantrasyon bozukluğu, daha zayıf psikometrik koordinasyon, hafıza ve bilgi işlemede sorunlar ve zayıf muhakeme olarak sıralanabilir. İş yerlerinde yorgun çalışanlar nedeniyle yıllık olarak 18 milyar dolardan fazla maliyet olduğu tahmin edilmektedir (Sadeghniiat-Haghighi, ve Yazdi, 2015).

ICAO tarafından Yorgunluk Risk Yönetim Sistemi (FRMS); “ilgili personelin yeterli dikkat düzeylerinde performans göstermesini sağlamayı amaçlayan bilimsel ilkelere, bilgiye ve operasyonel deneyime dayalı, yorgunlukla ilgili güvenlik risklerini sürekli olarak izlemenin ve yönetmenin veri odaklı bir aracı” şeklinde tanımlanmaktadır. Havacılık alanındaki otoritelerin konuya yönelik çeşitli mevzuatları bulunmaktadır. ICAO tarafından yayımlanan bazı dokümanlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yorgunluk Yönetimi Yaklaşımlarının Gözetimi için El Kitabı (İng. Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches (Doc 9966))
- Havayolu Operatörleri için Yorgunluk Yönetimi Kılavuzu (İng. Fatigue Management Guide for Airline Operators)
- Uçuş Trafik Hizmet Sağlayıcıları için Yorgunluk Yönetimi Kılavuzu (İng. Fatigue Management Guide for Air Traffic Service Providers)
- Helikopter Operatörleri için Yorgunluk Yönetimi Kılavuzu (İng. Fatigue Management Guide for Helicopter Operators)

Ülkemizde ise SHGM tarafından 2015 yılında yayımlanan “Uçuş ve Görev Süresi Sınırlamaları ile Dinlenme Gereklilikleri Talimatı (SHT-FTL)” kapsamında havayolu işletmelerinin 1 Temmuz 2017 tarihine kadar Aşırı Yorgunluk Risk Yönetim (FRM) düzenlemeleri yapmaları zorunlu hâle getirilmiştir (SHGM, 2016). Ayrıca, 2024 yılında hava trafik kontrolörlerine yönelik “Hava Trafik Kontrolörleri Aşırı Yorgunluk Risk Yönetimi Genelgesi (HSD-2024/1)” yayımlanmıştır.

Benzer şekilde askerî havacılık alanında da konuyla ilgili mevzuatlar bulunmaktadır. Ancak, bunların tümü erişime açık değildir. Tez problemi askerî havacılıktan esinlenmiş ve sadece açık kaynaklarda erişimi mümkün mevzuatlardan yararlanılmıştır. Her ne kadar alınan askerî eğitimler ve uçak tipleri farklı olsa da sivil mevzuattaki sınırlamaların en azından barış döneminde bir çerçeve sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Uçuş ekibine uzun ve kısa mesafeli uçuşlarında yorgunluk yaratan sebepler arasında; gece uçuşları, jet lag, erken uyanmalar, zaman baskısı, çoklu uçuş bacakları ve yeterli dinlenme süresi sağlanamadan art arda gerçekleşen uçuşlar yer almaktadır (Acar ve Çeken, 2022).

Caldwell ve Gilreath (2001) tarafından yapılan bir araştırmada, helikopter pilotlarının %62'sinin yetersiz planlamalardan dolayı gerçekleşen uyku eksikliğinden (günde altı saatten az) şikâyet ettikleri belirtilmektedir. Caldwell (2005) tarafından açıklanan yorgunluğa dayalı sebeplerden öne çıkanlar aşağıda özetlenmiştir:

- Gündüz uçuşlarına göre gece uçuşlarında küçük uyku ataklarının daha yoğun olduğu saptanmıştır.
- Art arda gerçekleştirilen uçuş görevleri, dikkat eksikliği ve uçuş kontrolünün azalması gibi etkileri arttırmaktadır.
- NASA'nın Havacılık Emniyet Raporlama Sistemi verilerine göre yorgunluğa dayalı kazalar en fazla gece yarısı ve sabah 06.00 saatleri arasında gerçekleşmektedir (Lyman ve Orlady, 1981).
- Süreklilik arz eden uzun görev süreleri, uyku eksikliğini ve biyolojik saati olumsuz etkilemektedir.

Yorgunluğun nedenlerini doğru tahmin etmek genellikle kolay olmasa da en temel nedenin uykusuzluk olduğu düşünülmektedir. Mendonca, Keller ve Lu (2019) tarafından yapılan çalışmada değinilen bazı nedenler aşağıda sıralanmıştır. Gece yapılan uçuşlara yönelik tespitler uçuş yapılan gün periyodunun önemine vurgu yapmaktadır.

- Yoğun iş yükü ve uzun çalışma günü
- Erken saatlerde gerçekleşen uçuşlar
- Gece yapılan çalışmaların ardından uçuşa başlama
- Gece uçuşlarından sonra gerçekleşen erken saat uçuşları

İş yükünün yorgunluk üzerindeki etkisine yönelik ICAO tarafından bilimsel bir prensip olarak; “iş yükünün kişinin yorgunluk seviyesine katkıda bulunabileceği, fazla iş yükünün yorgun bir kişinin kapasitesini aşabileceğini, buna karşın az iş yükünün ise fizyolojik olarak uykuya neden olabileceği” kabul edilmektedir.

Helikopterler

Havacılıkta iş yükü ve yorgunluk yönetimiyle ilgili literatürde yer alan çalışmaların büyük bir bölümü sabit kanatlı olarak sınıflandırılan uçaklarla ilgilidir. Diğer taraftan döner kanatlı uçaklar şeklinde sınıflandırılan helikopterlerin iş yükü, sabit kanatlı uçaklardan nispeten farklıdır. Hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı uçaklar için en fazla iş yükünün kalkış ve iniş sırasında olduğu belirtilmekte, ancak gerçekleştirdikleri diğer görevler nedeniyle iş yükü açısından aralarında belirgin farklılıklar bulunmaktadır (Dussault, Jouanin ve Guezennec, 2004; McAtee ve diğerleri, 2017).

Yüksek manevra kabiliyetine sahip helikopterler daha zorlu yerlere inebilir, yüksek hızlarda daha düşük irtifalarda genellikle satha yakın uçabilir. Bu gibi yüksek manevra kabiliyeti gerektiren erişimi kısıtlı bölgelere asker nakliyatı, tıbbi destek vb. görevler muhtemelen pilotun iş yükünü artırmaktadır. Ancak bu durum literatürde henüz sayısal olarak tam anlamıyla belgelenmemiştir (Feltman, Bernhardt ve Kelley, 2019).

Feltman, Bernhardt ve Kelley (2019) tarafından helikopter pilotlarının iş yükünün ölçülmesine yönelik yapılan çalışmada yer alan dört alan ve ilgili uçuş görevleri ile açıklamaları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu çalışmada, 23 erkek helikopter pilotunun performansları, S-70 helikopter ailesine ait UH-60 Black Hawk helikopter simülatöründe ölçülmüştür. Öznel iş yükünün değerlendirilmesi amacıyla NASA-TLX ölçeği kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. Helikopter uçuş görev tanımları

Alan	Görev	Düşük İş Yükü	Yüksek İş Yükü
Görsel	Arazi uçuşu	Gündüz	Gece
Bilişsel	Acil duruma müdahale	Yardımcı pilot desteği var	Yardımcı pilot desteği yok
İşitsel	Telsiz haberleşmesi	Düşük yoğunluklu	Yüksek yoğunluklu
Fiziksel	Güverteye iniş	Tüm otomatik sistemler faal	Manuel ağırlıklı

Helikopterlerin tiplerine, dolayısıyla imkân ve kabiliyetlerine göre yapabilecekleri görevler çok çeşitlidir. S-70 helikopter ailesine ait, ABD Deniz Hava Komutanlığında kullanılan ve fırkateyn, muhrip, amfibi, uçak gemisi gibi platformlara konuşlanabilen MH-60S Seahawk ve MH-60R Seahawk helikopterlerine verilebilecek bazı görevler aşağıda sıralanmıştır (HT-18, 2024).

- Suüstü harbi
- Denizaltı savunma harbi
- Özel harekât desteği
- Komuta, kontrol ve iletişim
- Arama ve kurtarma
- Dikey ikmal
- Muharip olmayanların tahliyesi
- Tıbbi tahliye
- Muhabere rölesi
- Savaş dışı operasyonlar

Türk Deniz Kuvvetleri envanterinde S-70 helikopter ailesine ait 24 adet SH-70B Seahawk helikopteri, 4 adet AB-212 helikopteri ve 8 adet AH-1W helikopteri bulunmaktadır (Dz.K.K.lığı, 2024). Bu helikopterlerin kullanım maksatları farklılık göstermektedir. Eski nesil AB-212 helikopterlerinin silah ve sistemleri demode kaldığından yapabileceği görevler sınırlıdır ve zamanla hizmet dışına alınması beklenmektedir. Genel maksatlı helikopter sınıfına ait SH-70B Seahawk helikopterleri ise envanterdeki en gelişmiş deniz helikopterlerdir ve çok sayıda ülke tarafından kullanılmaktadır. Hem suüstü hedefleri için güdümlü mermi hem de sualtı hedefleri için torpido ile donatılabilir. Mevcut daldırılabilir sonar sistemi ile denizaltı savunma harbi kapsamında suüstü gemileriyle birlikte denizaltıları daha etkin bir şekilde arayabilir. K.K.K.lığından devredilen ve saldırı helikopteri olarak sınıflandırılan AH-1W helikopterleri ise ağırlıklı olarak amfibi harekât kapsamında kullanılan silah ve sistemlere sahiptir.

Teşkilat olarak Deniz Hava Komutanlığı altında Türkiye'nin farklı yerlerinde helikopter filolarına bağlı olarak görev yapan bu helikopterler, harekât ihtiyacına göre ekipleriyle birlikte gemilere gönderilmektedir. Görev süresi boyunca ilgili gemilerde bulunmaktadır.

Helikopterlere verilebilecek örnek görev setleri incelendiğinde helikopter pilotu ve ekibinin standart bir yolcu uçağı pilotu ve ekibinin karşılaşacağından çok farklı iş yüküne sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla helikopterlere özgü iş yükü ölçümü ve yorgunluk yönetimi sivildeki muadillerinden farklılık arz edebilir. En önemli farklılıklardan birisi askerî helikopterlerin vardiyadan bağımsız şekilde günün her saati göreve hazır olmasıdır.

Havacılıkta iş yükü ve yorgunluk yönetimi ile askerî helikopterlere ait özet literatür araştırması ve bazı bilgilerin sunulduğu bu kısımda, iş yükü hesaplamalarına yönelik ölçeklerden bahsedilmiş, yorgunluk yönetimi ile ilgili temel kavramlara değinilmiş ve helikopterler özelinde farklılaşan konulara vurgu yapılmıştır.

İş yükü ölçümlerinin öznel ve algısal bir tarafı bulunmaktadır. Ayrıca, her insanın temel fizyolojik farklılıkları da devreye girdiğinde ölçüm daha karmaşık hâle gelebilmektedir. Bir kişi farklı günlerde aynı iş yüküne maruz kalsa da bu durumu farklı algılayabilir. Dolayısıyla, kısa vadede kişilere özel hesaplanan iş yüküne göre görevler verilse de barındırdığı değişkenlik nedeniyle uzun vadeli planlamalar için bu hesaplamaların kullanılması pratik olmayabilir. Özellikle uzun vadeli planlamalar için indirgemeci bir yaklaşımla iş yükü ölçümlerini belirli bir skaler katsayıya indirmek uygun olabilir.

Diğer taraftan gece periyodunda yapılan işler ve art arda uzun dönem yapılan işlerin yorgunluk yönetimi kapsamında özel olarak ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Günlük iş yükünün birikerek oluşturduğu kümülatif yorgunlukla birlikte uzun dönemde oluşan iş yükünün ölçülmesi ve yorgunluğun bu çerçevede yönetilmesi yaşanabilecek olumsuzlukların önüne geçilmesi maksadıyla mevzuatın getirdiği bir zorunluluktur. Gece periyodunda yapılan işler içinse hem öncesinde hem de sonrasında yorgunluğun yönetilmesi ve makul dinlenme sürelerinin sağlanması gerekmektedir.

Havacılık sektörüne benzer şekilde, sağlık, ulaşım, taşımacılık gibi sektörlerde de iş yükü ölçümü ve yorgunluk yönetimiyle ilgili genel çerçevesi kanun koyucular ve otoriteler tarafından belirlenmiş düzenlemeler bulunmaktadır. Bu konulara yönelik havacılıkla ilgili özet literatür bilgisi verildiğinden sonraki kısımlara konu olan problemlerin yaşandığı sektörlerle yönelik iş yükü ve yorgunluk yönetimi konularına değinilmeyecektir. Ancak, ilgili problemlerin tez problemine benzerlik gösteren kısımları kısıt yapıları ve çözüm yöntemleri bakımından ele alınacaktır.

2.2. Literatürdeki Benzer Problemlere Genel Bakış

Bu kısımda, tez problemine benzer literatürde yer alan problemler kısıt yapıları ve çözüm yöntemleri bakımından ele alınacaktır. Kısımın sonunda tez probleminin benzer diğer problemlerden farklılıkları ortaya konulacaktır.

Çoğu sektörde giderlerin büyük bir kısmını personel maliyetleri oluşturduğundan personel çizelgeleme problemi çalışılmaya değer bir alan olarak güncelliğini korumaktadır. 1950’lerde Dantzig tarafından ortaya atılan personel çizelgeleme veya diğer bir adlandırmayla kadrolama problemi (İng. Nostering Problem) zaman içinde özellikle çalışma hayatına yönelik düzenlemelerin etkisiyle evrimleşmiştir (Dantzig, 1954; Bergh, Belien, Bruecker, Demeulemeester ve Boeck, 2013). İş kolları ve mesleklerin çeşitliliği göz önüne alındığında personel çizelgeleme problemi çok çeşitlidir ve farklı yöntemlere göre sınıflandırılmaktadır. İlk sınıflandırma yöntemlerinden birini öneren Baker (1976) tarafından personel çizelgeleme problemleri üç ana gruba ayrılmıştır: vardiya çizelgeleme problemi, izin günleri çizelgeleme problemi ve bu iki grubu birleştiren tur çizelgeleme problemi.

Personel ihtiyaçlarının ve isteklerinin karşılanmasının öneminin görece arttığının belirtildiği Bergh ve diğerleri (2013) tarafından yapılan geniş literatür taramasında, personel çizelgeleme problemi aşağıda sunulan 4 sınıflandırma alanında incelenmiş ve uygulama alanı 6 gruba ayrılmıştır. Askerî personel çizelgeleme, genel ve diğer sektörlerden ayrı olarak gruplandırılmıştır.

- Personel özellikleri, karar tanımları ve vardiya tanımları
- Kısıtlar, performans ölçütleri ve esneklik
- Çözüm yöntemi ve belirsizliğin dâhil edilmesi
- Uygulama alanı ve araştırmanın uygulanabilirliği
- Hizmet sektörü
- Ulaşım sektörü
- Üretim sektörü
- Genel
- Perakende sektörü
- Askerî personel çizelgeleme

Özder, Özcan ve Eren (2020) yaptıkları sistematik literatür taramasında, personel çizelgeleme problemini karakteristiklerine göre aşağıda sunulduğu şekilde sınıflandırmaktadır:

- İzin günleri çizelgeleme problemi
- Vardiya çizelgeleme problemi
- Döngüsel personel çizelgeleme problemi
- Mürettebat çizelgeleme problemi
- Operatör çizelgeleme problemi

Hemşire çizelgeleme problemi

Personel çizelgeleme literatüründe ilk sırayı “hemşire çizelgeleme problemi (İng. Nurse Rostering Problem - NRP)” alır ve en popüler problemidir (Bergh ve diğerleri, 2013; Özder ve diğerleri, 2020). Problemin temel amacı; çalışma düzenlemeleri, hastane kuralları ve mümkün olduğunca personelin istekleri göz önüne alınarak hemşirelere dengeli iş yükü oluşturan en uygun vardiya atamasının yapılmasını sağlamaktır. Burke, De Causmaecker, Berghe ve and Van Landeghem (2004) hemşire çizelgeleme problemiyle ilgili makaleleri çözüm yöntemleri ve kısıtlar açısından çok ayrıntılı şekilde incelemiştir. Kısıtlara yönelik kullandıkları terminoloji aşağıda özetlenmiştir.

- Kapsama kısıtları: Tüm planlama dönemi boyunca her vardiya veya zaman aralığı için ihtiyaç duyulan uzmanlık alanındaki personel sayısının belirlenmesinde kullanılır. Personel gereksinimleri olarak da adlandırılabilir. Hastanelerde kapsama kısıtlarının bir tür iş yükü ölçüm sistemi (Örneğin; hasta sınıflandırma sistemi), hemşire-hasta oranları veya bir tahmin yöntemiyle belirlenmesi çok yaygındır.
- Zamanla ilgili kısıtlar: Personel arasındaki iş yükünün dengelenmesine ilişkin tüm kişisel istekler, kişisel tercihler ve kısıtlamalar bu kategoriye aittir.
- Zorunlu (Sıkı) kısıtlar: Mutlaka sağlanması gereken zorunlu kısıtlardır.
- Esnek (Gevşek) kısıtlar: Arzu edilen ancak uygulanabilir çözüm üretmek için ihlal edilebilen kısıtlardır.
- Çalışma düzenlemeleri: Personelin hastane ile yaptığı sözleşme kapsamındaki zamanla ilgili kısıtlamalar içeren düzenlemelerdir.

Çalışma düzenlemeleri, zamanla ilgili kısıtlar içerir. Kapsama ve zamanla ilgili kısıtlar, probleme özgü zorunlu veya esnek kısıtlar şeklinde tanımlanabilir.

Burke ve diğerleri (2004) zamanla ilgili kısıtları Çizelge 2.2’de sunulduğu şekilde sınıflandırmıştır. Zamanla ilgili kısıtların büyük çoğunluğu yasa, yönetmelik ve sendika anlaşmaları tarafından belirlenmekle birlikte hastane yönetimleri yasal sınırlar içerisinde ilave düzenlemeler yapabilir. Bu durum zamanla ilgili çok fazla sayıda birbirinden farklı kısıt yapısı ortaya çıkarabilir ve problem çeşitliliğinin artmasına neden olur.

Çizelge 2.2. Hemşire çizelgeleme problemi zamanla ilgili kısıt tipleri

Kısıt Tipleri	Kısıtlar
Kapasite	- Azami görevlendirme sayısı - Fazla mesai - Vardiya tipine özel azami görevlendirme sayısı - Haftalık azami görevlendirme sayısı
Kişisel tercihler	- Çalışılmayan (boş) gün - Çalışılmayan (boş) vardiya - Çalışılan günler - Çalışılan vardiyalar - Vardiya paterni - Vardiya sıralaması
Ardışıklık	- Ardışık çalışılan azami gün sayısı - Ardışık çalışılan asgari gün sayısı - Ardışık çalışılmayan (boş) azami gün sayısı - Ardışık çalışılmayan (boş) asgari gün sayısı - Paternler - Gece vardiyasından sonra çalışılmayan (boş) gün sayısı - Çalışılmayan (boş) gün öncesi gece vardiyası tutmama - Görevlendirmeler arası zaman - Ardışık vardiyalar - Vardiya tiplerinin sıralaması - Haftalık gündüz-gece vardiyaları
İş yükü dengeleme	Denge
Hafta sonları	- Belirli bir hafta içerisinde hafta sonu çalışma - Tüm hafta sonu ve uzatılmış hafta sonu çalışma - Hafta sonu çalışmanın telafisi - Ardışık çalışılan hafta sonu sayısı
Diğer	- Gün/gece tercihi - Çalışma geçmişi - Ardışık günlerde vardiya değişiklikleri - Ardışık günlerde çalışma/çalışmama - Birlikte çalışan veya çalışmayan kişiler

Hemşire çizelgeleme probleminde muhtemel planlama periyodu sabit ve yarı sabit olmak üzere değişiklik gösterebilir. 4 günlük, 1 haftalık, 2 haftalık, 3 haftalık, 2-4 haftalık, 2-6 haftalık, 1 aylık, 1 yıllık ve kullanıcı tanımlı planlama periyotları bulunmaktadır. Daha uzun planlama periyoduna sahip hemşire çizelgeleme problemleri daha karmaşık yapıya sahipken daha kısa planlama dönemine sahip olanların çözümü daha kolaydır (Burke ve diğerler, 2004).

Hemşire çizelgeleme probleminde, vardiya tipleri farklılık gösterebilir ve genellikle birbiriyle çakışmayan 3'lü vardiya düzeni (Örneğin; erken: 07.00-15.00, geç: 15.00-22.00 ve gece: 22.00-07.00) dikkate alınır. Ancak, birbiriyle çakışan vardiya düzeni (Örneğin; erken: 07.00-16.00, gündüz: 08.00-17.00, geç: 14.00-23.00) uygulanan hastanelerde bulunmaktadır. Bunların dışında, personel tarafından belirlenen sayıları, başlangıç ve bitiş zamanları sabit vardiyaların yanı sıra değişken vardiyalar da uygulanabilmektedir (Burke ve diğerler, 2004).

Genellikle sözleşmelerle çerçevesi belirlenen çalışma düzenlemeleri kapsamında duruma özel çok farklı tipte zamanla ilgili kısıt bulunabilir. Tüm planlama periyodu ve içinde yer alan daha kısa periyotlara ilişkin bu kısıtlar genellikle zorunlu kısıtlar olup azami çalışma süresi ve görevlendirme sayısı şeklindedir. Örneğin bir hemşire; tam zamanlı sözleşmede haftalık azami 38 saat, aylık en fazla 6 defa gece vardiya tipi ve en fazla 2 hafta sonu görevlendirilirken, yarı zamanlı sözleşmede haftalık azami 20 saat ve aylık en fazla 10 defa görevlendirilebilir (Burke ve diğerler, 2004).

Acil servislerde doktor planlaması ile ilgili Gendreau ve diğerlerinin (2007) yaptıkları çalışmada çok sayıda kısıt sınıflandırılmış ve örneklendirilmiştir. İş yükü kısıtları altında; haftada 28 saat çalışması gereken bir doktorun 32 saate kadar çalışmayı kabul edebileceği ve herhangi bir haftada bir doktora en fazla dört vardiya atanabileceği örnek olarak verilmiştir. Ayrıca hiçbir doktorun dört haftalık bir süre içinde üçten fazla gece vardiyasında çalışmamasına yönelik kısıtın uygulandığı hastaneden bahsedilmiştir. Çalışmada incelenen hastanelerde ardışık gece vardiya sayısının 1 ile 3 arasında değiştiği belirtilmiştir. Bir hastanede ardışık günlerdeki aynı vardiya sayısının en az 1 en fazla 4 olacak şekilde ve üç gece vardiyasından sonra en az üç gün izin olacak şekilde uygulamalar yapıldığı belirtilmektedir. Hastanelere özgü buna benzer uygulamalar kısıtların yapısını da etkilemektedir.

Legrain, Bouarab ve Lahrichi (2015) tarafından yapılan çalışmada, yerel aramaya dayalı sezgisel algoritmalar kullanılmış ve CPLEX çözücüyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, çalışma kurallarıyla ilgili kısıtlar altında ardışık olarak çalışılabilecek çalışma gününün genelde 5 gün ile sınırlı olduğu ve iki vardiya arasındaki dinlenme süresinin en az 16 saat olarak uygulandığı belirtilmiştir. Vardiyalar; 8 saatlik gündüz, gece ve akşam olacak şekilde uygulanmıştır.

Turhan ve Bilgen (2020) tarafından yapılan çalışmada, hemşire ile hastane yönetimi arasında yapılan sözleşmelerin kısmen yasa ve yönetmeliklerle tanımlandığı, vardiyadan sonra zorunlu asgari dinlenme süresi olduğundan gece vardiyasından hemen sonra gündüz vardiya ataması yapılamayacağı belirtilmektedir. Ayrıca, hemşirelerin izin kullanmadan çalışabilecekleri azami gün sayısı ve asgari izin sürelerinin yasalar tarafından tanımlandığı, genel olarak, art arda beş gün çalışma ve en az iki gün izin şeklinde uygulandığı ifade edilmektedir. Sözleşmelerin aynı zamanda hemşirelerin bir planlama dönemi içindeki azami ve asgari çalışma saatlerini de belirlediği ifade edilmektedir. Toplam çalışma saatlerinin vardiyaların süresi üzerinden hesaplandığı anlaşılmaktadır.

Böðvarsdóttir, Bagger, Høffner ve Stidsen (2022) tarafından yapılan çalışmada, hemşire ile hastane yönetimi arasında yapılan sözleşmede yer alan en fazla çalışma süresi haftalık hedeflere bölünmüştür. Ardışık iş günü kısıtı için en az ve en fazla limitler, bazı vardiya tipleri için sıkı üst sınırlar belirlenmiştir. Örneğin; ardışık 5 iş günü vardiya ataması yapılması istense bile ardışık 3 gün gece vardiya atanması istenmeyebilir. Avrupa Birliği Çalışma Direktifi kapsamında çalışanlara 24 saat içerisinde en az 11 saat kesintisiz dinlenme süresi verilmesi gerektiği, ancak Danimarka yasalarına göre bu sürenin 8 saate kadar indirilebileceği ifade edilmektedir. Buna benzer şekilde her yedi gün içerisinde kesintisiz dinlenme sürelerine yönelik Danimarka'ya özgü kurallar dikkate alınmıştır.

Hemşire çizelgeleme problemlerine yönelik yapılan özet literatür taramasında, atamaların vardiya bazlı yapıldığı ve dinlenme sürelerinin genelde izin günü şeklinde uygulandığı görülmektedir. İş yükü hesaplamalarının ardışık olarak çalışılan günler üzerinden yapıldığı ve buna göre izin günü verildiği söylenebilir. Gece vardiyaları özel olarak ele alınmakta ve buna yönelik kısıtlar bulunmaktadır. Belki de en önemli konulardan biri, çalışma düzenlemelerinin ülkeler ve hastaneler arasında farklılık göstermesidir.

Sürücü/şoför çizelgeleme problemi

Sürücü çizelgeleme problemi (İng. Driver Scheduling Problem - DSP), personel çizelgeleme alanındaki diğer bir geniş araştırma alanıdır. Sürücü çizelgeleme problemi, yolcuların veya malların taşınması için araçların (Örneğin; otobüsler, trenler, tekneler veya uçaklar) sürücüleri veya pilotları için bir dizi görevin seçilmesinden oluşur (Portugal, Lourenço ve Paixão, 2009). Sürücü çizelgeleme problemi, otobüs şoförü çizelgeleme problemi (İng. Bus Driver Scheduling Problem - BDSP), kamyon şoförü çizelgeleme problemi (İng. Truck Driver Scheduling Problem - TDSP) gibi alt kategorilere de ayrılabilir.

Karayolu yük taşımacılığında sürücü planlaması, havayolları, demiryolları, toplu taşıma ve otobüsler ile yapılan taşımacılıktan farklıdır (Goel, Archetti ve Savelsbergh, 2012). Uçak, tren, metro, otobüs vb. araçların kullanıldığı taşımacılıkta düzenli vardiyalarda çalışanlar tarafından gerçekleştirilecek tüm görevler, varış zamanlarının sabit olduğu belirli bir zaman çizelgesine göre belirlenir. Ancak, karayolu yük taşımacılığında düzenli bir vardiya sistemi yoktur ve varış saatleri genel olarak sabit değildir, hatta bir dereceye kadar serbestlikle planlanabilir (Ernst, Jiang, Krishnamoorthy ve Sier, 2004). Araç rotalama problemi (İng. Vehicle Routing Problem - VRP) ve kamyon şoförü çizelgeleme problemini birleştiren çalışmalar da bulunmaktadır (Goel, 2009; Meyer, Kopfer, Schutten, 2010). Araçlar rotalanırken şoförlerin çalışma kuralları da dikkate alınır ve kısıt olarak modele dâhil edilir.

Kamyon şoförü çizelgeleme probleminde sürüş süreleri, molalar ve dinlenme süreleri yönetmeliklere göre planlanmalıdır. Bu yönetmelikler ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilir. Literatürde yaygın olarak Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği ilgili yönetmeliklere göre çalışmalar yapılmış ve bu problemlere özel isimlendirmeler kullanılmıştır. Örneğin; Goel ve Kok (2012) tarafından Amerika Birleşik Devletleri yönetmeliklerine göre yapılan problemin ismi US-TDSP, Goel (2009, 2010) tarafından Avrupa Birliği yönetmeliklerine göre yapılan problemin ismi ise EU-TDSP olarak literatürde yer almaktadır. Bir kamyon sürücüsü ardışık iki günlük dinlenme arasında ABD’de 11 saatten, Avrupa’da ise 9 saatten fazla araç kullanamaz. Buna ek olarak, aynı ülkedeki üst düzenleyici kurumlarınkini ihlal etmeyen şirkete özgü farklı kurallar da uygulamaya konulabilir.

ABD’de her yıl kamyon ve otobüs kazaları nedeniyle yaklaşık 4000 ölüm meydana geldiği ve bunların %20 kadarının yorgun sürücülerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016). Bowden ve Ragsdale (2018) tarafından yapılan çalışmada, bu konuya dikkat çekilmekte ve ancak hâlihazırda kamyon şoförü çizelgeleme problemine yorgunluk ölçüsünü dâhil eden bir model olmadığı vurgulanmaktadır. Bu eksikliği gidermek için kabul edilebilir bir uyanıklık seviyesini korurken aynı zamanda zaman pencereleri ve çalışma saatleri düzenlemelerini dikkate alan en uygun programı belirlemek için yorgunluğa duyarlı bir model sunmuşlardır. Çalışmada bahsedilen, ABD Ulaştırma Bakanlığı bağlı bir kuruluş olan FMCSA tarafından sürücülerin çalışma saatlerine yönelik uygulanan özet düzenlemeler Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. FMCSA hizmet saatleri yönetmeliğinin özeti

Mal taşıyan sürücüler	Yolcu taşıyan sürücüler
<i>11 saat sürüş limiti.</i> 10 saat kesintisiz dinlenmeden sonra en fazla 11 saat araç kullanabilir.	<i>10 saat sürüş limiti.</i> 8 saat kesintisiz dinlenmeden sonra en fazla 10 saat araç kullanabilir.
<i>14 saat sürüş penceresi limiti.</i> 10 saat kesintisiz dinlenmeden sonra 14 saatlik pencere dışında çalışamaz. Görev dışı süre, 14 saatlik çalışma süresini uzatmaz.	<i>15 saat sürüş penceresi limiti.</i> 8 saat kesintisiz dinlenmeden sonra 15 saatlik pencere dışında çalışamaz. Görev dışı süre, 15 saatlik çalışma süresini uzatmaz.
<i>30 dakika sürüş molası.</i> 8 saat kesintisiz sürüşten sonra en az 30 dakika mola vermelidir.	
<i>60/70 saat haftalık limiti:</i> 7/8 ardışık günde 60/70 saatten fazla çalışamaz. Art arda 34 veya daha fazla saat görevden ayrılırsa bu süre yeniden başlatılabilir.	<i>60/70 saat haftalık limiti.</i> 7/8 ardışık günde 60/70 saatten fazla çalışamaz.
<i>10 saatlik dinlenme süresi.</i> Zorunlu 10 saatlik dinlenme süresi, biri uyku kabininde en az 7 saat kesintisiz, diğeri uyku kabini veya dışında en az 2 saat sürecek ve toplamı en az 10 saat olacak şekilde bölünebilir. Birlikte kullanıldığında, her iki süre de en fazla 14 saat sürüş penceresine dâhil edilmez.	<i>8 saatlik dinlenme süresi.</i> Uyku kabini kullanan sürücüler, kabinde en az 8 saat dinlenmelidir. 2 saatten az olmamak kaydıyla dinlenme süresi ikiye bölünebilir. Bunların toplamı en az 8 saat olmalıdır.
<i>Olumsuz sürüş koşulları.</i> 11 saatlik en fazla sürüş limiti ve 14 saat sürüş penceresi 2 saate kadar uzatılabilir.	<i>Olumsuz sürüş koşulları.</i> 10 saatlik en fazla sürüş limiti ve 15 saat sürüş penceresi 2 saate kadar uzatılabilir.

ABD'dekine benzer şekilde Avrupa Birliğinin de düzenlemeleri mevcuttur. Ayrıca, Avrupa Birliği'nde gece çalışması yapılması halinde günlük çalışma miktarı sınırlandırmaktadır. Gece mesaisinin kesin tanımı ve ilgili günlük çalışma süresi sınırı Avrupa Birliği'nin ilgili direktifini uygulayan ülkelerin ulusal yasalarında yer almaktadır (Goudswaard ve diğerleri, 2006).  ye  lkelerinin çoğunda, saat 20.00 ile gece yarısı arasında başlayan ve saat 04.00 ile 07.00 arasında biten dört veya yedi saatlik gece süresi tanımları vardır. Saat 20.00'den 07.00'ye kadar olan bir gece periyodu tanımı farklı tanımların tümünü kapsamaktadır. AB'nin tüm  ye ülkelerinde, gece periyodunda çalışan sürücüler için geçerli olan günlük çalışma süresi sınırı, bir gün boyunca yasal olarak yapılabilecek çalışma miktarından önemli ölçüde daha azdır Bu nedenle, çalışmalarda sürücülerin her gece dinlendikleri ve gece periyodunda çalışma yapmadıkları varsayılabilir (Tilk ve Goel, 2020). Bununla birlikte, karayolu yük taşımacılığı optimizasyonunun hukuki yönünü incelediği ve ilgili düzenlemeleri gözden geçirdiği çalışmasında Goel (2018), Avrupa Birliği'nde kamyon sürücülerine yönelik araç rotalama konusundaki tüm yaklaşımlarda ilgili direktifin gece periyodu kapsamındaki çalışma hükümlerinin ihmal edildiğini raporlanmıştır.

Sürücü/şoför çizelgeleme problemi kapsamında kamyon şoförü çizelgeleme problemlerinde, tam anlamıyla bir vardiya uygulaması olmadığı ve gece çalışma saatlerine yönelik sadece gündüz çalışma süresini etkileyen çok genel düzenlemeler bulunduğu, iş yükünün zaman pencereleri ve ardışık gün çalışma limitlerine göre ayarlandığı söylenebilir. Uzun yol otobüs şoförleri için de benzer çıkarım yapılabilir. Diğer taraftan, şehir içi otobüs şoför çizelgeleme probleminde, başlangıç ve bitiş zamanları çoğunlukla belirli ve sabit seferlere düzenli vardiya uygulamasına benzer şekilde çalışma ve dinlenme kuralları dikkate alınarak şoför ataması yapılmaktadır.

Ekip  izelgeleme problemi

Ekip  izelgeleme problemi, personel çizelgeleme alanındaki farklı özelliklere sahip diğer bir problem türüdür. Ekip  izelgeleme problemi ve sürücü çizelgeleme problemi birbiriyle yakından ilişkili problemlerdir. Ekip  izelgeleme problemi, sürücü çizelgeleme probleminde olduğu gibi otobüs ve demiryolu taşımacılığı, kamyon ve demiryolu yük taşımacılığı ve y k ve yolcu hava taşımacılığı gibi ulaşım sektörüyle ilgili alanlarda ortaya çıkmaktadır.

Ekip çizelgeleme problemi, özellikle havayolu endüstrisindeki taşımacılık sektöründe önemlidir ve hem endüstriden hem de akademik topluluktan en fazla ilgiyi bu alanda görmüştür (Özder, Özcan ve Eren, 2020; Barnhart, Cohn, Johnson, Klabjan, Nemhauser ve Vance, 2003).

Havayolu endüstrisi özelinde bu problem, ‘havayolu ekip çizelgeleme problemi’ olarak isimlendirilmektedir. Ekonomik büyüklüğü ve etkisi göz önüne alındığında, ekip çizelgeleme uygulamalarının tasarruf sağlamak maksadıyla kullanımı yaygındır. Hükümet, alandaki diğer otorite kurumlar (ABD’de FAA, AB’de EASA, Türkiye’de SHGM), işçi örgütleri ve havayolları şirketlerinin kendileri tarafından zorunlu kılınan çok sayıda kısıtlayıcı kural, ekip çizelgeleme problemini çözülmesi zor hâle getirmektedir.

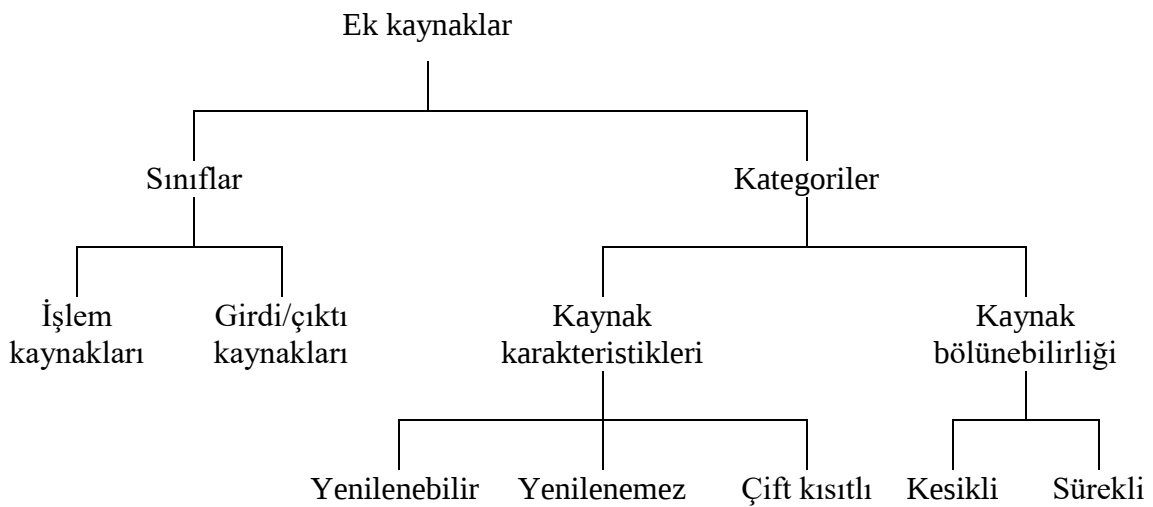
Havayolu ekip çizelgeleme problemi, tüm uçuşlar için ihtiyaç duyulan mürettebatın karşılanmasını sağlayacak şekilde uçuş ekibinin (kokpit ve kabin) tarifeli uçuşlara atanması olarak tanımlanabilir. Havayolu ekip çizelgeleme problemini tek bir bütünleşik problem olarak çözmenin zorluğu nedeniyle, iki alt probleme ayrılmıştır: Ekip eşleştirme problemi (İng. Crew Pairing Problem - CPP) ve ekip atama problemi (İng. Crew Rosterin Problem - CRP).

Ekip eşleştirme problemi, programdaki her bir uçuş ayağının ihtiyaçlarını karşılayacak minimum maliyetli mürettebat eşleştirmesini belirlemeye çalışır. Tüm uçuş bacaklarını kapsayan ve toplam maliyetleri en aza indiren eşleştirmelerin etkinliği daha fazladır. Ekip eşleştirmeleri FAA güvenlik düzenlemeleri, şirket toplu sözleşme kuralları ve sendikalar tarafından tanımlanan kurallarla kısıtlanmaktadır. Bu kısıtlar altında, havayolu şirketleri en düşük maliyetli ve mümkün olan en uygun eşleştirmeleri belirlemek isterler (Deveci ve Demirel, 2018).

Ekip eşleştirme süreci tamamlandıktan, her bir ekip üyesinin uçuş planında yer alan bacaklara atanmasıyla ekip atama aşamasına geçilir. Çalışma ve dinlenme süreleri, uçuş süresi ve iniş sayısı, ekiplerin belirli bir üsse dönmesi gerekliliği ve bu üste belirli sürelerde bulunma zorunluluğu, uçuşlar arasındaki bağlantı süreleri gibi çok sayıda kısıt dikkate alınır. Ekip eşlemede maliyetlerin en aza indirilmeye çalışılırken, ekip atamada ise ekip üyelerinden yararlanma oranını en fazla olacak şekilde çizelge yapılır (Barnhart ve diğerleri, 2003).

Personel çizelgeleme problemi ve diğer iş kolları ile ilgili çalışma sürelerine yönelik kısıtlamaların bulunduğu örnekler problemleri çoğaltmak mümkündür. Bu kısıtlar genellikle farklı kurum ve kuruluşlar arasında, hatta ülkeler arasında önemli farklılıklar gösterir ve bu farklılıklar çizelgeleme problemlerinin ve modellerinin büyük çeşitlilik göstermesine neden olur (Ernst ve diğerleri, 2004). Ancak, bu kısıtların karmaşıklık üzerindeki etkilerine yönelik çalışmaların sayısı oldukça azdır. (Bergh ve diğerleri, 2013; Özder ve diğerleri, 2020). Brucker ve diğerleri (2011), teorik alt yapısı sağlam geleneksel çizelgeleme problemlerinden farklı olarak personel çizelgeleme problemleri alanında modeller ve karmaşıklık açısından teorik çalışmalara daha fazla ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

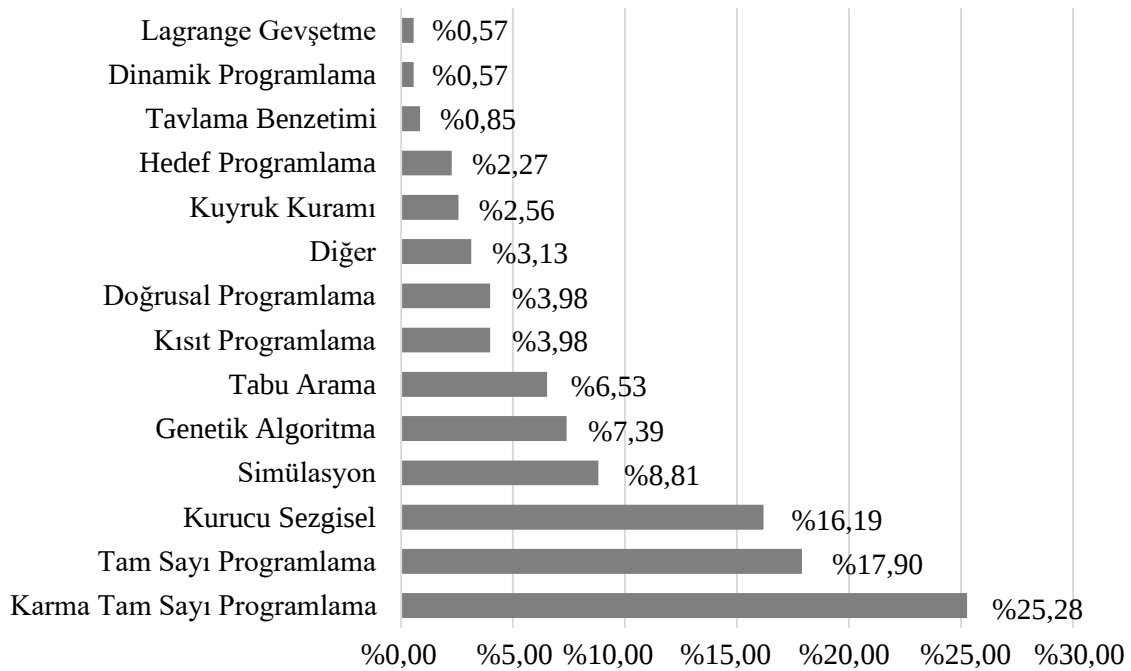
Buraya kadar değinilenler haricinde çizelgeleme problemlerinin diğer bir alt sınıfı olan ve çoğunlukla proje çizelgeleme alanında kullanılan kaynak kısıtlı çizelgeleme problemi (İng. Resource Constrained Scheduling Problem - RCSP), konuyla ilgili önemli bir problemidir. Başka bir deyişle, personel, işgücü vb. kısıtlarla ilgilenen çizelgeleme problemleri, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri olarak adlandırılır (Pinedo, 2007; Artigues, Demasse ve Neron, 2008). Kaynak kısıtlı çizelgeleme problemlerine yönelik literatürde ek kaynakların sınıflandırılması Şekil 2.1’de olduğu gibidir (Blazewicz ve diğerleri, 2004). Tez probleminde operatörler ek kaynak olarak ele alındığında, operatörlerin çalışma süreleri, çift kısıtlı ek kaynak (hem yenilenebilir hem de yenilenemez) olarak düşünülebilir.



Şekil 2.1. Ek kaynakların sınıflandırılması

Literatür araştırmasına çözüm yöntemleri açısından bakıldığında çizelgeleme problemlerinin NP-zor yapıda olma eğiliminde olduğu görülmektedir. Tez problemine benzer bir problemin NP-zor olduğu Gafarov, Lazarev ve Werner (2011) tarafından ispatlanmıştır. Ayrıca, tek makine ortamına yönelik finansal kaynakların sınırlı olduğu durumları ele alan bu çalışmada, sınırlı kaynakların çizelge üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, optimal çözümlerin bulunması zorlaştırdığı ve bu durumda sezgisel yaklaşımların kullanılması gerekebileceği belirtilmiştir. Problem karmaşıklığının, işlerin süreleri ve kaynak sınırları gibi faktörlere bağlı olarak değişebileceği vurgulanmıştır.

Personel çizelgeleme literatüründe çok sayıda çözüm yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; tam sayı programlama, doğrusal programlama, dinamik programlama ve hedef programlama gibi matematiksel programlama kategorilerine ya da yapıcı veya iyileştirici sezgiseller olarak sınıflandırılmaktadır. Diğer kategoriler ise simülasyon, kısıt programlama ve kuramıdır (Bergh ve diğerleri, 2013). Personel çizelgeleme problemin yönelik yaptıkları sistematik literatür taramasında Özder ve diğerleri, çözüm tekniklerinin kullanım yüzdelерini Şekil 2.2’de verildiği gibi raporlamıştır. Kurucu sezgiseller, tam sayı programlama ve karma tam sayı programlama tekniklerinin kullanım yüzdelерinin diğer tekniklere göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2. Çizelgeleme problemleri çözüm teknikleri

Metasezgisel yöntemler personel çizelgeleme problemi için önemli bir çözüm yöntemi sınıfını oluşturur. Metasezgisel yöntemler, diğer optimizasyon yöntemlerinin etkili ya da verimli olamadığı durumlarda kullanılmak maksadıyla tasarlanmıştır. Pratik avantajları hem etkinlikleri hem de genel uygulanabilirlikleridir. Sınırlı ve makul bir çalışma süresi içerisinde uygun çözümler üretebilirler.

Matematiksel programlama ve tam çözüm yaklaşımlarının ise uzun süre boyunca herhangi bir çözüm üretememe riski bulunmaktadır. Bununla birlikte, metasezgisel yöntemlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Optimal çözümü garanti etmezler ve kesin bir şekilde arama uzayını azalttıkları söylenemez (Burke, Li ve Qu, 2010).

Kısıt programlama, özellikle çok sayıda kısıt bulunan problemler için modelleme ve çözümde sağladığı avantajlar nedeniyle tam sayı programlamaya alternatif olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ancak bu avantajlar tüm çizelgeleme problemleri için geçerli değildir. Kısıt programlama yaklaşımının uygulanması için problemin yapısı ile kullanılacak çözücü önemlidir. Metasezgisellere benzer şekilde kısıt programlama yaklaşımı da optimalite garanti etmez.

Personel çizelgeleme problemiyle ilgili çalışmaların çoğu tam sayı ve karma tam sayı programlama olarak modellenmiştir. Ne yazık ki, tam sayı programlama genellikle çok sayıda değişken gerektirir ve optimal veya uygulanabilir çözümü makul bir sürede bulmak kolay olmayabilir. Bununla birlikte tam sayı programlama ile metasezgiseller, kısıt programlama vb. diğer yaklaşımlar birleştirilerek kullanılabilir.

Tez probleminde kullanılan çözüm yaklaşımlarına yönelik detaylı bilgi beşinci bölümde verilmiştir. Özetle; tam çözüm yaklaşımı kapsamında problemin tam sayı programlama modeli kodlanarak ticari bir çözücü olan CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Alternatif çözüm yöntemi olarak metasezgisel algoritmalar tavlama benzetimi algoritması probleme uygun komşuluk mekanizmaları geliştirilerek uygulanmıştır. Ayrıca, çok kısa sürede çözüm üretebilen açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar elde edilen çözümler; tam çözüm yaklaşımında hem üst sınır hem de sıcak başlangıç olarak, tavlama benzetimi yaklaşımında ise başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır.

Tez probleminin özgünlüğü

Aşağıda belirtilen hususların tümü birlikte değerlendirildiğinde literatürde benzer bir problemle karşılaşılmamıştır.

- Standart vardiya düzeni, hafta içi ve hafta sonu ayrımı yoktur. Operatör, çalışma ve dinlenmeye yönelik kurallar dâhilinde 7 gün 24 saat uygun zamanlarda çalıştırılabilir.
- Çizelge; günlük yapıda gündüz ve gece olarak ikiye ayrılmakta, gece periyodu için yorgunluk katsayısı uygulanmaktadır.
- Çalışma sürelerine (iş yükü) bağlı olarak operatörlerin özel çalışma süreleri ve dinlenme süreleri bulunmaktadır.
 - Aylık azami çalışma süresi
 - Günlük azami çalışma süresi
 - Gece çalışılabilecek azami süre
 - Gece yapılabilecek azami iş sayısı
 - Gece iş yapıldığında gündüz periyoduna etkileri
 - İş yükü kategorilerine göre ardışık gün çalışma ve dinlenme kısıtları

Tez probleminin gösterimi

Çizelgeleme problemleri Graham, Lawler, Lenstra ve Rinnooy Kan (1979) ile Blazewicz, Lenstra ve Rinnooy Kan (1983) tarafından kullanılan $\alpha|\beta|\gamma$ notasyonu ile gösterilir.

α makine ortamı

$\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ | $\alpha_1 \in \{\emptyset, P, Q, R, PD\}$ ve $\alpha_2 \in \{\emptyset, k\}$ makine ortamını belirler.

$\alpha_1 = \emptyset$: tek makine

$\alpha_1 = P$: özdeş paralel makine

$\alpha_1 = PD$: önceden atanmış paralel makine

$\alpha_1 = Q$: özdeş olmayan paralel makine

$\alpha_1 = R$: ilişkisiz paralel makine

$\alpha_2 = \emptyset$: değişken makine sayısı

$\alpha_2 = k$: sabit makine sayısı

β iş karakteristikleri

$\beta \subset \{\beta_1, \dots, \beta_7\}$ iş karakteristiklerini belirler. Tez probleminin iş karakteristikleri ilgili olan β_2 kısmı açıklanacaktır. $\beta_2 \in \{\emptyset, res\lambda\sigma\delta\}$ ile ek kaynakların karakteristikleri ifade edilir (Blazewicz ve diğerleri, 1989).

$\beta_2 = \emptyset$: ek kaynaklarla ilgili kısıtlar yok.

$\beta_2 = res\lambda\sigma\delta$: ek kaynaklarla ilgili kısıtlar var.

λ pozitif tam sayıdır ve ek kaynak tip sayısını gösterir. $\lambda = \bullet$ ise ek kaynak tip sayısı girdinin bir parçası ve keyfi bir değerdir.

σ pozitif tam sayıdır ve ek kaynak miktarlarını gösterir. $\sigma = \bullet$ ise ek kaynak miktarları değişken ve keyfi bir değerdir.

δ pozitif tam sayıdır ve ek kaynak gereksinimlerini gösterir. $\delta = \bullet$ ise gereksinimlerin üst bir sınırı yoktur.

γ amaç fonksiyonu

Amaç fonksiyonu alanı en küçüklenmek istenen hedefe göre değişiklik gösterir. Toplam tamamlanma zamanı ($\sum C_i$), en büyük gecikme ($\sum L_{max}$), en son işin tamamlanma zamanı (C_{max}) benzeri çok sayıda amaç fonksiyonu belirlenebilir.

Sonuç olarak tez problemi, aşağıdaki 2 farklı notasyonla ile gösterilebilir.

- $1|res1 \bullet \delta|C_{max}$
 $\lambda = 1$ Ek kaynak tipi sayısı 1'dir.
 $\sigma = \bullet$ İşlemlerin ihtiyaç duyduğu ek kaynak miktarı işlem sürelerine bağlı olarak değişkenlik gösterir.
 $\delta = \delta$ Ek kaynağın sabit δ üst limiti bulunmaktadır.
- $1|NR|C_{max}$
 NR : yenilenmeyen kaynak (İng. non-renewable resource)

3. PROBLEM TANIMI

Gerçek hayat uygulamalarından kurgulanan problem; organizasyona özgü çalışma ve dinlenme kurallarına göre helikopter pilotlarının uçuş çizelgelemesinin yapılmasına yöneliktir.

Havacılık alanında pilotların uçuş ve dinlenme saatlerine yönelik çok sıkı düzenlemeler bulunmaktadır. Havacılık sektöründeki iş yükü temelli olanlar dâhil tüm düzenlemeler, ulusal ve uluslararası otoriteler tarafından belirlenmektedir. Türkiye'deki sivil havacılık alanında SHGM otorite konumundadır. Dünya'da ise ICAO, EUROCONTROL, EASA, FAA vb. ulusal ve uluslararası otoriteler bulunmaktadır. Bu sivil otoritelerin görevleri arasında sivil ve askerî havacılık koordinasyonunun sağlanmasına yönelik konular da bulunmaktadır. Ancak, askerî havacılıkta kullanılan hava araçlarının özellikleri, uçuş ekipleri ve pilotların aldıkları eğitimler, görev koşulları vb. çok sayıda faktör nedeniyle sivil otoritelerin belirlediklerinden nispeten farklı düzenlemeler bulunabilir. Hatta görev yaptıkları ortamların farklı olmasından kaynaklı olarak askerî alanda kuvvetlerin (kara kuvvetleri, deniz kuvvetleri vb.) ihtiyaçlarına göre farklı düzenlemeler de uygulanabilir. Tüm bu farklılıklarla birlikte düzenlemeler dikkate alınarak uçuş planlamaları ve ekip atamalarının yapılması, genel anlamıyla uçuş harekâtının planlanması gerekir. Hedef; aşırı iş yükü kaynaklı yorgunluk, dikkatsizlik vb. nedenlerden dolayı oluşabilecek kazalar ile can ve mal kayıplarının önüne geçerek harekâtın planlandığı şekilde icrasını başarabilmektir. Barış döneminde emniyet birinci önceliklidir.

Askerî planlamanın önemli bileşenlerinde biri olan deniz harekât planlaması, her seviyede (stratejik, operasyonel ve taktik) kritik öneme sahip kapsamlı bir süreçtir. Bu süreçte gemi, uçak, silah ve malzemenin yanı sıra platformların düzeni ve sayısı dâhil olmak üzere çeşitli lojistik ve personelle ilgili faktörler hesaba katılmalıdır. Platformların farklı yetenekleri vardır. Gemiler denizde uzun süre görev yapabilirken, helikopterler (döner kanatlı uçak olarak da bilinir) yakıt kapasiteleri nedeniyle daha kısa süre görev yapabilir. (Navy Planning NWP 5-01, 2013). Suüstü gemileri iki boyutta düşük süratle hareket ederken helikopterler üç boyutta yüksek süratle hareket ederler. Helikopterlerin üzerlerine konuşlanmasıyla birlikte suüstü gemileri ilave yetenek kazanmış olur.

Askerî alanda helikopterler, temel olarak; kara kuvvetleri ve deniz kuvvetleri helikopterleri olarak 2 gruba ayrılabilir. Deniz kuvvetlerine ait helikopterler hem karaya hem de üzerinde helikopter platformu bulunan savaş gemilerine konuşlu olarak görev yapabildiğinden farklılık arz etmektedir. Bazı gemilerde helikopter platformunun yanı sıra helikopter hangarı da bulunmaktadır. Kapasitesine göre bir gemi üzerinde birden fazla helikopter bulunabilir. Hatta sadece helikopter gemisi olarak sınıflandırılan ve üzerinde farklı tipte çok sayıda helikopter bulunabilen savaş gemileri de vardır.

Deniz hava vasıtaları olarak deniz karakol uçakları ile birlikte helikopterler, özellikle denizaltılara karşı çok kritik görevler üstlenmektedir. Yönerge ve talimatlara uygun şekilde deniz hava vasıtalarından azami şekilde faydalanmak harekâtın etkinliği ve başarısı açısından kritik öneme sahiptir. İhtiyaç duyulan zamanda deniz hava vasıtalarının havada olmaması ve görev icra edememesi harekât etkinliğini olumsuz etkileyebilir. Deniz harekâtında deniz hava vasıtalarının planlanması oldukça kapsamlı ve karmaşık bir faaliyettir.

Helikopterlerin ve pilotların ilgili gemilere atanması, beraberinde diğer uçuş ve bakım ekiplerinin görevlendirilmesi, ilgili gemilerde helikopterlerin kullanabileceği güdümlü mermi, torpido vb. mühimmatın planlaması gibi konular ağırlıklı olarak barış zamanında yapılan kapsamlı ve uzun süreli çalışma gerektiren faaliyetlerdir. Yerine göre gün, hatta yerine göre saat ve dakika mertebesinde yapılacak hassas planlamalar, harekâtın temposunun ayarlanması, bilgi, karar ve icra üstünlüğünün ele geçirilmesinde anahtar rol oynayabilir.

Helikopterler, yakıt kapasitelerine bağlı olarak kısıtlı sürelerde sorti şeklinde görev yapabilmektedir. Nakliye, personel ve malzeme transferi, keşif, karakol, arama, taarruz vb. farklı süre gereksinimleri olan görevleri bulundukları gemilerin belirli bir mesafesi içinde olarak yerine getirebilirler. Göreve özelleşmiş, örneğin yaklaşık 55 kişi veya 11 ton yük taşıyabilen nakliye ve personel transferi görevleri yapan Resim 3.1’te gösterilen “CH-47 Chinook” ağır yük helikopterlerinin yanı sıra harekât ihtiyacına göre farklı mühimmat ve silah (Güdümlü mermi, torpido, sonar vb.) konfigürasyonları ile donatılarak birden çok görev tipini (Arama kurtarma, keşif karakol, suüstü taarruz, sualtı taarruz vb.) gerçekleştirebilen Resim 3.2’te gösterilen “SH-70B Seahawk” benzeri genel maksat helikopterleri de bulunmaktadır.



Resim 3.1. Chinook CH-47 helikopteri



Resim 3.2. Seahawk SH-70B helikopteri

Türk Deniz Kuvvetleri envanterinde S-70 helikopter ailesine ait 24 adet SH-70B Seahawk helikopteri, 4 adet AB-212 helikopteri ve 8 adet AH-1W helikopteri bulunmaktadır (Dz.K.K.lığı, 2024). Resim 3.3'te gösterilen eski nesil AB-212 helikopterlerinin silah ve sistemleri demode kaldığından yapabileceği görevler sınırlıdır. Resim 3.4'te gösterilen AH-1W helikopterleri ise ağırlıklı olarak amfibi harekât kapsamında kullanılacak silah ve sistemlere sahiptir. Genel maksatlı helikopter sınıfına ait SH-70B Seahawk helikopterleri ise envanterdeki en gelişmiş deniz helikopterlerdir. Hem suüstü hedefleri için güdümlü mermi hem de sualtı hedefleri için torpido ile donatılabilir. Mevcut daldırılabilir sonar sistemi ile denizaltı savunma harbi kapsamında suüstü gemileriyle birlikte denizaltıları daha etkin bir şekilde arayabilir.



Resim 3.3 AB-212. helikopteri



Resim 3.4. Super Cobra AH-1W helikopteri

CH-47 Chinook benzeri büyük helikopterler belirli tip ve sınıftaki daha az sayıda gemiye konuşlanabilirken SH-70B benzeri nispeten daha küçük genel maksat helikopterleri daha fazla sayıda gemiye konuşlanabilir. Helikopterlerin tiplerine göre pilot eğitimleri farklılık gösterebilir. Dolayısıyla her pilot her tip helikopteri kullanamayabilir. Bununla birlikte her görev her tip helikopter tarafından yerine getirilemez. Genel maksatlı SH-70B helikopteri CH-47 Chinook helikopterinin kaldırabileceği ağır yükleri kaldıramaz. Buna karşın, CH-47 Chinook helikopteri üzerinde sonar bulunmadığından SH-70B helikopterinin yapabildiği denizaltı arama ve denizaltı savunma harbi faaliyetlerini icra edemez.

Gemilerde kaç adet helikopter bulunacağı planlamalara göre belirlenmektedir. Arzu edilen, bu imkâna sahip gemilerde en az 1 helikopter bulunmasıdır. Atanacak helikopter sayısının belirlenmesi kadar önemli olan diğer bir konu; ilgili gemide bulunan helikopter(ler)in kullanılması maksadıyla kaç adet pilot ve uçuş/bakım ekibi görevlendirileceğidir. İlgili gemide 1 adet helikopter bulunmasına rağmen birden fazla helikopter pilotu (ve beraberinde uçuş/bakım ekibi) bulunabilir. İmkâna sahip her bir gemide bulunacak helikopter, pilot ve uçuş/bakım ekibi sayısı; harekât öncesinde yapılan detaylı planlamalara ve harekât esnasında ise değişen şartlara göre verilen kararlara bağlıdır.

Gemiler uzun süre denizde görev yapabildiğinden nispeten birbirinden uzak bölgelerde (Örneğin; ana vatandan uzakta bulunan Libya açıkları, Aden Körfezi) görev yapan gemilere ilave helikopter, pilot ve uçuş/bakım ekibi aktarımı çok pratik olmayabilir. Bu nedenle, helikopter ve pilotlar uzun görev süreleri boyunca mevcutlarında değişiklik olmadan aynı gemide görev yapabilir. Diğer taraftan, kuvvet çapında helikopter filolarındaki pilot kadroları ve sayıları kısıtlıdır. Bu kısıtlı kaynaklarla yapılan diğer harekât faaliyetleri eş zamanlı olarak devam etmektedir. Dolayısıyla kısıtlı kaynakların optimal kullanımı maksadıyla yöneylem araştırması ve endüstri mühendisliğinden faydalanılması harekât etkinliğini artırabilir.

Yukarıda anlatılanlar ışığında, deniz harekât planlamasının helikopterlerle ilgili gemi seviyesindeki kısmı tez problemi kapsamında yeniden kurgulanmış, helikopterler *makine*, pilotlar *operatör*, görevler ise *iş* olarak ele alınarak çizelgeleme literatürüne uyarlanmıştır. Helikopterin kullanılmasında en önemli kaynak pilot kabul edilerek diğer uçuş ve bakım ekibi kapsam dışında tutulmuştur. Bu çerçevede, problem pilotların uçuş ve dinlenme kurallarına göre helikopter görevlerinin çizelgelenmesidir.

Kolaydan zora doğru daha anlaşılabilir olması açısından, öncelikle tek gemiye 1 helikopter ve 1 pilot atanacağı varsayımıyla ‘tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu, sonrasında tek gemiye 1 helikopter ve 2 pilot atanacağı varsayımıyla ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonu incelenmiştir. Dolayısıyla ele alınan problem temelde tek makine problemidir. Operatör, bir ek kaynak olarak ele alınmaktadır. Klasik çizelgeleme probleminin aksine operatör, her zaman hazır değildir. Operatör, organizasyona özgü çalışma ve dinlenme sürelerine göre uygun periyotlarda iş yapabilir. Bu açıdan problem, personel çizelgeme problemi olarak da ele alınabilir.

Varsayımlar

- Birim zaman 1 saattir. 1 ay 30 gün, 1 gün 24 saattir. Dolayısıyla 1 ay 720 saattir.
- Gün, güneş doğumundan bir sonraki güneş doğumuna kadar geçen süredir. Gündüz, güneş doğumundan güneş batımına kadar geçen süredir. Gece, güneş batımından güneş doğumuna kadar geçen süredir. Gündüz ve gece süreleri planlama ufku boyunca eşittir.
- Operatör ve makinelerin uygun olmadığı periyot uygulaması olmadığından çizelge boştur. Çizelge, ilk gün güneşin doğuşu ile başlar.
- Makine, operatör ve işler başlangıç zamanında hazırdır.
- Operatörler özdeştir. Her bir iş, her bir operatör tarafından yapılabilir.
- Makine ile çalışma ve dinlenme süresi kuralları ihlal edilmemek şartıyla operatörler her zaman hazırdır. Vardiya uygulaması yoktur.
- Bir operatör aynı anda sadece 1 adet iş yapabilir.
- Makinede aynı anda sadece 1 adet iş yapılabilir.
- Bir iş başladıktan sonra durdurulamaz, askıya alınamaz ve diğer operatöre devredilemez.
- Her iş başladığı gün içerisinde tamamlanır.
- İşler gündüz başlayıp gece devam edebilir. Bu durumda geceye sarkan işler sayı bakımından gündüz, süre bakımından gece periyoduna dâhil edilir. Bu işlerin gece periyodunda yapılan kısımlarına yorgunluk katsayısı uygulanır.
- İşlerin hazırlık süreleri yoktur. Makinelerin bakım ihtiyacı yoktur.
- İşlerin arasında sıra bağımlılık ilişkisi yoktur.

Sınırlılıklar

- Gerçek hayattaki uygulamada yer alan bakım süreleri problemin karmaşıklığının daha fazla artırılmaması maksadıyla göz ardı edilmiştir. Bakım süreleri nispeten karmaşık bir takım kurallara bağlıdır.
- Niteliğine göre yapılacak görev öncesinde hazırlık süresi gerekebilir. Örneğin; personel nakliye görevinden sonra denizaltı arama görevi icra etmesi planlı helikopter, torpido yüklemesi maksadıyla belirli bir hazırlık süresine ihtiyaç duyacaktır.
- Gerçek hayattaki uygulamada herhangi bir işin tamamlanma zamanı ertesi güne sarkabilir. Ancak modelin nispeten basitleştirilmesi adına bu durum göz ardı edilmiş ve modele yansıtılmamıştır.

4. MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, problemin matematiksel modeli sunulmuştur. Kolaydan zora doğru gidilerek modelin daha rahat anlaşılması amacıyla sırasıyla ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine n operatör’ konfigürasyonları açıklanacaktır.

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonuna yönelik model geliştirilmesinin esas nedeni, ‘tek makine n operatör’ modeli ile özellikle değişken sayısı ve çözüm kalitesi açısından farklılık olup olmadığının araştırılmasıdır.

4.1. Tek Makine 1 Operatör Modeli

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonunda sadece 1 operatör bulunduğu için operatör indisi kullanılmadan matematiksel model geliştirilmiştir. Bu matematiksel model, tezin yayın şartı kapsamında Çelik ve Güner (2024) tarafından yapılan çalışmada da kullanılmıştır.

İndis ve kümeler

$k \in K$: İş tipi kümesi

$j \in J$: İş kümesi

$J_k \subset J$: J iş kümesine ait k tipi iş alt kümesi

$t, t' \in T$: Zaman periyotları kümesi

$d, d' \in D$: Günler kümesi

$T_d \subset T$: Gün periyotları kümesi

$T_d^{gündüz} \subset T$: Gündüz periyotları kümesi

$T_d^{gece} \subset T$: Gece periyotları kümesi

Parametreler

p_j : j işinin işlem süresi ($p_j = [1, 2, 3] \in \mathbb{Z}$)

α : Yorgunluk katsayısı (Gece yapılan işler için)

L^{ay} : Aylık en fazla çalışma süresi

$L^{gün}$: Günlük en fazla çalışma süresi

L^{normal} : Normal Kategori için günlük en fazla çalışma süresi

L^{gece} : Gece yapılabilecek en fazla toplam iş süresi

N^{gece} : Gece yapılabilecek en fazla iş adedi

$L^{gündüz}$: Gece iş yapılması durumunda gündüz yapılabilecek en fazla toplam iş süresi

$N^{gün}$: Günlük en fazla iş adedi

$N^{gündüz}$: Gece iş yapılması durumunda gündüz yapılabilecek en fazla toplam iş adedi

R^{gece} : Gece işi öncesinde kesintisiz dinlenme süresi

$R^{gece'}$: Gece yapılan son iş sonrasında kesintisiz dinlenme süresi

$R^{ağır}$: Ardışık ağır kategori iş yükü sonrasında kesintisiz dinlenme süresi

β : Ağır kategori iş yapılabilecek ardışık gün sayısı (ardışıklık)

γ : Ağır kategori iş yapılabilecek ardışık gün döngüsünün planlama ufku boyunca (ay) azami tekrar sayısı (ardışıklık tekrarı)

Karar değişkenleri

$$x_{jt} = \begin{cases} 1, & j \text{ işi } t \text{ zamanında başlarsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$y_t = \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında iş yapılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$c_d = \begin{cases} 1, & d \text{ gününde ağır kategori iş yapıldıysa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$q_d = \begin{cases} 1, & d \text{ gününde ardışık ağır kategori sonrasında kesintisiz dinlenme başladıysa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$C_{max} = \text{En son işin tamamlanma zamanı}$$

Amaç fonksiyonu

$$\min C_{max} \tag{4.1}$$

Eş.4.1 ile en son işin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır.

Kısıtlar

$$\sum_{t \in T} x_{jt} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4.2)$$

Eş. 4.2, her işin tamamlanmasını ve çizelgelenmesini sağlar.

$$\sum_{t'=t}^{t+p_j-1} y_{t'} \geq p_j x_{jt} \quad \forall j \in J, t \in \{1, 2, \dots, (|T| - p_j + 1)\} \quad (4.3)$$

Eş. 4.3, her işin başlama zamanından itibaren işlem süresi kadar işin devam ettiğini ve dolayısıyla çizelgenin o zaman periyodunda müsait olmadığını garantileyen kısıttır.

$$\sum_{t \in T} y_t = \sum_{j \in J} p_j \quad (4.4)$$

Eş. 4.4, iş yapılan sürenin toplamı ile toplam iş süresi ilişkisini sağlayan teknik kısıttır.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t'=t-p_j}^{t-1} x_{jt'} \leq 1 \quad t \in \{1, 2, \dots, (|T| - p_j + 1)\} \quad (4.5)$$

Eş. 4.5, işlerin üst üste çakışmamasını sağlayan kısıttır.

$$\sum_{t \in T_d^{gece}} y_t \leq L^{gece} \quad \forall d \in D \quad (4.6)$$

Eş. 4.6, her bir günün gece periyodunda yapılan işlerin toplam süresini sınırlar.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T_d^{gece}} x_{jt} \leq N^{gece} \quad \forall d \in D \quad (4.7)$$

Eş. 4.7, her bir günün gece periyodunda yapılan işlerin toplam sayısını sınırlar.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_t \leq L^{gündüz} + (1 - y_{t'}) (L^{gün} - L^{gündüz}) \quad \forall d \in D, t' \in T_d^{gece} \quad (4.8)$$

Eş. 4.8, her bir günün gece periyodunda iş yapılması durumunda o günün gündüz periyodunda yapılabilecek en fazla toplam iş süresini sınırlar.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T_d^{gündüz}} x_{jt} \leq N^{gündüz} + \left(1 - \sum_{j \in J} x_{jt'}\right) (N^{gün} - N^{gündüz}) \quad t' \in T_d^{gece} \forall, \quad d \in D \quad (4.9)$$

Eş. 4.9, her bir günün gece periyodunda iş yapılması durumunda o günün gündüz periyodunda yapılabilecek en fazla toplam iş sayısını sınırlar.

$$R^{gece} (1 - x_{jt}) \geq \sum_{t'=t-R^{gece}}^{t-1} y_{t'} \quad j \in J, t \in T_d^{gece}, \forall d \in D \quad (4.10)$$

Eş. 4.10, her bir gün için gece işi yapılırsa her iş öncesi kesintisiz dinlenme süresini sağlar.

$$R^{gece'} y_t \leq \sum_{t'=t+1}^{t+R^{gece'}} (1 - y_{t'}) + \sum_{t'=t+1}^{d*24} y_{t'} \quad \forall t \in T_d^{gece}, \forall d \in D \quad (4.11)$$

Eş. 4.11, her bir gün için gece işi yapılırsa sonuncu gece işinin tamamlanma zamanından sonra kesintisiz dinlenme süresini sağlar.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_t + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_t \leq L^{normal} + (L^{gün} - L^{normal}) c_d \quad \forall d \in D \quad (4.12a)$$

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_t + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_t \geq L^{normal} c_d + \varepsilon \quad \forall d \in D \quad (4.12b)$$

Eş. 4.12 kısıt grubu, her bir gün için gün boyu yapılan işlerin sürelerinin toplamına göre iş yükü kategorisinin belirlenmesini sağlar. Bu kısıt aynı zamanda günlük yapılabilecek azami toplam iş süresini de sınırlar.

$$\sum_{d'=d-\beta+1}^d c_{d'} - \sum_{d'=d-\beta+1}^{d-1} q_{d'} \geq (\beta - 1) + q_d \quad \forall d \in \{\beta, \beta + 1, \dots, |D|\} \quad (4.13a)$$

$$M(1 - q_d) + M \left\{ 1 - \left(y_t - \sum_{t'=t+1}^{d*24} y_{t'} \right) \right\} \geq \sum_{t'=t+1}^{t+R^{ağır}} y_{t'} \quad (4.13b)$$

$$t_d \in \{24 * (d - 1) + L^{normal} + 1, 24 * (d - 1) + L^{normal} + 2, \dots, 24 * d\}, \forall d \in D$$

$$q_d = 0 \quad \forall d \in \{1, \dots, \beta - 1\} \quad (4.13c)$$

$$q_d \leq c_{d'} \quad \forall d \in \{\beta, \beta + 1, \dots, |D|\}, d' \in \{d - \beta + 1, d - \beta + 2, \dots, d\} \quad (4.13ç)$$

$$\sum_{d'=d}^{d+\beta-1} q_{d'} \leq 1 \quad \forall d \in \{1, 2, 3, \dots, |D| - \beta + 1\} \quad (4.13d)$$

Eş. 4.13 kısıt grubu, ardışık günlerde ağır kategori çalışıldıktan sonra belirli bir süre kesintisiz dinlenme süresini sağlar. Eş. 4.13a, dinlenme yapılacak ağır kategori çalışılan günün bulunmasını sağlar. Eş. 4.13b, ardışık ağır kategori çalışmanın tamamlandığı gün yapılan son işin tamamlanma zamanından sonra kesintisiz dinlenme süresini sağlar. Eş. 4.13c, Eş. 4.13ç ve Eş. 4.13d, ağır iş yükü kategorisinde çalışılan günler ile bu günlerin oluşturduğu ardışık çalışma koşulunun sağlandığı ve kesintisiz dinlenme süresinin başladığı gün arasındaki ilişkileri belirleyen teknik kısıtlardır.

$$\sum_{d \in D} q_d \leq \gamma \quad (4.14)$$

Eş. 4.14, planlama ufku boyunca ardışık ağır kategori çalışma döngüsünün en fazla kaç defa tekrarlanabileceğini belirler.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_t + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_t \leq L^{ay} \quad \forall d \in D \quad (4.15)$$

Eş. 4.15, planlama ufku boyunca yapılabilecek azami çalışma süresini kısıtlar.

$$(p_j + t) x_{jt} \leq C_{max} \quad \forall j \in J, \forall t \in \{1, 2, \dots, |T| - p_j + 1\} \quad (4.16)$$

$$LB \leq C_{max} \leq UB \quad (4.17)$$

Eş. 4.16, Eş. 4.17 ile birlikte en son işin tamamlanma süresinin belirtilen sınırlar içerisinde hesaplanmasını sağlar.

$$C_{max} \in \mathbb{Z}^+ \quad (4.18)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.19)$$

$$y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T \quad (4.20)$$

$$c_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D \quad (4.21)$$

$$q_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D \quad (4.22)$$

Eş. 4.18 - 4.22, karar değişkenlerin tanım kümesini belirtir.

4.2. Tek Makine n Operatör Modeli

‘Tek makine n operatör’ konfigürasyonuna yönelik geliştirilen matematiksel model, ‘tek makine 1 operatör’ konfigürasyonuna ait matematiksel modelde yapılan değişiklikler belirtilerek açıklanacaktır.

İndis ve kümeler

Birden fazla operatör için geliştirileceği için ‘tek makine 1 operatör’ konfigürasyonundan farklı olarak operatör indisi ve kümesi eklenmiştir.

$o \in O$: Operatör kümesi

Parametreler

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu ile aynıdır.

Karar değişkenleri

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonunda bulunan C_{max} haricindeki diğer karar değişkenlerine operatör indisi eklenmiştir.

$$x_{jot} = \begin{cases} 1, & j \text{ işi } o \text{ operatörü tarafından } t \text{ zamanında başlarsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$y_{ot} = \begin{cases} 1, & o \text{ operatörü tarafından } t \text{ zamanında iş yapılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$c_{od} = \begin{cases} 1, & o \text{ operatörü tarafından } d \text{ gününde } \textit{ağır kategori} \text{ iş yapıldıysa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$q_{od} = \begin{cases} 1, & o \text{ operatörü tarafından } d \text{ gününde } \textit{ardışık ağır kategori} \text{ sonrasında } \textit{kesintisiz} \\ & \text{dinlenme başladıysa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$C_{max} = \text{En son işin tamamlanma zamanı}$$

Amaç fonksiyonu

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu ile aynıdır. Eş.4.1 ile en son işin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır.

Kısıtlar

$$\sum_{o \in O} \sum_{t \in T} x_{jot} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4.23)$$

Eş. 4.23, her işin herhangi bir operatör tarafından yapılarak tamamlanmasını ve çizelgelenmesini sağlar.

$$\sum_{t'=t}^{t+p_j-1} y_{ot'} \geq p_j x_{jot} \quad \forall j \in J, o \in O, t \in \{1, 2, \dots, (|T| - p_j + 1)\} \quad (4.24)$$

Eş. 4.24, her işin başlama anından itibaren işlem süresi kadar işin devam ettiğini ve dolayısıyla bu süre boyunca ilgili işi yapan operatörün meşgul olduğunu belirtir.

$$\sum_{o \in O} \sum_{t \in T} y_{ot} = \sum_{j \in J} p_j \quad (4.25)$$

Eş. 4.25, tüm operatörler tarafından yapılan işlerin sürelerinin toplamı ile toplam iş süresi ilişkisini sağlayan teknik kısıttır.

$$\sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \sum_{t'=t-p_j}^{t-1} x_{jot'} \leq 1 \quad t \in \{1, 2, \dots, (|T| - p_j + 1)\} \quad (4.26)$$

Eş. 4.26, işlerin ve operatörlerin üst üste çakışmamasını sağlar.

$$\sum_{t \in T_d^{gece}} y_{ot} \leq L^{gece} \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.27)$$

Eş. 4.27, her bir operatör tarafından her bir günün gece periyodunda yapılan işlerin toplam süresini sınırlar.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T_d^{gece}} x_{jot} \leq N^{gece} \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.28)$$

Eş. 4.28, her bir operatör tarafından her bir günün gece periyodunda yapılan işlerin toplam sayısını sınırlar.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_{ot} \leq L^{gündüz} + (1 - y_{ot'}) (L^{gün} - L^{gündüz}) \quad \forall o \in O, d \in D, t' \in T_d^{gece} \quad (4.29)$$

Eş. 4.29, her bir operatör tarafından her bir günün gece periyodunda iş yapılması durumunda o günün gündüz periyodunda yapılabilecek en fazla toplam iş süresini sınırlar.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T_d^{gündüz}} x_{jot} \leq N^{gündüz} + \left(1 - \sum_{j \in J} x_{jot'}\right) (N^{gün} - N^{gündüz}) \quad \forall o \in O, d \in D, \quad t' \in T_d^{gece} \quad (4.30)$$

Eş. 4.30, her bir operatör tarafından her bir günün gece periyodunda iş yapılması durumunda o günün gündüz periyodunda yapılabilecek en fazla toplam iş sayısını sınırlar.

$$R^{gece}(1 - x_{jot}) \geq \sum_{t'=t-R^{gece}}^{t-1} y_{ot'} \quad \forall j \in J, o \in O, d \in D, t \in T_d^{gece} \quad (4.31)$$

Eş. 4.31, her bir operatör için her bir gün için gece işi yapılırsa her iş öncesi ilgili operatör için kesintisiz dinlenme süresini sağlar.

$$R^{gece'} y_{ot} \leq \sum_{t'=t+1}^{t+R^{gece'}} (1 - y_{ot'}) + \sum_{t'=t+1}^{d*24} y_{ot'} \quad \forall o \in O, t \in T_d^{gece}, \forall d \in D \quad (4.32)$$

Eş. 4.32, her bir operatör tarafından her bir gün için gece işi yapılırsa sonuncu gece işinin tamamlanma zamanından sonra ilgili operatör için kesintisiz dinlenme süresini sağlar.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_{ot} + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_{ot} \leq L^{normal} + (L^{gün} - L^{normal}) c_{od} \quad \forall o \in O, \quad d \in D \quad (4.33a)$$

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_{ot} + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_{ot} \geq L^{normal} c_{od} + \varepsilon \quad \forall o \in O, \quad d \in D \quad (4.33b)$$

Eş. 4.33 kısıt grubu, her bir operatör tarafından her bir gün için gün boyu yapılan işlerin sürelerinin toplamına göre iş yükü kategorisinin belirlenmesini sağlar. Bu kısıt aynı zamanda her bir operatör için günlük yapılabilecek azami toplam iş süresini de sınırlar.

$$\sum_{d'=d-\beta+1}^d c_{od'} - \sum_{d'=d-\beta+1}^{d-1} q_{od'} \geq (\beta - 1) + q_{od} \quad \forall o \in O, \quad d \in \{\beta, \beta + 1, \dots, |D|\} \quad (4.34a)$$

$$M(1 - q_{od}) + M \left\{ 1 - \left(y_{ot} - \sum_{t'=t+1}^{d*24} y_{ot'} \right) \right\} \geq \sum_{t'=t+1}^{t+R^{uzun}} y_{ot'} \quad (4.34b)$$

$$\forall o \in O, d \in D, t_d \in \{24 * (d - 1) + L^{normal} + 1, 24 * (d - 1) + L^{normal} + 2, \dots, 24 * d\}$$

$$q_{od} = 0 \quad \forall o \in O, d \in \{1, \dots, \beta - 1\}, \quad (4.34c)$$

$$q_{od} \leq c_{od'} \quad \forall o \in O, \forall d \in \{\beta, \beta + 1, \dots, |D|\}, d' \in \{d - \beta + 1, d - \beta + 2, \dots, d\} \quad (4.34\text{ç})$$

$$\sum_{d'=d}^{d+\beta-1} q_{od'} \leq 1 \quad \forall o \in O, \forall d \in \{1, 2, 3, \dots, |D| - \beta + 1\} \quad (4.34d)$$

Eş. 4.34 kısıt grubu, her bir operatör için ardışık günlerde ağır kategori çalışıldıktan sonra ilgili operatör için kesintisiz dinlenme süresini sağlar. Eş. 4.34a, her bir operatör için dinlenme yapılacak ağır kategori çalışılan günün bulunmasını sağlar. Eş. 4.34b, her bir operatör tarafından ardışık ağır kategori çalışmanın tamamlandığı gün yapılan son işin tamamlanma zamanından sonra ilgili operatör için kesintisiz dinlenme süresini sağlar. Eş. 4.34c, Eş. 4.34ç ve Eş. 4.34d, her bir operatör için ağır iş yükü kategorisinde çalışılan günler ile bu günlerin oluşturduğu ardışık çalışma koşulunun sağlandığı ve kesintisiz dinlenme süresinin başladığı gün arasındaki ilişkileri belirleyen teknik kısıtlardır.

$$\sum_{d \in D} q_{od} \leq \gamma \quad \forall o \in O \quad (4.35)$$

Eş. 4.35, planlama ufku boyunca her bir operatör tarafından ardışık ağır kategori çalışma döngüsünün en fazla kaç defa tekrarlanabileceğini belirler.

$$\sum_{t \in T_d^{gündüz}} y_{ot} + \alpha \sum_{t \in T_d^{gece}} y_{ot} \leq L^{ay} \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.36)$$

Eş. 4.36, planlama ufku boyunca her bir operatör tarafından yapılabilecek azami çalışma süresini kısıtlar.

$$(p_j + t) x_{jot} \leq C_{max} \quad \forall j \in J, o \in O, \forall t \in \{1, 2, \dots, |T| - p_j + 1\} \quad (4.37)$$

Eş. 4.37, Eş. 4.17 ile birlikte en son işin tamamlanma süresinin belirtilen sınırlar içerisinde hesaplanmasını sağlar.

$$x_{jot} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, o \in O, t \in T \quad (4.38)$$

$$y_{ot} \in \{0, 1\} \quad \forall o \in O, t \in T \quad (4.39)$$

$$c_{od} \in \{0, 1\} \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.40)$$

$$q_{od} \in \{0, 1\} \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.41)$$

Eş. 4.38 - 4.41, karar değişkenlerin tanım kümesini belirtir. C_{max} karar değişkeninin tanımlı olduğu küme Eş. 4.18 ile belirtilmiştir.

‘Tek makine n operatör’ konfigürasyonuna yönelik karar değişkeni sayısı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karar değişkeni sayısı

İsim	Tip	Sayı
C_{max}	Tam sayı	1
x_{jot}	0-1 tam sayı	$ J \times O \times T $
y_{ot}	0-1 tam sayı	$ O \times T $
c_{od}	0-1 tam sayı	$ O \times D $
q_{od}	0-1 tam sayı	$ O \times D $

Karar değişkeni sayısının hesaplanmasında en fazla elemana sahip T zaman periyotları kümesi belirleyicidir. Planlama ufkunu sınırlayan zaman periyotları kümesinin büyüklüğünü, diğer bir deyişle işlerin tamamlanabileceği öngörülen üst sınırın doğru bir şekilde belirlenmesi karar değişken sayısının azaltılmasını sağlayabilir. Diğer taraftan üst sınırın çok sıkı belirlenmesi çözüm uzayının genişliğine bağlı olarak çözücünün makul sürelerde uygun çözüm alanına girmesini zorlaştırabilir. Üst sınırın yanlış belirlenmesi ise modelin yanlış sonuç üretmesine neden olur.

Hem üst sınır hem de alt sınıra yönelik kısıtlar 4.17 ile modele eklenmiştir. Alt sınırın belirlenmesi de çözücü performansı açısından önemlidir. Alt sınır uygulanmadan koşulan test problemlerinde, çözücünün kök düğümde özellikle gevşetme uyguladığı safhada çok fazla süre harcadığı tespit edilmiştir. Problem boyutu büyüdükçe belirlenen alt sınır, kısıtların yapısı gereği daha gevşek hâle gelecektir.

Günler saatlerden oluştuğu için D gün periyotları, dolaylı olarak T zaman periyotları kümesine bağlıdır. T zaman periyotları kümesi genişledikçe doğrusal şekilde D gün periyotları kümesi de genişleyecektir.

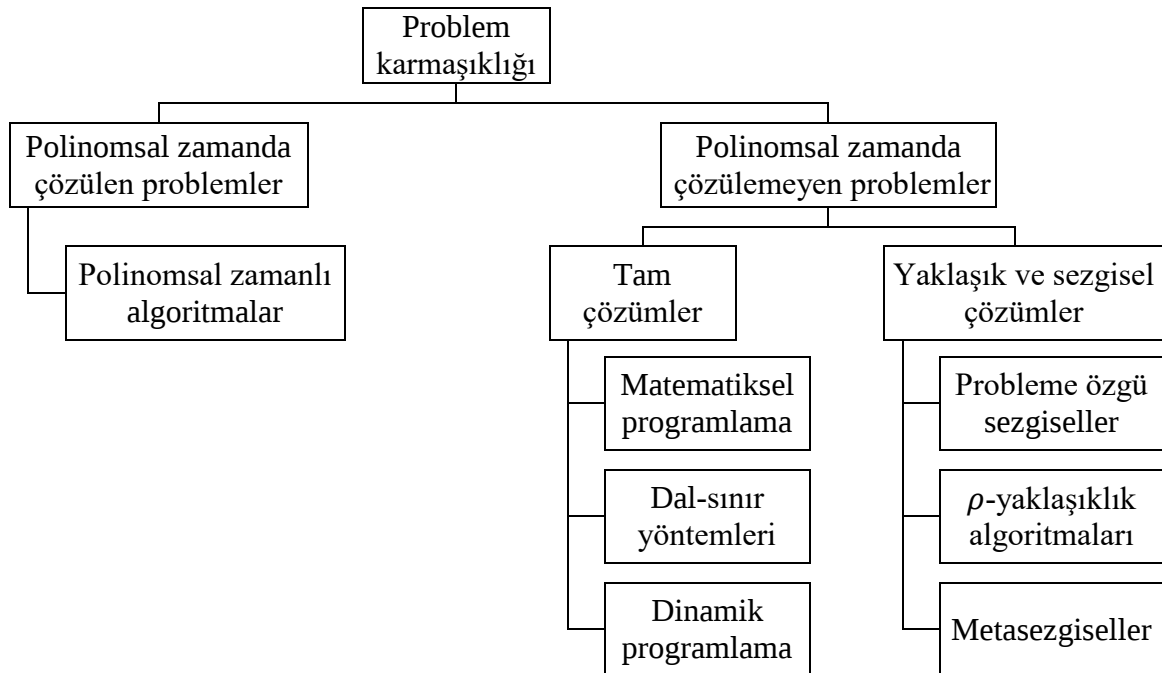
Problem tanımında yer alan varsayımlarda belirtildiği üzere birim zaman 1 saat olarak alınmıştır. Birim zamanın yarım saat olarak seçilmesi ile işlem sürelerinin yarım saat ve katları şeklinde belirlenmesi ve çizelgenin çözünürlüğü artırılması mümkün olabilir. Karar değişkeni ve kısıt sayısının katlanmasına ve dolayısıyla çözücünün performansını olumsuz etkileyecek bu durumun ayrıca modele yansıtılması gerekecektir.

Sonuç olarak, oluşturulan matematiksel modeldeki zamanın kesikli yapısı, çizelgelenecek iş sayısı arttıkça karar değişkeni ve kısıt sayısını da artıracak, bu durum çözücünün performansını olumsuz şekilde etkileyecektir.

5. ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Yöneylem araştırması alanındaki diğer problemlere benzer şekilde çizelgeleme problemlerine uygulanacak çözüm yaklaşımları problemin karmaşıklığıyla ilgilidir. Problem karmaşıklığına göre çözüm yaklaşımlarının sınıflandırılması Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Çizelgeleme problemlerinin karmaşıklık sınıflandırmasının temeli Lenstra ve Rinnooy Kan (1979) ile Lageweg, Lawler, Lenstra ve Rinnooy Kan (1981, 1982) tarafından yapılan çalışmalarına dayanmaktadır. Ayrıca, karmaşıklık teorisi ve karmaşıklık analizine yönelik Garey ve Johnson (1979) tarafından yapılan çalışmada bazı çizelgeleme problemleri de yer almaktadır.

Çizelgeleme problemlerinin boyutu, iş sayısının yanı sıra işlerin işlem sürelerine de bağlıdır. Ancak, pratikte iş sayısı kullanılabilir ve farklı problemlerin karmaşıklık analizi için yeterlidir. Algoritmaların etkinliği, optimal çözümü ulaşmak maksadıyla en kötü senaryoda problemin boyutunun fonksiyonu olan gerekli hesaplama adımı sayısı ile ölçülür. Eğer algoritma için gerekli hesaplama adımı sayısı problem boyutuna bağlı polinom şeklinde formüle edilebiliyorsa çözümü polinom zamanlı olan bir problemidir. Bunun aksi söz konusu ise çözümü polinom zamanlı olmayan (İng. non-polynomial - NP) bir problemidir (Pinedo, 2022).



Şekil 5.1. Çözüm yaklaşımlarının sınıflandırılması

5.1. Tam Çözüm Yaklaşımı

Tam çözüm yaklaşımı kapsamında, akademik personel ve öğrencilerin ücretsiz şekilde faydalanabildiği ticari bir uygulama olan IBM ILOG CPLEX Optimizer (Versiyon 22.1.1.0) kullanılmıştır. CPLEX, doğrusal programlama, karışık tamsayı programlama ve kuadratik programlama problemlerinin çözümünde kullanılabilmektedir. CPLEX, karışık tamsayı programlama problemine çözüm bulmak maksadıyla doğrusal gevşetme (LP relaxation), dal-sınır (branch and bound), dal-kesim (branch and cut) vb. algoritmaları uygulamakta, bunun yanı sıra sezgisel aramaları da kullanabilmektedir.

Tez probleminin dördüncü bölümde sunulan tamsayı programlama modeli IBM ILOG Optimization Studio (Versiyon 22.1.1.0) uygulamasında OPL (Optimization Programming Language) dilinde kodlanmıştır.

5.1.1. Sıcak başlatma tekniği

Tam sayı programlama modeli çözülürken, diğer bazı ticari çözücülere olduğu gibi CPLEX çözücüsüne de bazı ipuçları sağlanarak çözücünün bir başlangıç çözümü bulması sağlanabilir. Bu ipuçları, “MIP başlangıcı”, “gelişmiş başlangıç” veya “sıcak başlangıç” olarak bilinen değişkenler ve değerlerinden oluşur. Sıcak başlangıç; daha önce çözülen farklı bir problemde, probleme yönelik mevcut çözümde, problemin muhatapları tarafından uygulanan kısmi çözümde türetilir. Sıcak başlangıç hem kesikli hem de sürekli değişkenler için değerler içerebilir. Birden fazla sıcak başlangıç modele eklenebilir ve yönetilebilir (IBM, 2024).

Sunduğu yeteneklere bağlı olarak uygun olmayan veya eksik olan bir çözüm de çözücüye sıcak başlangıç olarak verilebilir. Optimizasyona yönelik dal-sınır veya dal-kesim algoritmaları başlamadan çözücü tarafından sıcak başlangıç çözümü işleme alınır. Bir veya daha fazla sıcak başlangıç çözümleri tanımlanırsa, çözümlerin en iyisi mevcut en iyi çözüm olarak çözücüye yüklenir. Böylece, daha ilk aşamalarda arama uzayının bazı bölümleri elenerek dallanma sayısı azaltılabilir. Sıcak başlangıç çözümüne sahip olmak çözücünün sezgisel yöntemleri kullanmasına da daha erken olanak tanıyabilir. (IBM, 2024).

Sıcak başlangıç tekniğinin etkinliği birçok farklı faktöre bağlı olabilir. Sağlanan sıcak başlangıç çözümünün kalitesi önemlidir. Kaliteli bir sıcak başlangıç çözümü, çözücü tarafından erken zamanda bulunan kalitesiz çözümlerin kısa sürede elenmesine yardımcı olarak çözücü performansını olumlu yönde etkileyebilir. Kalitesiz bir sıcak başlangıç çözümü ise çözücünün arama uzayının ilgisiz kısımlarında zaman kaybetmesine, özellikle arama uzayı çok büyükse çözücünün performansının olumsuz yönde etkilenmesine neden olabilir. Diğer taraftan, kullanılan algoritmaların farklılıkları nedeniyle çözücülere göre aynı başlangıç çözümünün kalitesi farklılık gösterebilir. Genellikle, çözücüler tarafından kullanılan bazı arama algoritmaları ve dallanma stratejileri erişime açık olmayıp ticari sır niteliğinde saklandığından bu farklılıkların nedeni tam olarak anlaşılmamaktadır.

Yukarıda anlatılanlar ışığında, sıcak başlangıç tekniğinin çözücü performansını olumsuz etkileme ihtimali bulursa da, arama uzayının çok geniş olduğu ve makul sürelerde çözücünün uygun bir çözüm sağlayamadığı durumlarda en azından bir üst sınır olarak fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Sıcak başlangıç tekniği, diğer çözüm yaklaşımlarıyla elde edilen çözümlerin tam çözüm yaklaşımı kapsamında geliştirilen matematiksel modelle uyuşturğunun doğrulanması maksadıyla da kullanılabilir. Örneğin; sezgisel bir algoritma ile elde edilen bir çözüm, sıcak başlangıç olarak çözücüye verildiğinde çözücü ilk aşamada kontroller yaparak bu çözümün uygunluğunu raporlayabilir. Eğer sıcak başlangıç çözümü uygun bir çözüm değilse ya matematiksel modelin ya da muhtemelen geliştirilen algoritmanın gözden geçirilmesi gerekebilir.

5.1.2. Alt sınır (LB) belirlenmesi

Alt sınır kullanılmadan koşulan test problemlerinde çözücünün gevşetme uyguladığı, kök düğümde çok zaman harcadığı ve bu durumun çözüm süresini uzattığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, çalışma ve dinlenme ile ilgili kısıtlar dikkate alınmaksızın operatörlerin her gün ağır kategori iş yapabileceği varsayımıyla Eş. 5.1 ile gevşek bir alt sınır hesaplanmıştır. Bu eşitlik, birim zaman 1 saat alındığında günlük en fazla çalışma süresi ile toplam operatör sayısının çarpımlarının 24 saat ve 24 saatten az olduğu durumlar için geçerlidir ($L^{gün}|O| \leq 24$). Aksi durumda, alt sınır toplam iş süresine eşit olmalıdır.

$$LB = \left(\left\lceil \frac{\sum p_j}{L^{gün}|O|} \right\rceil - 1 \right) * 24 + \left\{ \sum p_j - \left[\left(\left\lceil \frac{\sum p_j}{L^{gün}|O|} \right\rceil - 1 \right) * L^{gün}|O| \right] \right\} \quad (5.1)$$

5.2. Açgözlü Kurucu Sezgisel Algoritmalar

Açgözlü algoritmalar, optimizasyon problemlerinin çözümü maksadıyla kullanılan, her adımda miyopik olarak mevcut durumda en iyi görünen seçeneği seçerek lokal optimal çözüme ulaşmayı hedefleyen ve diğer çözüm yaklaşımlarına göre çok hızlı bir şekilde çözüm üretebilen algoritmalar. Açgözlü algoritmalar, global optimal çözümü garanti etmeseler de bazı problemler için çok iyi sonuçlar üretebilir. Özellikle büyük boyutlu ve karmaşık problemlerde yaygın olarak kullanılır. Neredeyse tüm problemler için farklı açgözlü algoritma tasarlanması kolay olmasına rağmen açgözlü algoritmanın iyi çalıştığı durumları tespit etmek ve optimal çözümü garanti ettiğinin ispatlanması kolay olmayabilir. (Cormen, Leiserson, Rivest ve Stein, 2001; Kleinberg ve Tardos, 1980).

Kurucu algoritmalar, genellikle kombinatoriyal optimizasyon problemleri için hızlı bir başlangıç çözümü oluşturmak maksadıyla kullanılan basit ve uygulanması kolay algoritmalar. Açgözlü kurucu algoritmalar, kurucu algoritmaların açgözlü bir yaklaşımla geliştirilen özel bir türüdür. Açgözlü algoritmaların avantaj ve dezavantajlarının çoğu kurucu algoritmalar için de geçerlidir. Optimali garanti etmezler, başarıları problem türü ve yapısına göre değişiklik gösterebilir.

Tez probleminin büyük boyutlu örnekleri için tam çözüm yaklaşımıyla makul süreler içerisinde uygun çözüm bulunamadığı gözlemlendiğinden hem üst sınır belirlenmesi hem de sıcak başlangıç noktası oluşturulması maksadıyla açgözlü kurucu algoritmalar geliştirilmiştir.

Tez probleminin kutu paketleme problemi ile benzerliklerinden hareketle, kutu paketleme probleminin çevrim dışı (İng. offline) versiyonu için geliştirilmiş olan *Azalan İlk Sığan* (İng. First-Fit-Decreasing - FFD,) ve *Artan İlk Sığan* (İng. First-Fit-Increasing - FFI) algoritmalarından faydalanılmıştır. FFD algoritması aynı zamanda yaklaşıklık algoritması olup en kötü durumda (İng. worst case) Eş. 5.2’de verilen yaklaşıklık oranına sahip olduğu Dosa (2007) tarafından ispatlanmıştır. Kullanılan sıralama algoritmasına göre değişmekle birlikte bu algoritmanın karmaşıklığının $O(n \log n)$ söylenebilir.

$$FFD(I) = \frac{11}{9} OPT(I) + \frac{6}{9} \quad (5.2)$$

FFD ve *FFI* algoritmalarının yaklaşıklık oranlarının ve karmaşıklık analizlerinin tez problemiyle aynı olduğunu söylemek probleme özgü kısıtlar nedeniyle mümkün değildir. Bunun yanı sıra makinelerin çalışma kapasiteleri nedeniyle ortaya çıkan işlerin yüksek multiplisiteye sahip yapısının incelenmesi gerekir. Kutu paketleme problemi güçlü NP-Zor sınıfında bir probleme olmasına rağmen sabit çeşitte ve yüksek sayıda, diğer bir ifadeyle yüksek multiplisiteye sahip, eşyanın paketlenmesine yönelik Goemans ve Rothvos (2020) tarafından polinom zamanda çözüm üreten algoritma geliştirilmiştir. Tez problemine özgü kısıtlar nedeniyle bu algoritmanın kullanılarak polinom zamanda çözüm elde edilemeyeceği değerlendirilmektedir.

Özetle; çeşitli çizelgeleme problemlerinin, kutu paketleme problemleri ve daha genel olarak stok kesme problemleri ile aynı aileye ait olduğundan hareketle, kurucu algoritma tasarlanırken kutu paketleme problemi için geliştirilen algoritmalarından faydalanılmıştır. Günler kutu olarak kurgulanmış ve kutuların farklı kapasite değerlerine göre *FFD* ve *FFI* algoritmaları probleme özgü kısıtlar kapsamında uyarlanmıştır.

5.2.1. Açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım-1 (GR1)

Geliştirilen ilk açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım *GR1* olarak isimlendirilmiştir. Günlerin diğer bir ifadeyle kutuların kapasiteleri normal kategori iş yükü sınır değeri (L^{normal}) olarak belirlenmiştir. Operatör her bir gün normal kategori iş yükünde çalıştığında, ağır kategori iş yüküyle ve bununla ilişkili ardışıklık kısıtları gereksiz (İng. redundant) hâle gelecektir. Bu durumda, planlama ufku artar ve kötü bir amaç fonksiyon değeri elde edilir. Bu tasarımın ana nedeni, *GR1* ile elde edilen çözümün sıcak başlangıç tekniğindeki etkisini araştırmaktır. *GR1* için uyarlanan *FFD* algoritmasının sözde kodu ‘tek makine 1 operatör’ için Şekil 5.2’de verilmiştir.

FFD algoritmasında öncelikle işler işlem süresine göre azalan şekilde sıralanır. Her bir iş çizelgedeki uygun bir günün uygun bir saatine iş yükü sınırını aşmayacak biçimde yerleştirilir. Operatör sayısının birden fazla olması durumunda her bir operatör için uygun başlangıç günü ve saati bulunur, bunlardan küçük olanına ilgili iş yerleştirilir. Eşitlik durumunda indisi küçük olan operatör tercih edilir. Mevcut çözümde işin yerleşebileceği uygun bir gün-saat ikilisi bulunmazsa çizelgeye yeni bir gün eklenir ve algoritmanın ilgili satırına dönülerek ilgili işin çizelgeye yerleştirilmesi sağlanır ve sonraki işe geçilir.

Algoritma 1: $GR1\text{-}FFD_{L^{normal}}$.

Input: Azalan işlem süreli iş listesi.

Output: $|T|, sol$

```

1   $sol \leftarrow \emptyset$ 
2   $d \leftarrow 1$ 
3   $workload(d) \leftarrow 0$ 
4  for each job  $j \in J$  do
5      for each  $d \in D$  do
6          if  $workload(d) \leq L^{normal}$ 
7              for each  $t \in T^d$  do
8                  if  $\sum_t^{t+p_j-1} y_t = 0$  and  $t + p_j - 1 < d * 24$  then
9                      if  $p_j + workload(d) \leq L^{normal}$  then
10                          $x_{jt} = 1$ 
11                          $sol.insert(x_{jt})$ 
12                          $workload(d) \leftarrow p_j + workload(d)$ 
13                         break
14                     end if
15                 end if
16             end for
17         end if
18         if  $|sol| = j$  then
19             break
20         end if
21     end for
22     if  $|sol| < j$  then
23          $|D| \leftarrow |D| + 1$  //yeni gün ekle
24         goto satır 5
25     end if
26 end for

```

Şekil 5.2. $GR1$ yaklaşımı FFD algoritması sözde kodu

FFI algoritmasında ise işler işlem sürelerine göre artan şekilde sıralanır. Sonuçta, $GR1$ yaklaşımında FFD ve FFI algoritmalarından faydalanılarak üst sınır değeri olarak 2 adet amaç fonksiyonu değeri ve 2 adet çözüm kümesi elde edilir. Eş. 5.3 kullanılarak üst sınır değeri küçük olanı seçilir. Buna ait çözüm kümesi ise sıcak başlangıç noktası olarak seçilir. İki algoritma da eşit sonuç üretirse, FFD algoritmasıyla üretilen sonuçlar kullanılmıştır.

$$UB(GR1_{cmax}) = \min(UB[GR1^{dec}], UB[GR1^{inc}]) \quad (5.3)$$

5.2.2. Açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım-2 (GR2)

Geliştirilen ikinci açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım ise *GR2* olarak isimlendirilmiştir. Günlerin diğer bir ifadeyle kutuların kapasiteleri, ağır kategori iş yükünü garanti edecek şekilde günlük azami çalışma süresi ($L^{gün}$) olarak belirlenmiştir. Operatör her bir gün ağır kategori iş yükünde çalıştığında, ağır kategori iş yükü ve bununla ilişkili ardışıklık kısıtları devreye girmektedir. Sözde kod ‘tek makine 1 operatör’ için Şekil 5.3’te verilmiştir.

Algoritma 2: *GR2-FFD_{L^{gün}}*.

Input: Azalan işlem süreli iş listesi.

Output: $|T|, sol$

```

1   $sol \leftarrow \emptyset$ 
2   $d \leftarrow 1$ 
3   $workload(d) \leftarrow 0$ 
4  for each job  $j \in J$  do
5      for each  $d \in D$  do
6          if  $workload(d) \leq L^{gün}$ 
7              for each  $t \in T^d$  do
8                  if  $\sum_t^{t+p_j-1} y_t = 0$  and  $t + p_j - 1 < d * 24$  then
9                      if  $p_j + workload(d) \leq L^{gün}$  and  $feasibility(j) = true$  then
10                          $x_{jt} = 1$ 
11                          $sol.insert(x_{jt})$ 
12                          $workload(d) \leftarrow p_j + workload(d)$ 
13                         break
14                     end if
15                 end if
16             end for
17         end if
18         if  $|sol| = j$  then
19             break
20         end if
21     end for
22     if  $|sol| < j$  then
23          $|D| \leftarrow |D| + 1$  //yeni gün ekle
24         goto satır 5
25     end if
26 end for

```

Şekil 5.3. *GR2* yaklaşımı *FFD* algoritması sözde kodu

GR2 yaklaşımı kapsamında, *GR1* yaklaşımına ek olarak her bir iş uygunluk kontrolü yapıldıktan sonra çizelgeye yerleştirilmektedir. *GR2* yaklaşımında da üst sınır değeri olarak kullanılan 2 adet amaç fonksiyonu değeri ve 2 adet çözüm kümesi elde edilir. Eş. 5.4 kullanılarak bu üst sınır değerlerinden küçük olanı seçilir. Bu üst sınır değerinin elde edildiği çözüm kümesi ise sıcak başlangıç noktası olarak seçilir. İki algoritma da eşit sonuç üretirse, *FFD* algoritmasıyla üretilen sonuçlar kullanılmıştır.

$$UB(GR2_{cmax}) = \min(UB[GR2^{dec}], UB[GR2^{inc}]) \quad (5.4)$$

GR2 yaklaşımı çoğunlukla *GR1* yaklaşımından daha iyi amaç fonksiyonu değerleri üreterek daha sıkı üst sınırlar sağlamaktadır. Ancak, altıncı bölümde yer alan bazı test problemlerinde görüleceği üzere aynı test problemi için *GR1* yaklaşımı bir aylık planlama ufkunda uygun bir çözüm üretebilmesine rağmen *GR2* yaklaşımı üretememekte, planlama ufkunun ikinci aya uzamasına neden olmaktadır. Planlama ufkunun bu şekilde uzaması karar değişkeni sayısının artmasına ve dolayısıyla çözüm uzayının genişlemesine neden olmaktadır. Bu durum açgözlü yaklaşımın bilinen dezavantajlarından biridir ve tam çözüm yaklaşımında sıcak başlangıç tekniğinin çözüm kalitesini etkilemektedir.

Sonuç olarak, *GR1* ve *GR2* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımlarında *FFD* ve *FFI* algoritmaları kullanılarak her bir problem için 4 farklı amaç fonksiyon değeri ve çözüm üretilmektedir. Her iki yaklaşımda da amaç fonksiyon değeri küçük olan çözüm tercih edilmektedir. Algoritmaların aynı amaç fonksiyonu değeri üretmeleri durumunda *FFD* algoritmasından elde edilen çözümler kullanılmaktadır.

GR1 yaklaşımında gece işleri, ağır kategori iş yüküyle ve bununla ilişkili ardışıklık kısıtlarına yönelik uygunluk kontrolü yapılmadığından *GR2* yaklaşımına göre işler daha hızlı şekilde çizelgeye yerleştirilmekte ve çözüm elde edilmektedir. Her iki algoritmanın çözüm süresi bu çalışma kapsamında kullanılan test problemleri özelinde saniyenin altında milisaniyeler mertebesinde.

Açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar, Microsoft Visual Studio Professional 2022 (Versiyon 17.4.1) uygulamasında C# programlama dilinde kodlanmıştır.

5.3. Metasezgisel Yaklaşım: Tavlama Benzetimi

Tavlama benzetimi (TB), kombinatoriyal eniyileme problemleri için iyi çözümler veren ve stokastik arama yöntemini kullanan bir metasezgisel algoritmadır. Fizik alanında metal işleme süreçlerinden esinlenerek geliştirilen tavlama benzetimi algoritması, birbirlerinden bağımsız olarak Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi (1983) ile Cerny (1985) tarafından ortaya konmuş, daha sonra Van Laarhoven ve Aarts (1987) ile Aarts ve Korst (1989) tarafından geliştirme çalışmaları daha ileri seviyelere taşınmıştır.

Tavlama benzetiminin en önemli özelliklerinden birisi iterasyon sayısı sonsuza giderken optimal çözüme ulaştığı kanıtlanan tek algoritma olmasıdır. Gezgin satıcı problemi, çizelgeleme problemleri, karesel atama problemi, şebeke tasarımı gibi birçok kombinatoriyal eniyileme problemin çözümünde önerilmiştir.

Literatür incelendiğinde, son yıllarda çeşitli personel çizelgeleme problemlerinde, örneğin hemşire çizelgeleme problemlerinde Jafari ve Salmasi (2015), Knust ve Xie (2017), Turhan ve Bilgen (2020); şoför çizelgeleme problemlerinde Bernhardt, Melo, Bousonville ve Kopfer (2017), Koç, Jabali ve Laporte, G. (2018); havayolu ekip çizelgeleme probleminde Hadiani ve diğerleri (2013) tarafından tavlama benzetiminin başarıyla uygulandığı görülmektedir. Bu kapsamda, tez probleminin alternatif çözüm yaklaşımı olarak tavlama benzetimine dayalı bir algoritma geliştirilmiştir.

Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller ve Teller (1953) tarafından bir katının ısı banyosunda ısı dengeye (İng. thermal equilibrium) ulaşmaya kadar olan sürecin benzetimini yapmak amacıyla Monte Carlo tekniğine dayalı Metropolis Algoritması ismiyle anılan basit bir algoritma geliştirilmiştir. Mevcut durumu s_i ve enerjisi E_i olan katı, bir hareket mekanizmasıyla yeni durumu s_j ve yeni enerjisi E_j olacak şekilde işlem görür. Durumların enerjileri arasındaki fark $\Delta E = E_j - E_i$ formülü ile hesaplanır. $\Delta E \leq 0$ ise, s_j durumu mevcut durum olarak kabul edilir. $\Delta E > 0$ ise, ısı banyosunun sıcaklığı (T) ve Boltzman sabitinin (K_B) yer aldığı Eş. 5.5 kullanılarak s_j durumu belirli bir olasılıkla kabul edilir.

$$P(kabul) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{K_B T}\right)} \quad (5.5)$$

Tavlama benzetimi algoritması komşu arama yöntemine dayanmaktadır. Başlangıç çözümünden başlayarak komşu çözümler arasında arama yapılmaktadır. Bazı komşu arama yöntemlerinden farklı olarak iyi çözümler kabul edilirken kötü çözümler ise doğrudan reddedilmeyip belirli bir olasılıkla kabul edilir. Kötü çözümlerin kabul edilmesindeki amaç, algoritmanın yerel optimal tuzaklardan kurtarılarak global optimal çözüme ulaşmaya çalışılmasıdır.

Amaç fonksiyonunda Δ kadar kötü bir çözümün kabul edilme olasılığını veren Eş. 5.6'teki fonksiyon "kabul fonksiyonu" olarak adlandırılır. Kabul fonksiyonunda fiziksel tavlamaadaki sıcaklığa karşılık gelen T kontrol parametresi bulunur. Kabul fonksiyonuna göre, amaç fonksiyonunda meydana gelen küçük artışların kabul edilme olasılığı, büyük artışların kabul edilme olasılığından daha fazladır.

Bununla birlikte, T parametresi yüksek değerlerden sıfıra yaklaştıkça kabul fonksiyon değeri de azalır ve kötü çözümlerin reddedilme olasılığı artar. Dolayısıyla yerel optimal tuzaklardan kaçınmak maksadıyla görece yüksek bir T değeri ile aramaya başlanması daha uygundur.

$$P(kabul) = e^{-\left(\frac{\Delta}{T}\right)} \quad (5.6)$$

Tavlama benzetimi algoritmasında, bir taraftan T kontrol parametresi ile sıcaklık yavaşça azaltılırken, her sıcaklık seviyesinde komşu çözümlere yönelik belirli sayıda hareket denenerek arama işlemi sürdürülür.

Tavlama benzetimi algoritması uygulanırken verilmesi gereken önemli kararlar aşağıda sıralanmıştır:

- Başlangıç çözümü (s_0)
- Başlangıç sıcaklığı (T_0)
- Soğutma planı
- Komşuluk yapısı (N_s)
- Durdurma koşulu
- Çözüm uzayı

Başlangıç çözümü genellikle rassal olarak üretilir. Soğutma planı, başlangıç sıcaklığının her bir iterasyonda belirli oranda (α) azaltılması ile uygulanır. Komşuluk yapısı kapsamında; komşuluk kümesi birkaç iterasyonda araştırılabilecek kadar küçük olmalı, basit hareket mekanizmalarıyla komşu çözümlere ulaşılabilmesi ve komşu çözümler hızlı bir şekilde rassal olarak üretilebilmelidir. Problemin yapısına göre literatürde yer alan toplam iterasyon sayısı, son sıcaklık vb. durdurma koşullarından uygun olan(lar)ı belirlenerek algoritma sonlandırılmalıdır.

Çözüm uzayı kısıtları sağlama stratejisiyle ilgilidir. Çözüm uzayı, kısıtları sağlamayan çözümler reddedilerek sadece kısıtları sağlayan çözümler ile sınırlandırılabilir veya diğer stratejiler (cezalandırma, tamir vb.) kullanılarak kısıtları sağlamayan çözümler de çözüm uzayına dâhil edilebilir.

Çok geniş uygulama alanları bulunan tavlama benzetimi algoritmasında verilmesi gereken genel ve probleme özgü kararların sayısı artabilir ve bunlara yönelik çok çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir. Örneğin; soğutma planı, doğrusal yerine geometrik veya adaptif olarak ayarlanabilir ya da tüm karar parametreleri deneysel çalışmalar ile belirlenebilir.

Tavlama benzetimi algoritmasının sözde kodu Şekil 5.4'te verilmiştir. Satır 1-2'de başlangıç çözümü ve mevcut en iyi çözüm ile bunların amaç fonksiyon değerleri atanmaktadır. Satır 3'te başlangıç sıcaklık değeri belirlenmektedir. Satır 4 ile 29 arasında durdurma koşulu sağlanana kadar algoritma çalışmaktadır. Satır 6 ile 27 arasında belirlenen sayı kadar komşu çözümler denenmektedir. Satır 8'de rassal olarak üretilen komşu çözümün uygunluğu satır 9'da kontrol edilerek eğer uygunsa satır 10'da aday komşu çözüm olarak atanmaktadır. Satır 11'de aday komşu çözümün amaç fonksiyon değeri mevcut çözümle karşılaştırılmakta, eğer aday çözüm eşit veya daha küçük amaç fonksiyon değerine sahipse aday çözüm mevcut çözüm olarak atanmaktadır. Eğer daha büyükse diğer ifadeyle daha kötü bir amaç fonksiyon değerine sahipse satır 15'te bu fark hesaplanmakta, satır 16'da düzgün dağılımından 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı ile satır 17'de karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucu olumlu ise aday kötü çözüm mevcut çözüm olarak atanmaktadır. Satır 22 ile 25 arasında, algoritmanın bu adıma kadar belirlenen mevcut çözüm, en iyi çözümle karşılaştırılarak eğer eşit veya daha küçük bir amaç fonksiyonu değerine sahipse en iyi çözüm olarak atanmaktadır. Satır 28'de soğutma planı uygulanarak sıcaklık güncellenmektedir.

Algoritma 3: SA

```

1   $s \leftarrow s_0$             $f(s) \leftarrow f(s_0)$ 
2   $s_{best} \leftarrow s$        $f(s_{best}) \leftarrow f(s)$ 
3   $T \leftarrow T_0$ 
4  Repeat
5       $n \leftarrow 0$ 
6      Repeat
7           $n \leftarrow n + 1$ 
8           $s$ 'nin rassal olarak bir komşusunu üret ( $randomNeighbor(s)$ )
9          If  $randomNeighbor(s)$  is feasible
10              $s' \leftarrow randomNeighbor(s)$ 
11             If  $f(s') \leq f(s)$ 
12                  $s \leftarrow s'$ 
13                  $f(s) \leftarrow f(s')$ 
14             Else
15                  $\% \Delta = \left[ \frac{f(s') - f(s)}{f(s)} \right] * 100$ 
16                  $u \sim U[0, 1]$ 
17                 If  $u < e^{-\frac{\% \Delta}{T}}$ 
18                      $s \leftarrow s'$ 
19                      $f(s) \leftarrow f(s')$ 
20                 End if
21             End if
22             If  $f(s) \leq f(s_{best})$ 
23                  $s_{best} \leftarrow s$ 
24                  $f(s_{best}) \leftarrow f(s)$ 
25             End if
26         End if
27     Until  $n > M$ 
28      $T \leftarrow T * \alpha$ 
29 Until durdurma koşulu

```

Şekil 5.4. Tavlama benzetimi (SA) algoritması sözde kodu

Başlangıç çözümü olarak, açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımlardan elde edilen çözümler kullanılmıştır. *GR1* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan elde edilen çözüm *TB1* şeklinde isimlendirilen, *GR2* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan elde edilen çözüm *TB2* şeklinde isimlendirilen tavlama benzetimi yaklaşımında başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Böylece başlangıç çözümlerinin tavlama benzetimine olan etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

Başlangıç sıcaklığı, kötü çözümlerin yarısının ($P_{accept} = 0.5$) kabul edileceği varsayımıyla Eş. 5.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Sıcaklığın düşürülmesi kapsamında soğutma planı, lineer olarak ($\alpha = 0.95$) uygulanmıştır.

Kısıtlarının karmaşık yapısı nedeniyle uygun olmayan çözümlerden tekrar uygun çözümlere geçilmesinin uzun sürebileceği düşünüldüğünden reddetme stratejisi kullanılmıştır. Dolayısıyla uygun çözümden komşu uygun çözüme geçilemediği durumlarda algoritmanın bir sonraki adımına geçilmiştir.

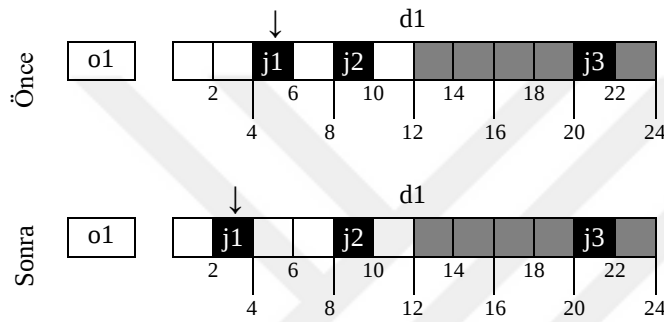
Durdurma koşulu olarak tam çözüm yaklaşımıyla süre bazında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla 10 dakikalık çalışma limiti belirlenmiştir.

Komşuluk yapısı

Komşuluk yapıları ve hareket mekanizmaları, mevcut çözümden nasıl yeni çözümler üretileceğini belirler ve tavlama benzetimi algoritmasının başarısını doğrudan etkilemektedir. Komşuluk yapısı, tavlama benzetimi algoritmasının çeşitlendirme ve yoğunlaşma dengesini sağlamada kritik bir rol oynar (Kirkpatrick ve diğerleri, 1983; Cerny, 1985; Aarts ve Korst, 1989). İyi tasarlanmış bir komşuluk yapısı, arama alanında geniş bir keşif yaparak global optimale ulaşma olasılığını artırır, aynı zamanda lokal minimumlara takılma riskini azaltır ve iyi çözümlerin yakınına odaklanmayı sağlar. Bu çerçevede, tez problemine yönelik komşuluk mekanizmaları belirlenirken çeşitlendirme ve yoğunlaşma arasındaki dinamik dengenin oluşturulması hedeflenmiştir.

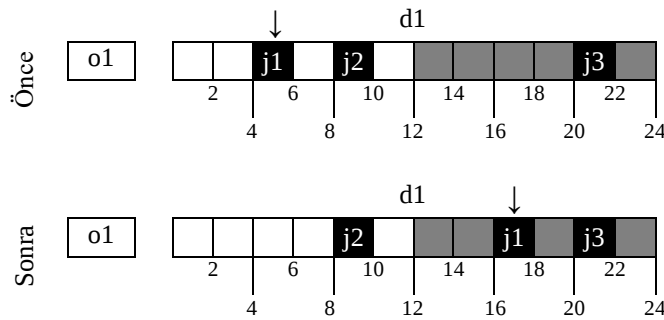
Komşu çözümler arasındaki hareketler kapsamında, Şekil 2.1 - Şekil 5.9'da verilen toplam 5 adet komşuluk mekanizması oluşturulmuştur.

Sola Kaydır (h): Rassal olarak seçilecek 1 adet j işinin başlama zamanının, operatör bilgisi aynı kalacak şekilde rassal olarak belirlenecek h birim $\{h \in \mathbb{Z} \mid h \in [0, 12]\}$ kadar erkene alınmasına yönelik mekanizmadır. Seçilen işin başlama zamanı, gündüz veya gece periyoduna kayacak şekilde çizelgenin soluna doğru değiştirilir. Seçilen işin aynı periyoda kaydırılması, gece periyodunda yapılan iş ise gündüz periyoduna kaydırılması veya tam tersi de mümkündür. Mekanizma gün değişimini de mümkün kılar. Şekil 5.5'teki örnekte, "Sola Kaydır ($h = 2$)" mekanizması kullanılarak $j1$ işinin başlama zamanı 2 birim erkene alınmıştır.



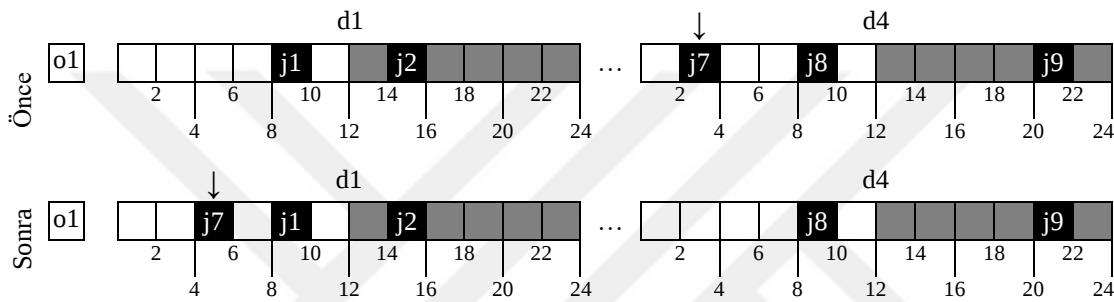
Şekil 5.5. Sola Kaydır ($h = 2$) komşuluk mekanizması

Sağa Kaydır (h): Rassal olarak seçilecek 1 adet j işinin başlama zamanının, operatör bilgisi aynı kalacak şekilde rassal olarak belirlenecek h birim $\{h \in \mathbb{Z} \mid h \in [0, 12]\}$ kadar geçte alınmasına yönelik mekanizmadır. Seçilen işin başlama zamanı, gündüz veya gece periyoduna kayacak şekilde çizelgenin sağına doğru değiştirilir. Seçilen işin aynı periyoda kaydırılması, gece periyodunda yapılan iş ise gündüz periyoduna kaydırılması veya tam tersi de mümkündür. Mekanizma gün değişimini de mümkün kılar. Şekil 5.6'daki örnekte, "Sağa Kaydır ($h = 12$)" mekanizması kullanılarak $j1$ işinin başlama zamanı 12 birim geçte alınarak gündüz periyodu yerine gece periyoduna kaydırılmıştır.



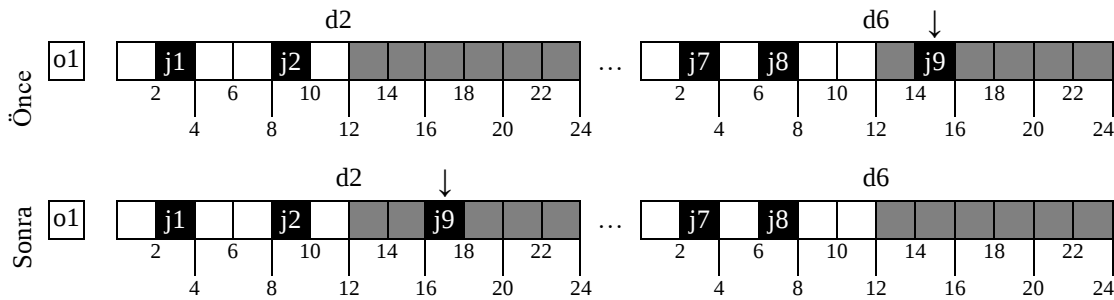
Şekil 5.6. Sağa Kaydır ($h = 12$) komşuluk mekanizması

Kaydır Gündüz (d, h): Rassal olarak seçilecek 1 adet j işinin başlama zamanının, operatör bilgisi aynı kalacak şekilde rassal olarak seçilecek ve başlangıç çözümünün gün değerini geçmeyecek diğer rassal olarak belirlenecek d günü h saati $\{d, h \in \mathbb{Z} \mid d \in [1, |D_{s_0}|], h \in [0, 11]\}$ gündüz periyoduna kaydırılmasına yönelik mekanizmadır. Seçilen işin çizelgenin sağına veya soluna kaydırılması, dolayısıyla o ana kadar ki en iyi çözümden daha kötü değere sahip çözümlerin de elde edilmesi mümkündür. Örnek, Şekil 5.7’de verilmiştir. Eğer algoritma bu komşuluk mekanizmasına uygun bir çözüm bulamazsa belirli bir iterasyon sonra döngüden çıkar.



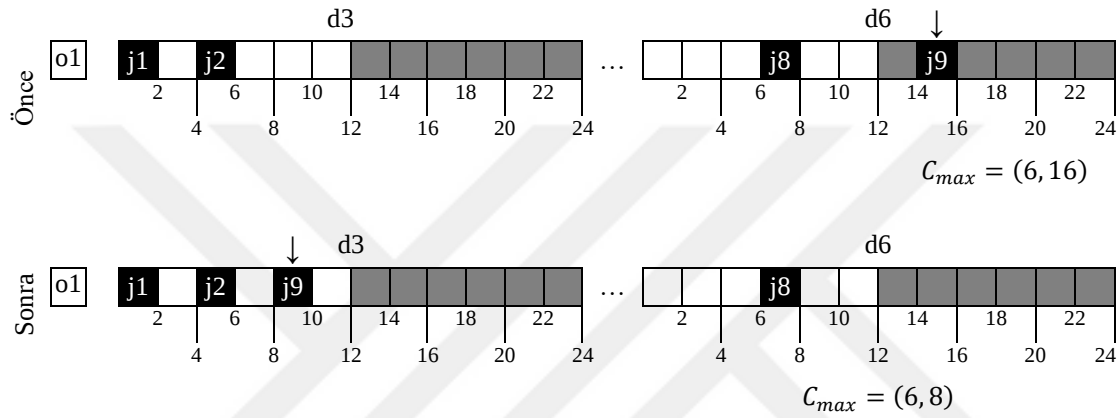
Şekil 5.7. Kaydır Gündüz ($d = 1, h = 4$) komşuluk mekanizması

Kaydır Gece (d, h): Rassal olarak seçilecek 1 adet j işinin başlama zamanının, operatör bilgisi aynı kalacak şekilde rassal olarak seçilecek ve başlangıç çözümünün gün değerini geçmeyecek diğer rassal olarak belirlenecek d günü h saati $\{d, h \in \mathbb{Z} \mid d \in [1, |D_{s_0}|], h \in [0, 11]\}$ gece periyoduna kaydırılmasına yönelik mekanizmadır. Seçilen işin çizelgenin sağına veya soluna kaydırılması, dolayısıyla o ana kadar ki en iyi çözümden daha kötü değere sahip çözümlerin de elde edilmesi mümkündür. Örnek, Şekil 5.8’de verilmiştir. Eğer algoritma bu komşuluk mekanizmasına uygun bir çözüm bulamazsa belirli bir iterasyon sonra döngüden çıkar.



Şekil 5.8. Kaydır Gece ($d = 2, h = 16$) komşuluk mekanizması

Sola Kaydır Son İş (d, h): Mevcut çözümdeki tamamlanma zamanı en son olan j işinin başlama zamanının, operatör bilgisi aynı kalacak şekilde rassal olarak belirlenecek d günü h saatine $\{d, h \in \mathbb{Z} \mid d \in [1, |D_{s_0}| - 1], h \in [0, 11]\}$ kaydırılmasına yönelik mekanizmadır. Seçilen işin aynı periyoda kaydırılması, gece periyodunda yapılan iş ise gündüz periyoduna kaydırılması veya tam tersi de mümkündür. Ancak, sola kaydırılmanın gerçekleştirilmesi için maksadıyla son işin bulunduğu gün hariç diğer günlerin seçilmesi sağlanır. Örnek, Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Sola Kaydır Son İş ($d = 3, h = 8$) komşuluk mekanizması

Tüm komşuluk mekanizmaları incelendiğinde komşuluk yapıları arasında geçişin rassal olarak gerçekleştiği görülmektedir. Ancak çözümlerin iyileşmesi için mevcut çözümde tamamlanma zamanı en fazla olan işin çizelgenin soluna doğru kaydırılması gerekmektedir. Bu nedenle komşuluk mekanizmalarının seçiminde olasılıklı seçim yöntemi kullanılmış ve “Sola Kaydır Son İş (d, h)” komşuluk mekanizmasının seçim olasılığının daha fazla olması tercih edilmiştir. Bu çerçevede, düzgün dağılım esas alınarak düzenlenen komşuluk mekanizmaları seçim olasılıkları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Komşuluk mekanizmaları seçim olasılıkları

Komşuluk mekanizması	Seçim olasılığı
Sola Kaydır (h)	0,165
Sağa Kaydır (h)	0,165
Kaydır Gündüz (d, h)	0,165
Kaydır Gece (d, h)	0,165
Sola Kaydır Son İş (d, h)	0,340

Çözüm yaklaşımlarının detaylarının açıklandığı, ayrıca açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım ve tavlama benzetimi yaklaşımının sözde kodlarının verildiği bu bölümde, anlaşılabileceği üzere bir test problem için 8 farklı çözüm üretilmesi ve sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir.

Öncelikle, işlerin azalan ve artan işlem süreli olarak sıralanmasının ardından farklı iş yükü kategorilerine göre *GR1* ve *GR2* açgözlü kurucu sezgisel algoritmaları çalıştırılmakta ve daha küçük amaç fonksiyonuna sahip olanlar seçilmektedir. Sonuçta, *GR1* ve *GR2* açgözlü kurucu sezgisel algoritmalarından 2 adet amaç fonksiyonu değeri ve 2 adet çözüm kümesi elde edilmektedir.

GR1 açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımın elde edilen amaç fonksiyonu değeri *ES1* olarak isimlendirilen tam çözüm yaklaşımında, *GR2* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımın elde edilen amaç fonksiyonu değeri *ES2* olarak isimlendirilen tam çözüm yaklaşımında üst sınır olarak kullanılmaktadır. Böylece, farklı üst sınır değerlerinin çözücü performansına olan etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. *ES1* ve *ES2* tam çözüm yaklaşımlarının her ikisinde de Eş. 5.1 ile belirlenen alt sınır değeri kullanılmaktadır.

GR1 açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımın elde edilen çözüm *WS1* olarak isimlendirilen tam çözüm yaklaşımında, *GR2* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımın elde edilen çözüm *WS2* olarak isimlendirilen tam çözüm yaklaşımında sıcak başlangıç çözümü olarak kullanılmaktadır. Böylece, farklı sıcak başlangıç çözümlerinin çözücü performansına olan etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. *WS1* ve *WS2* tam çözüm yaklaşımlarının her ikisinde de Eş. 5.1 ile belirlenen alt sınır değeri kullanılmaktadır.

Benzer şekilde, *GR1* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan elde edilen çözüm *TB1* şeklinde isimlendirilen, *GR2* açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan elde edilen çözüm *TB2* şeklinde isimlendirilen tavlama benzetimi yaklaşımında başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Böylece başlangıç çözümlerinin tavlama benzetimine olan etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

Kullanılan yaklaşımların isimlendirilmesi ve açıklamalarının yer aldığı tablo Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Çözüm yaklaşımlarının isimlendirilmesi

Yaklaşım İsmi	Açıklama
<i>GR1</i>	Normal iş yükü kategorisi (L^{normal}) için açgözlü kurucu sezgisel
<i>GR2</i>	Ağır iş yükü kategorisi ($L^{ağır}$) için açgözlü kurucu sezgisel
<i>ES1</i>	$GR1_{C_{max}}$ değerini üst sınır olarak kullanan tam çözüm
<i>ES2</i>	$GR2_{C_{max}}$ değerini üst sınır olarak kullanan tam çözüm
<i>WS1</i>	$GR1_{C_{max}}$ çözümünü sıcak başlangıç olarak kullanan tam çözüm
<i>WS2</i>	$GR2_{C_{max}}$ çözümünü sıcak başlangıç olarak kullanan tam çözüm
<i>SA1</i>	$GR1_{C_{max}}$ çözümünü başlangıç çözümü olarak kullanan tavlama benzetimi
<i>SA2</i>	$GR2_{C_{max}}$ çözümünü başlangıç çözümü olarak kullanan tavlama benzetimi

6. TEST PROBLEMLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması maksadıyla yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Tam çözüm yaklaşımı kapsamında, problemin tam sayı programlama modeli, IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (Versiyon 22.1.1.0) uygulamasında OPL programlama dilinde kodlanarak CPLEX 22.1.1.0 çözücüsü kullanılarak varsayılan optimalite farkı (%0,01) ve optimalite ve uygunluk dengeli olacak şekilde çözdürülmüştür.

Açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar ve metasezgisel yaklaşım kapsamında kullanılan tavlama benzetimi algoritması Visual Studio 2022 (Versiyon 17.4.1) uygulamasında C# programlama dilinde kodlanmıştır. Ayrıca, CPLEX ile açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar sezgiseller arasında veri alışverişi sağlanması maksadıyla ara yüz geliştirilmiştir.

Tüm yaklaşımlarda test problemleri Intel i7 2.20 GHz 8 çekirdek işlemci ve 64 bit Windows işletim sistemine sahip bilgisayar kullanılarak çözdürülmüştür.

Açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar ve tavlama benzetimi algoritması için geliştirilen program, doğru çözümlerin üretildiğinin kontrol edilmesi maksadıyla görselleştirilmiştir. Böylece, Gantt çizelgesi üzerinde işlerin başlama ve bitiş zamanları görülebilmüş, sonuçların doğruluğu gözle de kontrol edilmiştir. Geliştirilen program, genel parametreler ile iş tipi ve sayılarını dışarıdan okuyabilecek şekilde tasarlanmıştır.

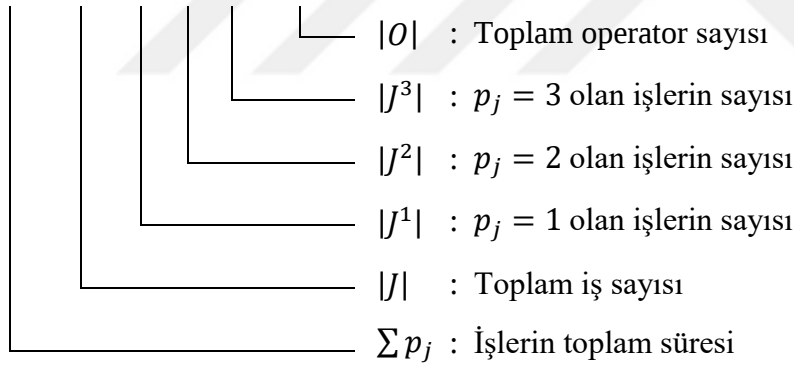
Bununla birlikte, problemin matematiksel modeli ile açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar ve tavlama benzetimi algoritmalarının karşılıklı olarak doğrulaması yapılmıştır. Açgözlü kurucu sezgisel algoritmalarından elde edilen her bir çözüm sıcak başlangıç noktası olarak tam yaklaşım kapsamında CPLEX çözücüsüne verilmiştir. CPLEX çözücüsünün kayıtları üzerinden bu çözümlerin uygun oldukları her koşulunda kontrol edilmiştir.

Yaklaşımların etkinliğinin karşılaştırılması maksadıyla farklı operatör konfigürasyonlarında toplam iş süresi ve iş sayısı aynı olan azami sayıda test problemi üretilmesi amaçlanmıştır.

6.1. Test Problemleri

Tez problemi organizasyona özgü olduğundan ve özel kısıtlar içerdiğinden literatürde kıyaslama yapılabilecek hazır veri setleri ve kütüphaneler ile karşılaşılmamıştır. Bu nedenle, test problemleri rastgele üretilmiştir. Aynı toplam iş süresine sahip farklı sayıda iş tiplerinden oluşan toplam iş sayısı değişik test problemleri bulunabilir. Bunun tersi de mümkündür. Farklı toplam iş sayısına sahip toplam iş süresine aynı olan test problemleri bulunabilir. İş tipi sayılarının kombinasyonları ile pratikte her iki durum için de binlerce test problemi üretmek mümkündür. Makine çalışma kapasitesine yönelik kısıt ve problemin basitleştirilmesi maksadıyla iş tiplerinin işlem süreleri sadece 1, 2 ve 3 tam saat değerlerini alabilecek şekilde test problemleri türetilmiştir. Test problemleri Şekil 6.1'deki gibi isimlendirilmiştir. Örneğin; $tP30-j16-(07-04-05)-o01$ isimli test probleminde; 'tek makine 1 operatör' konfigürasyonunda 7 adet 1 saat, 4 adet 2 saat ve 5 adet 3 saat işlem sürelerine sahip toplam 16 adet işin toplam işlem süresinin 30 saat olduğu anlaşılır.

$tP30-j16-(07-04-05)-o01$



Şekil 6.1. Test problemlerinin isimlendirilmesi

Test problemleri oluşturulurken aynı toplam süreye sahip problemlerin iş tipi sayılarının dağılımının mümkün olduğu ölçüde farklı kombinasyonları içermesi hedeflenmiştir. Örneğin; toplam işlem süresi 48 saat olan $tP48-j48(48-00-00)-o01$, $tP48-j24(00-24-00)-o01$, $tP48-j16(00-00-16)-o01$ ve $tP48-j24(08-08-08)-o01$ isimli iş tipi dağılımları farklı olan test problemi oluşturulmuştur. Aynı test problemlerinin mümkün olduğunca 'tek makine 2 operatör' konfigürasyonu için de oluşturulması hedeflenmiştir. Test problemlerinin tümünde kullanılan ortak parametreler ve değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Test problemlerinde kullanılan ortak parametreler ve değerleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
α	1.5	L^{gece}	3	$R^{gece'}$	8
L^{ay}	60	$N^{gün}$	8	$R^{ağır}$	24
$L^{gün}$	8	$N^{gündüz}$	3	β	2
L^{normal}	5	N^{gece}	2	γ	2
$L^{gündüz}$	5	R^{gece}	2		

Gece yapılan işler için yorgunluk katsayısı, α parametresi ile 1,5 uygulanır. Bu katsayı hem günlük hem de aylık olarak iş yükü hesaplamasına etki eder. Örneğin; bir operatör bir günde 3 saat gündüz ve 2 saat gece çalışırsa günlük iş yükü 6 saat olarak hesaplanır ve o gün için ağır iş yükü kategorisinde iş yapmış olur. Bu durumda aylık en fazla çalışma süresinden de geriye 54 saat kalır. Bir operatörün günlük iş yükü $L^{gün}$ parametresi ile en fazla 8 saat, aylık iş yükü L^{ay} parametresi ile en fazla 60 saat olabilir. Her iki iş yükü hesaplamasında da gece periyodunda yapılan işler için yorgunluk katsayısı uygulanır. Günlük iş yükü; L^{normal} parametresi ile 5 saat ve altında ise normal kategori, 5 saatin üzerinde ise ağır kategori olarak sınıflandırılır. Gece periyodunda yapılan işlere yorgunluk katsayısı uygulandığı için iş yükü hesaplanması sonucunun ondalık sayı çıkma ihtimali vardır. Örneğin; bir operatör bir günde 4 saat gündüz ve 1 saat gece çalışırsa günlük iş yükü 5,5 saat olarak hesaplanır. Bu durumda ilgili operatör o gün için fiili olarak 5 saat çalışmasında rağmen hesaplama sonucunda ağır kategori iş yükü yapmış sayılır. Bir operatör gece fiili olarak (yorgunluk katsayısı uygulanmaksızın) L^{gece} parametresiyle en fazla 3 saat çalıştırılabilir ve operatöre bu gece periyodunda N^{gece} parametresiyle en fazla 2 adet iş yaptırılabilir. Bu durumda gece periyodunda operatöre 3 saat içerisinde en fazla 2 adet iş yaptırılabilir. Bu parametrelere verilen değerler, dolaylı olarak bir operatöre gece periyodunda 1 saatlik 3 adet iş verilemeyeceğini de belirlemektedir. Gece periyodunda iş yapılması durumunda bir operatör gündüz periyodunda $L^{gündüz}$ parametresi ile en fazla 5 saat çalıştırılabilir ve gündüz periyodunda $N^{gündüz}$ parametresi ile en fazla 5 adet iş yapabilir. Örneğin; 2 adet 3 saatlik ve 1 adet 1 saatlik iş olsun. Eğer 1 saatlik iş gece periyodunda yapılırsa aynı günün gündüzün 2 adet 3 saatlik iş yapılamaz, 3 saatlik işlerden sadece bir tanesi planlanabilir.

Gece yapılan her bir iş öncesinde operatöre R^{gece} parametresiyle 2 saat kesintisiz dinlenme süresi verilir. Örneğin; gece periyoduna süre olarak ilk önce 1 adet 1 saatlik ve sonra 1 adet 2 saatlik iş planlansın. İlk iş öncesinde operatöre 2 saat kesintisiz dinlenme verilir. Sonraki iş öncesinde de operatöre 2 saat kesintisiz dinlenme süresi verilir. Dolayısıyla gece periyodunda yapılacak bu işlerin kendi aralarında da en az 2 saatlik dinlenme süresi olması gerekir. Gece periyodunda yapılan son iş sonrasında operatöre $R^{gece'}$ parametresiyle 8 saat kesintisiz dinlenme süresi verilir. Gece periyodunda yapılabilecek en fazla iş sayısı N^{gece} parametresinin değerine bağlı olarak birden fazla olabilir. Gece yapılan ilk iş sonrasında kesintisiz dinlenme süresi uygulaması yoktur.

Ağır iş yükü kategorisinde ardışık olarak β parametresi ile 2 gün çalışan operatöre yaptığı son iş sonrasında $R^{ağır}$ parametresi ile 24 saat kesintisiz dinlenme süresi verilir. Art arda 2 gün boyunca günlük olarak ağır kategori iş yapan bir operatöre yaptığı son iş sonrasında 24 saat kesintisiz dinlenme süresi verilir. Problemin yapısı gereği izin günleri çizelgeleme ve tur çizelgeleme problemlerindeki gibi tüm gün bazında dinlenme süresi uygulanmadığından β parametresinin alacağı değerden daha fazla ardışık olarak ağır kategori iş yükü oluşabilir. Örneğin; ardışık 2 gün sadece gündüz periyodunda ağır kategori iş yükü altında çalışan bir personel, yaptığı son iş sonrasında 24 saat kesintisiz dinlendikten sonra ertesi gün çizelgenin uygunluğuna göre yine ağır kategori iş yükü yapması mümkün olabilir. Buna benzer durumlar test problemlerinin sonuçlarında gözlemlenmiştir. Ağır iş yükü kategorisinde ardışık olarak 2 gün çalışma döngüsü aylık olarak en fazla γ parametresiyle 2 defa tekrarlanabilir. Bu durumda ardışık olarak 6 gün ağır kategori iş yükü oluşacak şekilde çizelge oluşturulamaz.

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu için 28 adet, ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonu için 36 adet, ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonu için 20 adet test problemi üretilmiştir. 17 adet test problemi tüm konfigürasyonlar için, 25 adet test problemi ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonları için, 20 adet test problemi ‘tek makine 2 operatör’ ve ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonları için, 17 adet test problemi ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonları için aynı işlem süresi ve iş sayısına sahiptir. Operatör konfigürasyonu dikkate alınmadığında toplamda 39 adet farklı işlem süresi ve iş sayısına sahip test problemi bulunmaktadır.

6.2. Sayısal Sonuçlar

Çalışma limiti; CPLEX çözücü için 3600 saniye (1 saat) ve tavlama benzetimi algoritması için 600 saniye (10 dakika) olarak belirlemiştir. Operatör sayısı 1 olarak seçildiğinde ‘tek makine n operatör’ modeli ile ‘tek makine 1 operatör’ modeli aynı sonuçları ürettiğinden tüm test problemleri ‘tek makine n operatör’ modeli kullanılarak çözdürülmüştür.

tP60-j60-(60-00-00)-o02 test problemine ait örnek çözümler Şekil 6.2 - Şekil 6.7’dir. Çizelgelenen işler mavi boyalı, gerekli dinlenme süreleri çapraz desenli gösterilmiştir.

		Gündüz														Gündüz											
d_1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
o_1	5	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅																					
o_2	5						j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀																
d_2		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
o_1	5	j ₁₁	j ₁₂	j ₁₃	j ₁₄	j ₁₅																					
o_2	5						j ₁₆	j ₁₇	j ₁₈	j ₁₉	j ₂₀																
d_3		49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60			61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
o_1	5	j ₂₁	j ₂₂	j ₂₃	j ₂₄	j ₂₅																					
o_2	5						j ₂₆	j ₂₇	j ₂₈	j ₂₉	j ₃₀																
d_4		73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84			85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
o_1	5	j ₃₁	j ₃₂	j ₃₃	j ₃₄	j ₃₅																					
o_2	5						j ₃₆	j ₃₇	j ₃₈	j ₃₉	j ₄₀																
d_5		97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108			109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
o_1	5	j ₄₁	j ₄₂	j ₄₃	j ₄₄	j ₄₅																					
o_2	5						j ₄₆	j ₄₇	j ₄₈	j ₄₉	j ₅₀																
d_6		121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132			133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
o_1	5	j ₅₁	j ₅₂	j ₅₃	j ₅₄	j ₅₅																					
o_2	5						j ₅₆	j ₅₇	j ₅₈	j ₅₉	j ₆₀																

Şekil 6.2. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi GR1 çözümü

Örnek çözümlerin yer aldığı çizelgelerde kullanılan parametreler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Tüm günlerde normal kategori iş yükünde ve gündüz periyodunda çalışıldığı için Şekil 6.2’de verilen *GR1* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işler hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunmadığı görülmektedir. Diğer çözümlerle karşılaştırıldığında en kötü amaç fonksiyon değerine ($C_{max} = 130$) sahiptir.

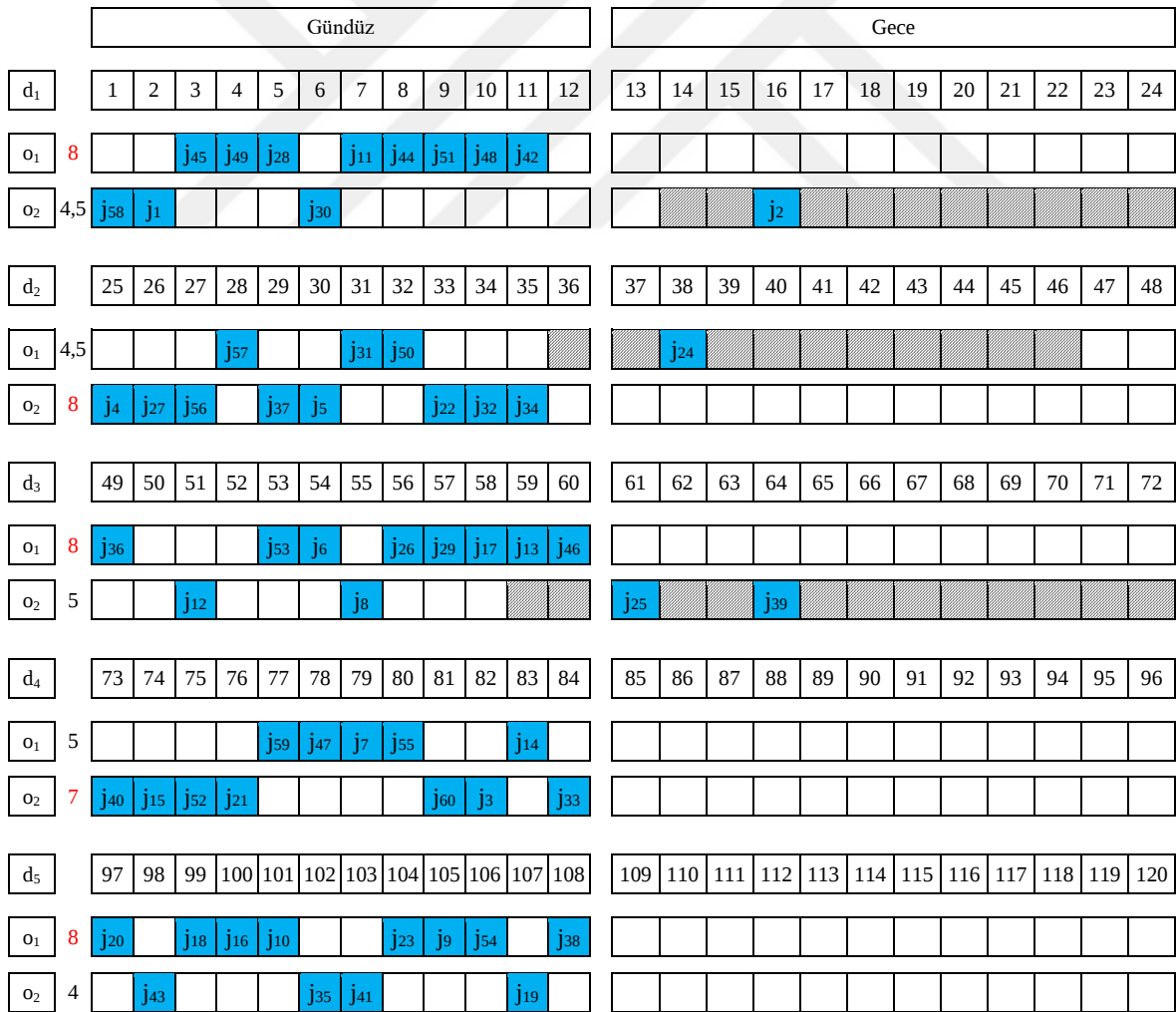
Şekil 6.3’te verilen *GR2* çözümünde ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin çizelgede yer aldığı fakat gece periyoduna hiç iş çizelgelenmediği için bununla ilgili dinlenme sürelerinin bulunmadığı görülmektedir. 1 no.lu operatör 2 defa ardışık ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. Algoritmanın ağgözlü yapısından dolayı operatörler arasındaki iş yükü dengeli dağılmamıştır.

	Gündüz	Gece
d_1	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
O_1 8^1	j ₁ j ₂ j ₃ j ₄ j ₅ j ₆ j ₇ j ₈	
O_2 4	j ₉ j ₁₀ j ₁₁ j ₁₂	
d_2	25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
O_1 8^2	j ₁₃ j ₁₄ j ₁₅ j ₁₆ j ₁₇ j ₁₈ j ₁₉ j ₂₀	
O_2 4	j ₂₁ j ₂₂ j ₂₃ j ₂₄	
d_3	49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60	61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72
O_1 4	j ₃₃ j ₃₄ j ₃₅ j ₃₆	
O_2 8	j ₂₅ j ₂₆ j ₂₇ j ₂₈ j ₂₉ j ₃₀ j ₃₁ j ₃₂	
d_4	73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84	85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96
O_1 8^1	j ₃₇ j ₃₈ j ₃₉ j ₄₀ j ₄₁ j ₄₂ j ₄₃ j ₄₄	
O_2 4	j ₄₅ j ₄₆ j ₄₇ j ₄₈	
d_5	97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108	109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120
O_1 8^2	j ₄₉ j ₅₀ j ₅₁ j ₅₂ j ₅₃ j ₅₄ j ₅₅ j ₅₆	
O_2 4	j ₅₇ j ₅₈ j ₅₉ j ₆₀	

Şekil 6.3. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi *GR2* çözümü

Şekil 6.4'te verilen *ES1* çözümünde gece periyodunda yapılan işlere yönelik dinlenme sürelerinin çizelgede yer aldığı fakat ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunmadığı görülmektedir. 1 no.lu operatör tarafından 5 günde 3 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. Ancak, bu ağır iş yükü oluşan günler ardışık olarak gerçekleşmediğinden dinlenme sürelerine ihtiyaç duyulmamıştır.

ES1 çözümü incelendiğinde, 1 no.lu operatör için toplam 33 adet işin 33,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 27 adet işin 28,5 saatlik bir iş yükü oluşturduğu görülmektedir. 2 no.lu operatöre gece periyodunda 3 adet iş yaptırılırken, 1 no.lu operatöre gece periyodunda sadece 1 adet iş yaptırılmıştır. *ES1* ile *GR2* aynı amaç fonksiyonu değerine ($C_{max} = 108$) sahiptir. Ancak, *GR2* çözümünde gece periyoduna iş çizelgelenmemiştir.

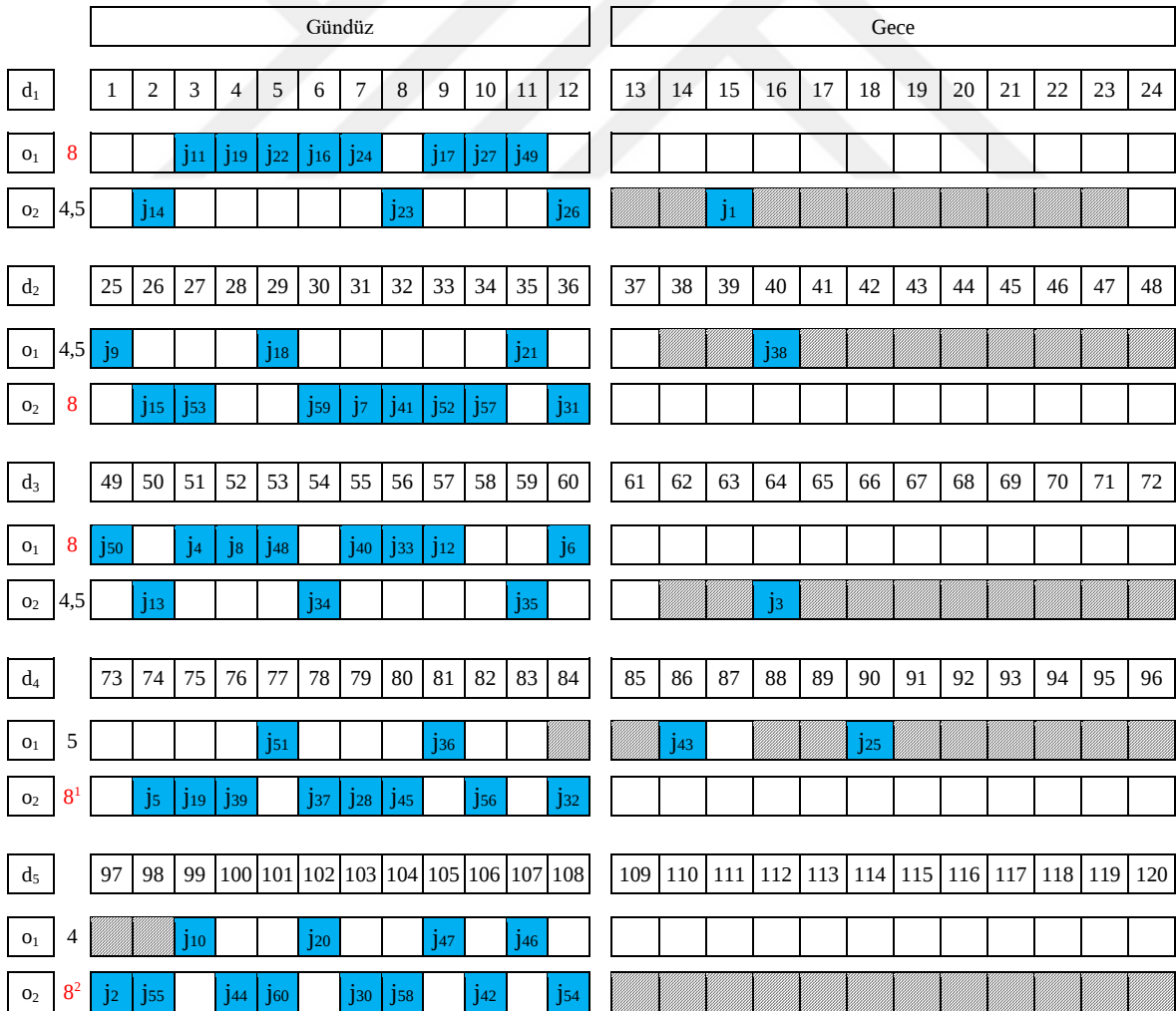


Şekil 6.4. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi *ES1* çözümü

Şekil 6.5’de verilen *ES2* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik dinlenme sürelerinin hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 2 no.lu operatör tarafından 5 günde 3 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşılmış ve sadece 1 defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuştur.

ES2 çözümü incelendiğinde, 1 no.lu operatör için toplam 28 adet işin 29,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 32 adet işin 33 saatlik toplam iş yükü oluşturduğu görülmektedir. Gece periyodunda 1 no.lu operatöre 3 adet iş yaptırılırken, 2 no.lu operatöre 2 adet iş yaptırılmıştır.

ES2, *ES1* ile *GR2* aynı amaç fonksiyonu değerine ($C_{max} = 108$) sahiptir. Ancak, bu 3 çözüm yaklaşımıyla üretilen tüm çözümler birbirinden farklıdır.

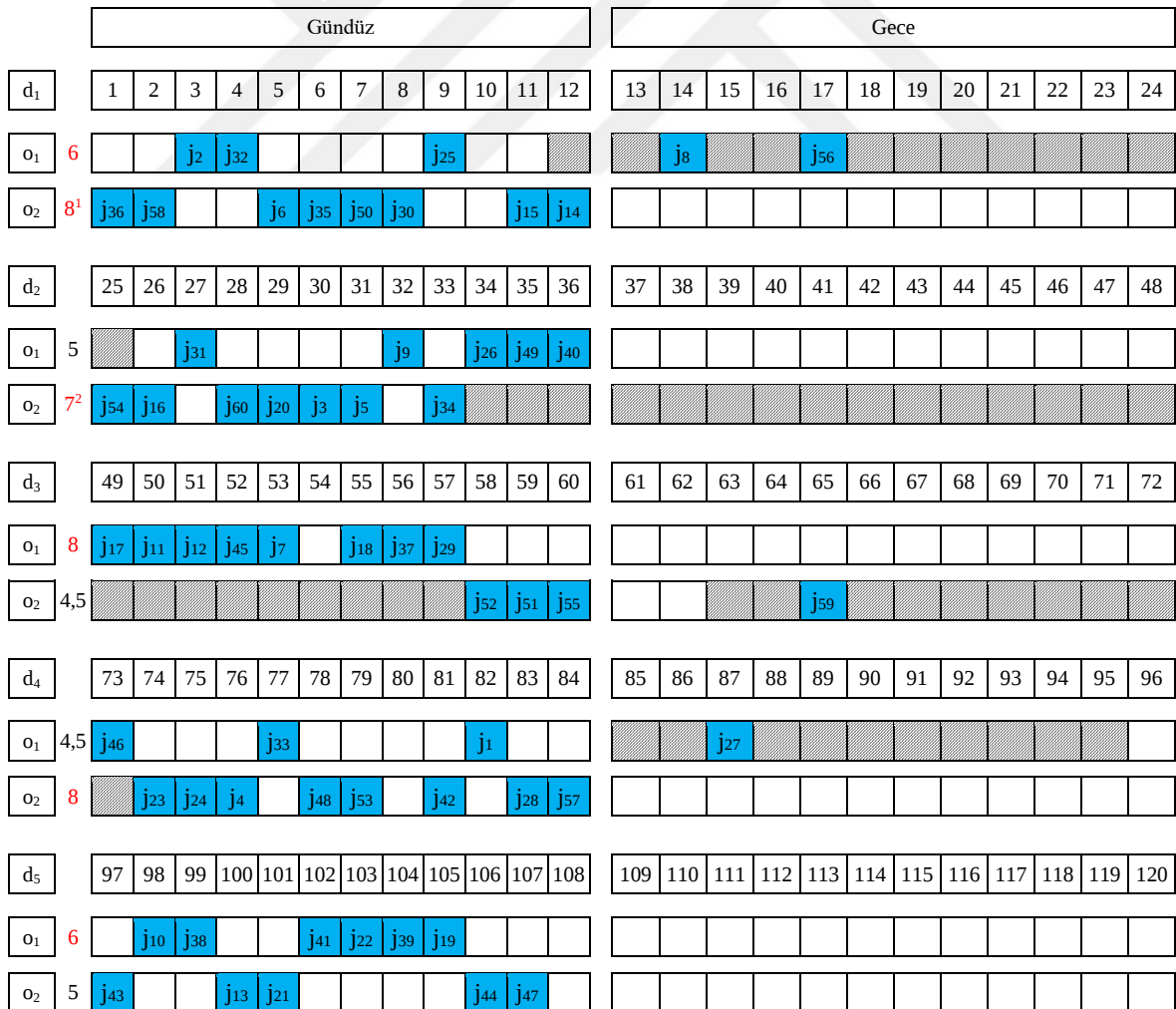


Şekil 6.5. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi *ES2* çözümü

Şekil 6.6'da verilen *WS1* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik dinlenme sürelerinin hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 5 günde her iki operatör tarafından da 3 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşılmış ve sadece 2 no.lu operatör için 1 defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuştur.

WS1 çözümü incelendiğinde, 1 no.lu operatör için toplam 28 adet işin 29,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 32 adet işin 27,5 saatlik toplam iş yükü olduğu görülmektedir. Gece periyodunda 1 no.lu operatöre 3 adet iş yaptırılırken, 2 no.lu operatöre 1 adet iş yaptırılmamıştır.

WS1, $C_{max} = 108$ amaç fonksiyon değeri ile *GR2*, *ES1* ile *ES2*'den 1 saat daha iyi bir çözüm üretmiştir.

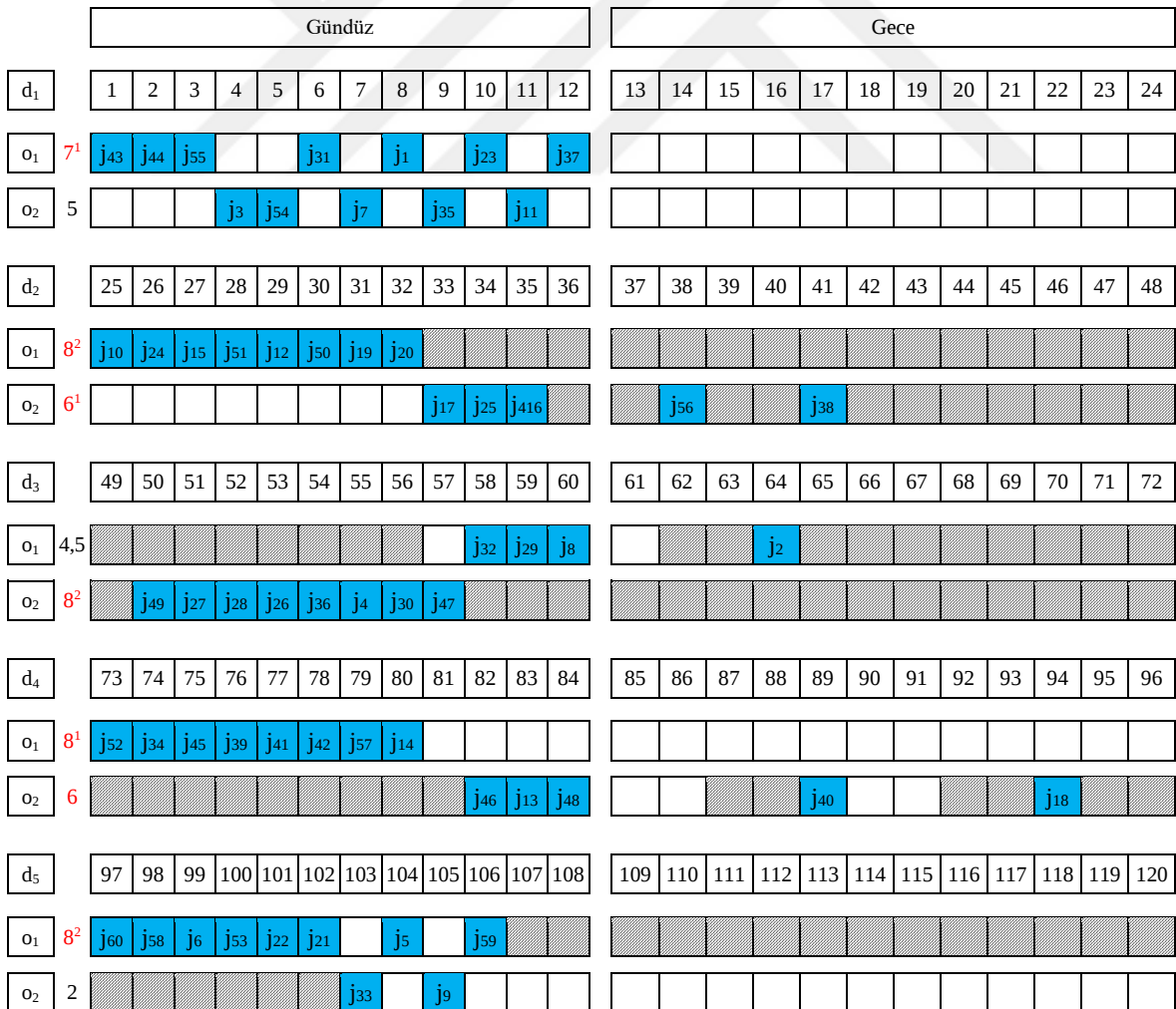


Şekil 6.6. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi *WS1* çözümü

Şekil 6.7’de verilen *WS2* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 5 günde, 1 no.lu operatör tarafından 4 defa, 2 no.lu operatör tarafından 3 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. 1 no.lu operatör tarafından 2 defa, 2 no.lu operatör tarafından 1 defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuştur.

WS2 çözümü incelendiğinde, 1 no.lu operatör için toplam 35 adet işin 35,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 25 adet işin 27 saatlik toplam iş yükü olduğu görülmektedir. Gece periyodunda 1 no.lu operatöre sadece 1 adet iş yaptırılırken, 2 no.lu operatöre 4 adet iş yaptırılmıştır.

WS2, $C_{max} = 106$ amaç fonksiyon değeri ile *WS1*’den 1 saat daha iyi bir çözüm üretmiştir. Dolayısıyla sıcak başlatma tekniği olumlu katkıda bulunmuştur.



Şekil 6.7. *tP60-j60-(60-00-00)-o02* test problemi *WS2* çözümü

Tam çözüm yaklaşımı genel değerlendirme

‘Tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonlarına ait test problemlerinin tam çözüm yaklaşımıyla elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’te verilmiştir. Daha kolay karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla çizelgelerde açgözlü sezgisel kurucu algoritmalara ait sonuçlarla birlikte tam çözüm yaklaşımının tüm konfigürasyonlarına ait sonuçlar aynı tabloda gösterilmiştir. Dolayısıyla her bir test bir problemi tam çözüm yaklaşımıyla farklı konfigürasyonda 4 defa çözdürülmüştür. Açgözlü sezgisel kurucu algoritmaların amaç fonksiyon değerleri üst sınır olarak kullanılmıştır.

Aynı sütunlara sahip olduğundan her iki çizelgeye ait açıklamalar birlikte sunulmuştur. İlk ve ikinci ana sütun sırasıyla problemin ismini ve uygulanan alt sınırı (*LB*) belirtmektedir. Üçüncü ve dördüncü ana sütunda, sırasıyla birinci açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım (*GR1*) ve ikinci açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan (*GR2*) elde edilen üst sınır (*UB*) ve çözüm süresi (*t*) gösterilmektedir. Geriye kalan dört ana sütunda, sırasıyla birinci tam çözüm yaklaşımı (*ES1*), ikinci tam çözüm yaklaşımı (*ES2*), sıcak başlangıç tekniği uygulanmış birinci tam çözüm yaklaşımı (*WS1*) ve sıcak başlangıç tekniği uygulanmış ikinci tam çözüm yaklaşımından (*WS2*) elde edilen amaç fonksiyonu değeri (C_{max}), çözüm süresi (*t*) ve optimalite farkı (*g*) gösterilmektedir. CPLEX çözücüsünün optimalite farkı Eş. 6.1 ile hesaplanmaktadır.

$$g = |En\ iyi\ sınır - En\ iyi\ tam\ sayı| / (1e - 10 + |En\ iyi\ tam\ sayı|) \quad (6.1)$$

Anlaşılabacağı üzere tam çözüm yaklaşımının 4 farklı konfigürasyonu bulunmaktadır. Tüm çözüm yaklaşımlar için amaç fonksiyon değerleri saat ve çözüm süreleri saniye cinsinden verilmiştir. Amaç fonksiyon değerleri yanında yer alan küçük yıldız işareti (*) optimal çözüme ulaşıldığını belirtmektedir. Çözüm süreleri sütununda yer alan tek hançer işareti (†) çalışma limitinin aşıldığını, amaç fonksiyonu sütununda yer alan çift hançer işareti (‡) çalışma limiti içerisinde herhangi bir çözüme ulaşamadığını belirtmektedir. Dolayısıyla çalışma limiti içerisinde herhangi bir çözüme ulaşamayan test problemlerinin optimalite fark değeri bulunmamaktadır ve bu durum çizelgelerde tire (-) işareti ile belirtilmektedir.

Çizelge 6.2. Tek makine 1 operatör tam yaklaşım sonuçları

Problem	GR1			GR2			ES1			ES2			WS1			WS2		
	LB	UB	t	UB	t	t	c_{max}	t	g	c_{max}	t	g	c_{max}	t	g	c_{max}	t	g
tP24-j24(24-00-00)-o01	56	100	0,003	76	0,013	75*	75*	5	0,00	75*	2	0,00	75*	9	0,00	75*	3	0,00
tP24-j12(00-12-00)-o01	56	124	0,003	74	0,013	74*	74*	33	0,00	74*	9	0,00	74*	27	0,00	74*	4	0,00
tP24-j08(00-00-08)-o01	56	171	0,003	78	0,013	78*	78*	37	0,00	78*	26	0,00	78*	39	0,00	78*	20	0,00
tP32-j32(32-00-00)-o01	80	146	0,003	100	0,013	100*	100*	156	0,00	100*	18	0,00	100*	55	0,00	100*	31	0,00
tP32-j16(00-16-00)-o01	80	172	0,003	106	0,013	100*	100*	176	0,00	100*	437	0,00	100*	305	0,00	100*	266	0,00
tP32-j11(00-01-10)-o01	80	219	0,003	108	0,013	108	108	†	5,56	108	†	4,63	123	†	17,89	108	†	3,70
tP32-26(20-06-00)-o01	80	146	0,003	100	0,014	100	100	†	1,00	100*	1255	0,00	101	†	6,93	100*	188	0,00
tP32-24(16-08-00)-o01	80	146	0,003	100	0,014	100	100	†	1,00	100*	141	0,00	100	†	18,00	100*	1609	0,00
tP32-22(12-10-00)-o01	80	146	0,003	106	0,012	100	100	†	4,00	100*	2686	0,00	100	†	17,80	100	†	11,00
tP32-17(07-05-05)-o01	80	146	0,003	107	0,012	100	100	†	14,80	100	†	1,00	100	†	9,00	100*	1132	0,00
tP32-14(02-06-06)-o01	80	146	0,003	108	0,012	100	100	†	16,00	100	†	2,00	100	†	2,00	100*	1713	0,00
tP32-13(00-07-06)-o01	80	146	0,003	108	0,014	100	100	†	1,00	100	†	11,00	100*	542	0,00	100	†	11,00
tP40-j40(40-00-00)-o01	104	173	0,003	132	0,016	126*	126*	542	0,00	126*	653	0,00	126*	444	0,00	126*	1188	0,00
tP40-j20(00-20-00)-o01	104	220	0,003	124	0,013	124*	124*	1418	0,00	124*	525	0,00	124*	1175	0,00	124*	2400	0,00
tP40-j25(10-15-00)-o01	104	173	0,003	124	0,012	125	125	†	3,20	124*	323	0,00	124	†	13,71	124*	1065	0,00
tP40-j30(20-10-00)-o01	104	173	0,003	128	0,017	124	124	†	2,42	125	†	16,18	124	†	2,42	124	†	0,81
tP40-j20(05-10-05)-o01	104	173	0,003	125	0,016	124	124	†	0,81	125	†	0,80	124	†	0,81	124	†	0,81
tP40-j14(01-00-13)-o01	104	291	0,003	150	0,014	171	171	†	26,90	†	†	-	150	†	18,00	150	†	14,00
tP40-j15(00-05-10)-o01	104	219	0,003	147	0,015	124	124	†	0,81	124	†	0,81	124	†	0,81	124	†	0,81
tP40-j22(10-06-06)-o01	104	173	0,003	145	0,017	125	125	†	1,61	125	†	5,67	124	†	2,42	124	†	2,42

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

‡ 1 saat çalışma limiti içerisinde çözüm bulunamamıştır.

Çizelge 6.2 (devam) Tek makine 1 operatör tam yaklaşım sonuçları

Problem	GR1			GR2			ES1			ES2			WS1			WS2		
	LB	UB	t	UB	t	t	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g
tP48-j48(48-00-00)-o01	128	219	0,003	152	0,018	151	†	0,66	151*	2149	0,00	0,00	151*	649	0,00	151*	1592	0,00
tP48-j24(00-24-00)-o01	128	268	0,003	152	0,014	152	†	1,97	152*	1900	0,00	0,00	152	†	1,97	152	†	1,97
tP48-j16(00-00-16)-o01	128	363	0,003	198	0,014	198	†	22,7	†	†	-	-	198	†	22,20	198	†	23,7
tP48-j24(08-08-08)-o01	128	219	0,003	169	0,017	151	†	2,65	151	†	1,99	1,99	151	†	2,65	151	†	2,65
tP60-j60(60-00-00)-o01	172	269	0,003	199	0,021	198	†	1,01	198*	1724	0,00	0,00	198	†	0,51	198*	2870	0,00
tP60-j30(00-30-00)-o01	172	340	0,003	722	0,016	220	†	20,50	243	†	29,20	29,20	200	†	2,00	218	†	21,10
tP60-j20(00-00-20)-o01	172	459	0,003	723	0,017	267	†	7,12	723	†	76,20	76,20	267*	521	0,00	723	†	76,20
tP60-j30(10-10-10)-o01	172	269	0,003	218	0,022	198	†	2,02	198	†	2,02	2,02	200	†	3,00	200	†	3,00

* Optimal. † 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

‡ 1 saat çalışma limiti içerisinde çözüm bulunamamıştır.

Tek makine 1 operatör test problem sonuçları

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonuna ait 28 test probleminde; *ES1* ile 7 adet (%25), *ES2* ile 14 adet (%50), *WS1* ile 10 adet (%36) ve *WS2* ile 14 adet (%50) için optimal çözüme ulaşılmıştır. *ES1* ile elde edilen tüm optimal çözümler diğer tam çözüm yaklaşımlarında da yer almaktadır. Test problemlerinin çözüm süresi açısından *ES2*, *ES1*’e göre daha hızlıdır. Bu durumun, ağırlıklı olarak *GR1* ile elde edilen gevşek üst sınır nedeniyle çözüm uzayının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

ES2 ve *WS2* ile optimal çözüme ulaşılan 14 adet test probleminde 12 adedi aynıdır. Bu test problemleri özelinde çözüm süreleri açısından *ES2*’nin biraz daha üstü olduğu söylenebilir. Bu duruma sıcak başlangıç noktasının CPLEX çözücüyü nispeten olumsuz etkilemesinin neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, optimale ulaşamayan 4 adet test probleminde de optimal amaç fonksiyon değeri elde edilmiş, ancak çalışma limiti içerisinde optimal çözüm garanti edilememiştir.

ES1 ve *WS1* ile optimal çözüme ulaşılan 7 adet test problemi incelendiğinde çözüm süresi açısından birbirlerine belirgin bir üstünlük sağlamadıkları görülmektedir.

Genel olarak, sıcak başlangıç tekniğinin belirgin bir katkı sağladığı söylenemez. Ancak, çalışma limiti içerisinde *ES1* ve *ES2* ile CPLEX çözücünün uygun çözüm bulamadığı durumlarda (Örneğin; *tP40-j14(01-00-13)-o01* ve *tP48-j16(00-00-16)-o01* test problemlerinde) sıcak başlangıç en azından bir çözüm sunabilmiştir. Dolayısıyla *WS1* ve *WS2* ile çalışma limiti içerisinde her zaman en az bir uygun çözüm bulunabilmektedir.

Diğer taraftan, *GR2* ile 28 adet test probleminde 8 adedi (%29) üst sınır olarak optimal değerleri üretmiştir. Bu durumun, çizelgenin boş olarak tasarlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca problem boyutu arttıkça, optimal çözüme ulaşılmasının ve optimal çözümün garanti edilmesinin genel olarak zorlaştığı görülmektedir. Bu durumun ağırlıklı olarak ardışıklık kısıtlarının devreye girmesine yetecek planlama ufkuna erişilmesiyle ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tek makine 2 operatör test problem sonuçları

‘Tek makine 2 operatör’ test problem sonuçlarının geneli değerlendirirken, tek makine 1 operatör test problem sonuçlarıyla doğrudan karşılaştırma yapılmamalıdır. 2 operatör daha fazla toplam iş yapma süresine sahip olduğundan fazladan 8 adet farklı test problemi eklenmiştir. Bununla birlikte, karşılaştırma yapılabilmesi maksadıyla 1 operatör ile çözülen problemlerin çoğu 2 operatör için de çözdürülmüştür.

‘Tek makine 2 operatör’ konfigürasyonuna ait 36 test probleminde; *ES1* ile 9 adet (%25), *ES2* ile 7 adet (%19), *WS1* ile 9 adet (%25) ve *WS2* ile 12 adet (%33) için optimal çözüme ulaşılmıştır. Tüm tam çözüm yaklaşımları tarafından 5 adet aynı test probleminde optimal çözüme ulaşılmıştır.

Genel olarak; *ES1* ile *WS1*’in benzer, *WS2*’nin daha iyi performans sergilediği görülmektedir. *ES2*’nin nispeten daha kötü performans sergilediği söylenebilir. Ayrıca, *ES2* ile çalışma limiti içerisinde 4 adet test problemine uygun çözüm bulunamamıştır. Bu durumun, üst sınırın çok sıkı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha gevşek üst sınıra sahip *ES1*’in, çalıştırma limiti içerisinde tüm problemlere uygun çözüm üretebilmesi bu tespiti desteklemektedir.

ES2 ve *WS2* ile optimal çözüme ulaşılan 14 adet test probleminden 12 adedi aynıdır. Bu test problemleri özelinde çözüm süreleri açısından *ES2*’nin biraz daha üstü olduğu söylenebilir. Bu duruma sıcak başlangıç noktasının CPLEX çözücüyü nispeten olumsuz etkilemesinin neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, optimale ulaşılamayan 4 adet test probleminde de optimal amaç fonksiyon değeri ile aynı değer elde edilmiş, ancak çalışma limiti içerisinde çözücü tarafından optimal çözüm garanti edilememiştir.

WS2 ile elde edilen tüm optimal çözüm değerleri, *ES1*, *ES2* ve *WS1* ile edilmesine rağmen çalıştırma limiti içerisinde optimal çözüm garanti edilememiştir. Bu durumda *WS2* ile sıcak başlatma tekniği uygulamasının olumlu yansıdığı ve çözüm uzayının daraltılmasına yardımcı olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.3. Tek makine 2 operatör tam yaklaşım sonuçları

Problem	GR1			GR2			ES1			ES2			WS1			WS2		
	LB	UB	t	UB	t	UB	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g
tP32-j32(32-00-00)-o02	40	74	0,003	56	0,016	55*	55*	670	0,00	55*	124	0,00	55*	395	0,00	55*	1996	0,00
tP32-j16(00-16-00)-o02	40	80	0,003	60	0,014	54*	54*	129	0,00	54*	78	0,00	54*	102	0,00	54*	57	0,00
tP32-j11(00-01-10)-o02	40	102	0,003	60	0,012	57	57	†	5,26	57	†	5,26	57	†	7,02	57	†	5,26
tP32-26(20-06-00)-o02	40	74	0,003	54	0,014	54	54	†	1,85	54*	572	0,00	54	†	3,70	54*	499	0,00
tP32-24(16-08-00)-o02	40	74	0,002	54	0,014	54*	54*	645	0,00	54	†	1,85	54	†	1,85	54*	729	0,00
tP32-22(12-10-00)-o02	40	74	0,003	54	0,014	54	54	†	1,85	54*	1322	0,00	54	†	1,85	54	†	1,85
tP32-17(07-05-05)-o02	40	74	0,003	61	0,014	54*	54*	494	0,00	54*	1274	1,85	54	†	1,85	54*	2349	0,00
tP32-14(02-06-06)-o02	40	74	0,003	60	0,012	54	54	†	1,85	54	†	1,85	54*	3568	0,00	54*	425	0,00
tP32-13(00-07-06)-o02	40	74	0,003	60	0,012	54*	54*	192	0,00	54*	264	0,00	54*	135	0,00	54*	932	0,00
tP40-j40(40-00-00)-o02	56	82	0,003	76	0,017	74	74	†	10,81	74	†	1,35	74	†	10,81	74	†	1,35
tP40-j20(00-20-00)-o02	56	104	0,003	76	0,017	64*	64*	926	0,00	64	†	3,12	64*	422	0,00	64*	504	0,00
tP40-j25(10-15-00)-o02	56	82	0,003	76	0,017	64	64	†	7,81	63	†	6,35	63	†	3,17	64	†	4,69
tP40-j30(20-10-00)-o02	56	82	0,003	64	0,014	63	63	†	3,17	63	†	1,59	63	†	4,76	63	†	3,17
tP40-j20(05-10-05)-o02	56	82	0,003	75	0,012	62	62	†	1,61	62	†	3,23	62	†	1,61	62*	2018	0,00
tP40-j14(01-00-13)-o02	56	147	0,003	78	0,012	78	78	†	14,10	78	†	3,85	78	†	14,10	78	†	3,85
tP40-j15(00-05-10)-o02	56	102	0,003	78	0,012	62	62	†	1,61	62*	470	0,00	62*	2604	0,00	62*	2232	0,00
tP40-j15(10-06-06)-o02	56	82	0,003	75	0,012	62*	62*	2682	0,00	62	†	1,61	62	†	1,61	62	†	1,61
tP48-j48(48-00-00)-o02	64	104	0,003	84	0,019	82	82	†	3,66	82	†	2,44	82	†	3,66	82	†	2,44
tP48-j24(00-24-00)-o02	64	128	0,003	84	0,019	80*	80*	1247	0,00	80	†	7,50	80*	1150	0,00	80*	836	0,00
tP48-j16(00-00-16)-o02	64	174	0,003	99	0,019	99	99	†	23,23	99	†	24,24	99	†	24,24	99	†	18,18

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

‡ 1 saat çalışma limiti içerisinde çözüm bulunamamıştır.

Çizelge 6.3 (devam) Tek makine 2 operatör tam yaklaşım sonuçları

Problem	GR1			GR2			ES1			ES2			WS1			WS2		
	LB	UB	t	UB	t		C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g	C _{max}	t	g
tP48-j24(08-08-08)-o02	64	104	0,003	84	0,019	80	†	†	3,75	80	†	5,00	80	†	3,75	80	†	3,75
tP48-j21(00-15-06)-o02	64	122	0,003	84	0,012	80	†	†	3,75	80	†	3,75	80	†	3,75	80	†	3,75
tP48-j34(20-14-00)-o02	64	104	0,003	80	0,014	80	†	†	3,75	80	†	5,00	82	†	6,10	80	†	3,75
tP48-j30(18-06-06)-o02	64	104	0,003	82	0,014	80	†	†	5,00	80	†	5,00	80	†	5,00	80	†	3,75
tP48-j24(06-12-06)-o02	64	104	0,003	84	0,014	80	†	†	3,75	80	†	5,00	80	†	5,00	80	†	3,75
tP48-j22(06-06-10)-o02	64	104	0,003	84	0,014	80	†	†	3,75	80	†	5,00	80	†	3,75	80	†	5,00
tP50-j50(50-00-00)-o02	74	106	0,003	98	0,019	84	†	†	3,57	84	†	3,57	84	†	4,76	84	†	4,76
tP50-j25(00-25-00)-o02	74	146	0,003	88	0,016	82	†	†	2,44	82	†	9,75	82*	1922	0,00	82	†	1,22
tP50-j17(00-01-16)-o02	74	174	0,003	99	0,013	99	†	†	18,18	†	†	-	102	†	23,53	99	†	17,17
tP60-j60(60-00-00)-o02	84	130	0,003	108	0,022	108	†	†	7,41	108	†	6,48	107	†	5,61	106	†	4,72
tP60-j30(00-30-00)-o02	84	172	0,003	106	0,016	109	†	†	9,17	†	†	-	108	†	7,41	102	†	15,69
tP60-j20(00-00-20)-o02	84	222	0,003	123	0,014	123	†	†	16,3	†	†	-	123	†	17,07	123	†	16,26
tP60-j30(10-10-10)-o02	84	130	0,003	108	0,014	107	†	†	8,41	106	†	5,66	104	†	5,77	104	†	4,81
tP100-j50(00-50-00)-o02	148	292	0,003	194	0,021	253	†	†	41,9	†	†	-	228	†	35,96	194	†	24,23
tP120-j120(120-00-00)-o02	176	274	0,003	244	0,079	228*	689	0,00	228*	149	0,00	228*	474	0,00	228*	102	0,00	0,00
tP120-j60(20-20-20)-o02	176	274	0,003	722	0,066	272	†	†	36,8	722	†	76,18	273	†	37,00	722	†	76,18

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

‡ 1 saat çalışma limiti içerisinde çözüm bulunamamıştır.

Tavlama benzetimi sonuçları

‘Tek makine 1 operatör’ tavlama benzetimi sonuçları Çizelge 6.4’te ve ‘tek makine 2 operatör’ tavlama benzetimi sonuçları Çizelge 6.5’te sunulmuştur. Aynı sütunlara sahip olduğundan her iki çizelgeye ait açıklamalar birlikte sunulmuştur. İlk ve ikinci ana sütun sırasıyla problemin ismini ve uygulanan alt sınırı (LB) belirtmektedir. Üçüncü ve dördüncü ana sütunda, sırasıyla birinci açgözlü kurucu sezgisel yaklaşım ($GR1$) ve ikinci açgözlü kurucu sezgisel yaklaşımdan ($GR2$) elde edilen üst sınır (UB) gösterilmektedir. Beşinci ana sütunda bilinen en iyi çözüme ait amaç fonksiyonu değeri (C_{max}), çözüm süresi (t) ve optimalite farkı (g) gösterilmektedir. Geriye kalan son iki ana sütunda sırasıyla birinci tavlama benzetimi ($SA1$) ve ikinci tavlama benzetiminden ($SA2$) elde edilen amaç fonksiyonu değeri (C_{max}) ve bilinen en iyi çözümle fark değeri (g') gösterilmektedir. Bu fark değeri $SA1$ için Eş. 6.2 ile bulunur. Benzer şekilde $SA2$ için de hesaplanabilir. Amaç fonksiyon değerleri yanında yer alan küçük yıldız (*) işareti optimal çözüm olduğunu, dolar (\$) işareti bilinen en iyi çözümünden daha iyi bir çözüm olduğunu belirtir. Çözüm süreleri sütununda yer alan tek hançer işareti (†) çalışma limitinin aşıldığını gösterir. $SA1$ ve $SA2$ ’ye ait amaç fonksiyonu değeri sütununda yer alan ünlem (!) işareti açgözlü sezgisel algoritmadan gelen ve tavlama benzetimine başlangıç çözüm olarak verilen çözümün aynen korunduğu ve iyileşme sağlanmadığını belirtir. Amaç fonksiyon değerleri saat ve çözüm süreleri saniye cinsinden verilmiştir.

$$g'_{SA1} = [(SA1_{C_{max}} - Best_{C_{max}})/SA1_{C_{max}}] * 100 \quad (6.2)$$

Tavlama benzetimi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki konfigürasyon için de bir test problemi hariç bilinen en iyi çözümünden daha iyi bir çözüm elde edilemediği görülmektedir. $GR1$ ile sağlanan başlangıç çözümlerinin $SA1$ ile büyük oranda iyileştirilebildiği, fakat $GR2$ ile sağlanan başlangıç çözümlerinin $SA2$ ile neredeyse hiç iyileştirilemediği görülmektedir. Bu durumun, özellikle ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonu için geçerli olduğu ve çizelgenin boş olarak tasarlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Komşuluk mekanizmaları sıkışık çizelgede çok fazla hareket imkânı bulamadığından başlangıç çözümleri iyileşme fırsatı bulamamıştır. Mevcut komşuluk yapılarının bu açıdan boş çizelge için çok etkin olmadığı düşünülmektedir.

Çizelge 6.4. Tek makine 1 operatör tavlama benzetimi sonuçları

Problem	LB	GR1	GR2	Bilinen En İyi			SA1		SA2	
		c_{max}	c_{max}	c_{max}	t	g	c_{max}	g'	c_{max}	g'
tP24-j24(24-00-00)-o01	56	100	76	75*	2	0,00	75	0,00	75	0,00
tP24-j12(00-12-00)-o01	56	124	74	74*	4	0,00	81	8,64	74 [!]	0,00
tP24-j08(00-00-08)-o01	56	171	78	78*	20	0,00	87	10,34	78 [!]	0,00
tP32-j32(32-00-00)-o01	80	146	100	100*	18	0,00	103	2,91	100 [!]	0,00
tP32-j16(00-16-00)-o01	80	172	106	100*	176	0,00	123	18,70	100	0,00
tP32-j11(00-01-10)-o01	80	219	108	108	†	3,70	128	15,63	108 [!]	0,00
tP32-26(20-06-00)-o01	80	146	100	100*	188	0,00	104	3,85	100 [!]	0,00
tP32-24(16-08-00)-o01	80	146	100	100*	141	0,00	108	7,41	100 [!]	0,00
tP32-22(12-10-00)-o01	80	146	106	100*	2686	0,00	107	6,54	105	4,76
tP32-17(07-05-05)-o01	80	146	107	100*	1132	0,00	105	4,76	103	2,91
tP32-14(02-06-06)-o01	80	146	108	100*	1713	0,00	110	9,09	104	3,85
tP32-13(00-07-06)-o01	80	146	108	100*	542	0,00	107	6,54	104	3,85
tP40-j40(40-00-00)-o01	104	173	132	126*	444	0,00	145	13,10	126	0,00
tP40-j20(00-20-00)-o01	104	220	124	124*	525	0,00	156	20,51	124 [!]	0,00
tP40-j25(10-15-00)-o01	104	173	124	124*	323	0,00	149	16,78	124 [!]	0,00
tP40-j30(20-10-00)-o01	104	173	128	124	†	0,81	130	4,62	128 [!]	0,00
tP40-j20(05-10-05)-o01	104	173	125	124	†	0,81	149	16,78	125 [!]	0,80
tP40-j14(01-00-13)-o01	104	291	150	150	†	14,00	174	13,79	150 [!]	0,00
tP40-j15(00-05-10)-o01	104	219	147	124	†	0,81	155	20,00	142	12,68
tP40-j22(10-06-06)-o01	104	173	145	124	†	2,42	148	16,22	145 [!]	0,00
tP48-j48(48-00-00)-o01	128	219	152	151*	649	0,00	173	12,72	152 [!]	0,00
tP48-j24(00-24-00)-o01	128	268	152	152*	1900	0,00	202	24,75	152 [!]	0,00
tP48-j16(00-00-16)-o01	128	363	198	198	†	22,22	219	9,59	198 [!]	0,00
tP48-j24(08-08-08)-o01	128	219	169	151	†	1,99	178	15,17	169 [!]	10,12
tP60-j60(60-00-00)-o01	172	269	199	198*	1724	0,00	217	8,76	199 [!]	0,50
tP60-j30(00-30-00)-o01	172	340	722	200	†	2,00	242	17,36	460	56,52
tP60-j20(00-00-20)-o01	172	459	723	267*	521	0,00	315	15,24	723 [!]	63,07
tP60-j30(10-10-10)-o01	172	269	218	198	†	2,02	218	9,17	218 [!]	9,17

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

! Açgözlü sezgisel ile aynı, gelişme olmayan çözüm

Çizelge 6.5. Tek makine 2 operatör tavlama benzetimi sonuçları

Problem	LB	GR1	GR2	Bilinen En İyi			SA1		SA2	
		c_{max}	c_{max}	c_{max}	t	g	c_{max}	g'	c_{max}	g'
tP32-j32(32-00-00)-o02	40	74	56	55*	124	0.00	73	24,66	56 [!]	1,79
tP32-j16(00-16-00)-o02	40	80	60	54*	57	0.00	79	31,65	60 [!]	10,00
tP32-j11(00-01-10)-o02	40	102	60	57	†	5.26	71	19,72	60 [!]	5,00
tP32-26(20-06-00)-o02	40	74	54	54*	499	0.00	69	21,74	54 [!]	0,00
tP32-24(16-08-00)-o02	40	74	54	54*	645	0.00	64	15,63	54 [!]	0,00
tP32-22(12-10-00)-o02	40	74	54	54*	1322	0.00	59	8,47	54 [!]	0,00
tP32-17(07-05-05)-o02	40	74	61	54*	494	0.00	59	8,47	57	3,57
tP32-14(02-06-06)-o02	40	74	60	54*	425	0.00	61	11,48	59	8,47
tP32-13(00-07-06)-o02	40	74	60	54*	135	0.00	64	15,63	58	6,90
tP40-j40(40-00-00)-o02	52	82	76	74	†	1.35	82 [!]	9,76	76 [!]	2,63
tP40-j20(00-20-00)-o02	52	104	76	64*	422	0.00	86	25,58	76 [!]	15,79
tP40-j25(10-15-00)-o02	52	82	76	63	†	3.17	80	21,25	76 [!]	17,11
tP40-j30(20-10-00)-o02	52	82	64	63	†	1.59	81	22,22	64 [!]	1,56
tP40-j20(05-10-05)-o02	52	82	75	62*	2018	0.00	79	21,52	75 [!]	17,33
tP40-j14(01-00-13)-o02	52	147	78	78	†	3.85	99	21,21	78 [!]	0,00
tP40-j15(00-05-10)-o02	52	102	78	62*	470	0.00	84	26,19	78 [!]	20,51
tP40-j15(10-06-06)-o02	52	82	75	62*	2682	0.00	82 [!]	24,39	75 [!]	17,33
tP48-j48(48-00-00)-o02	64	104	84	82	†	2.44	103	20,39	84 [!]	2,38
tP48-j24(00-24-00)-o02	64	128	84	80*	836	0.00	111	27,93	84 [!]	4,76
tP48-j16(00-00-16)-o02	64	174	99	99	†	18.18	114	13,16	99 [!]	0,00
tP48-j24(08-08-08)-o02	64	104	84	80	†	3.75	104 [!]	23,08	84 [!]	4,76
tP48-j21(00-15-06)-o02	64	122	84	80	†	3.75	104	23,08	84 [!]	4,76
tP48-j34(20-14-00)-o02	64	104	80	80	†	3.75	104 [!]	23,08	80 [!]	0,00
tP48-j30(18-06-06)-o02	64	104	82	80	†	3.75	103	22,33	82 [!]	2,44
tP48-j24(06-12-06)-o02	64	104	84	80	†	3.75	104 [!]	23,08	84 [!]	4,76
tP48-j22(06-06-10)-o02	64	104	84	80	†	3.75	104 [!]	23,08	84 [!]	4,76
tP50-j50(50-00-00)-o02	73	106	98	84	†	3,57	106 [!]	20,75	98 [!]	14,29
tP50-j25(00-25-00)-o02	73	146	88	82	1922	0,00	112	26,79	88 [!]	6,82
tP50-j17(00-01-16)-o02	73	174	99	99	†	17,17	123	19,51	99 [!]	0,00
tP60-j60(60-00-00)-o02	86	130	108	106	†	4.72	128	17,19	108 [!]	1,85
tP60-j30(00-30-00)-o02	86	172	106	102	†	15.69	142	28,17	106 [!]	3,77
tP60-j20(00-00-20)-o02	86	222	123	123	†	16.26	152	19,08	123 [!]	0,00
tP60-j30(10-10-10)-o02	86	130	108	104	†	4.81	130 [!]	20,00	108 [!]	3,70
tP100-j50(00-50-00)-o02	146	292	194	194	†	24.23	246	21,14	194 [!]	0,00
tP120-j120(120-00-00)-o02	172	274	244	228*	102	0.00	268	14,93	244 [!]	6,56
tP120-j60(20-20-20)-o02	172	274	722	272	†	36.76	269 ^s	-1,12	722 [!]	62,33

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

! Açgözlü sezgisel ile aynı, gelişme olmayan çözüm

\$ Bilinen en iyi çözümünden daha iyi çözüm.

Tek makine 3 operatör test problem sonuçları

Tez kapsamında asıl olarak ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonları ele alınmıştır. Model n operatörü de destekleyebildiğinden ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonuna ait test problemleri de çözdürülmüştür. Bu problemlere ait tam çözüm yaklaşımıyla elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6’da verilmiştir. Bu konfigürasyonda sadece *GR2*, *ES2* ve *WS2* kullanılmıştır. Sütun isimlendirmeleri ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ sonuçlarının verildiği çizelgelere benzerdir.

Genel olarak operatör sayısı ve dolayısıyla karar değişkeni sayısı arttığından problem boyutu arttıkça çözücünün çalıştırma limiti içerisinde optimal çözüme ulaşamadığı görülmektedir. Ayrıca, özellikle ‘tek makine 1 operatör’ konfigürasyonun aksine *GR2* tarafından üretilen üst sınır değerleri optimal değer üretememiş, *ES2* ve *WS2* tarafından iyileşme sağlanmıştır.

Çizelge 6.6. Tek makine 3 operatör tam yaklaşım sonuçları

Problem	LB	GR2			ES2			WS2		
		c_{max}	t		c_{max}	t	g	c_{max}	t	g
tP32-j32(32-00-00)-o03	32	52	0,016	41*	284	0,00	41*	445	0,00	
tP32-j16(00-16-00)-o03	32	40	0,016	38*	35	0,00	38*	62	0,00	
tP32-j11(00-01-10)-o03	32	39	0,013	38*	53	0,00	38*	46	0,00	
tP32-17(07-05-05)-o03	32	41	0,013	37*	34	0,00	37*	40	0,00	
tP40-j40(40-00-00)-o03	40	60	0,018	56	†	3,57	56	†	5,36	
tP40-j20(00-20-00)-o03	40	56	0,015	54	†	3,70	54	†	3,70	
tP40-j20(05-10-05)-o03	40	57	0,016	51*	571	0,00	51*	1379	0,00	
tP40-j14(01-00-13)-o03	40	57	0,015	54	†	1,85	54*	2824	0,00	
tP40-j15(10-06-06)-o03	40	57	0,015	51	†	1,96	51*	305	0,00	
tP48-j48(48-00-00)-o03	48	78	0,02	65	†	7,69	65	†	7,69	
tP48-j24(00-24-00)-o03	48	66	0,015	‡	†	-	62	†	3,23	
tP48-j16(00-00-16)-o03	48	75	0,014	63	†	4,76	63	†	4,76	
tP48-j24(08-08-08)-o03	48	65	0,014	60	†	5,00	60	†	3,33	
tP48-j22(06-06-10)-o03	48	65	0,013	61	†	6,56	60	†	6,67	
tP60-j60(60-00-00)-o03	60	100	0,054	84	†	7,14	85	†	7,06	
tP60-j30(00-30-00)-o03	60	84	0,016	82	†	23,17	80	†	7,50	
tP60-j20(00-00-20)-o03	60	87	0,014	84	†	25,00	84	†	8,33	
tP60-j30(10-10-10)-o03	60	84	0,014	79	†	6,33	81	†	8,64	
tP120-j120(120-00-00)-o03	120	200	0,090	195	†	37,95	196	†	38,27	
tP120-j60(20-20-20)-o03	120	180	0,052	‡	†	-	180	†	38,27	

* Optimal.

† 1 saat çalışma limiti aşılmıştır.

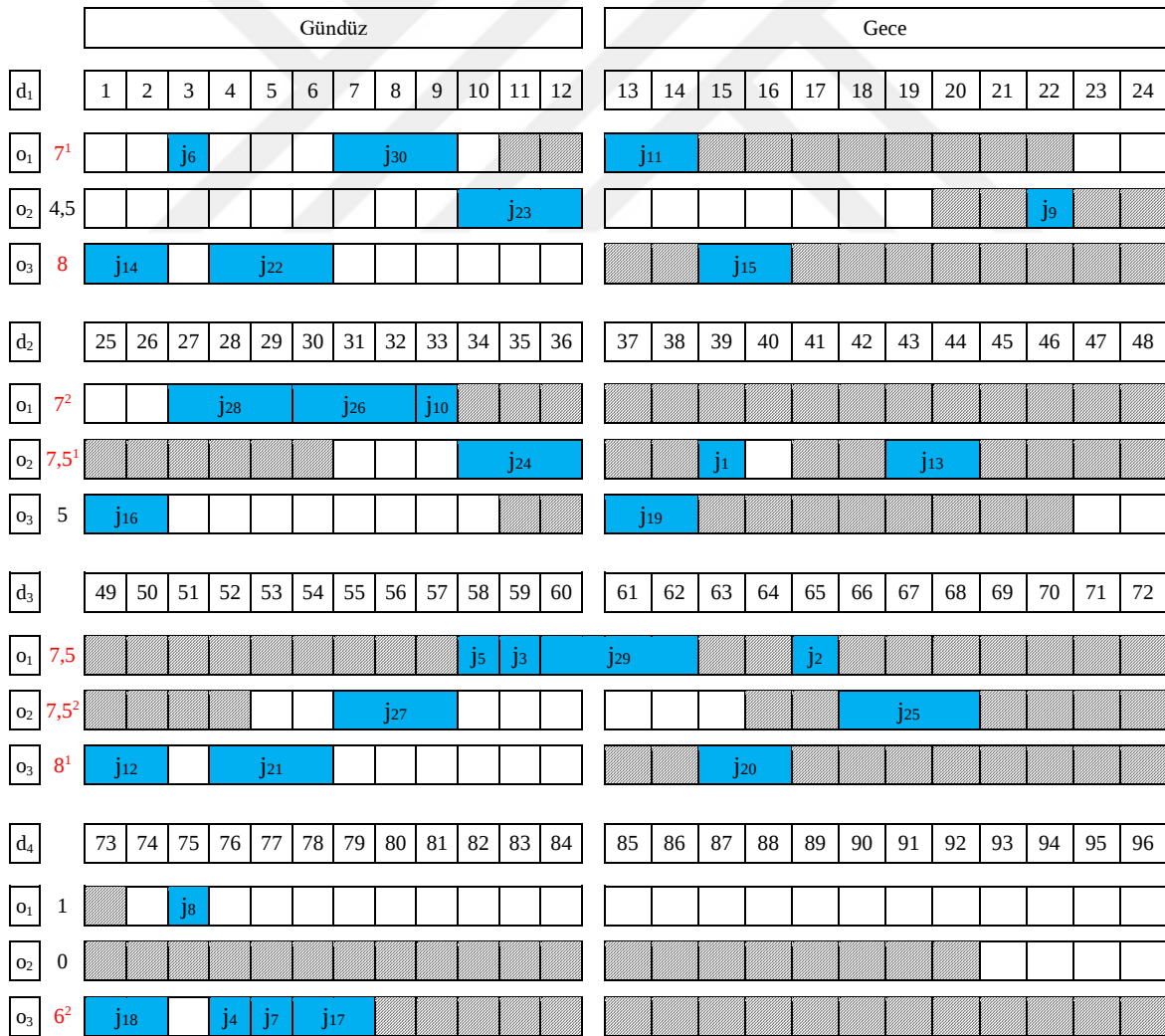
‡ 1 saat çalışma limiti içerisinde çözüm bulunamamıştır.

tP60-j30-(10-10-10)-o03 test problemi için *GR2*, *ES2* ve *WS2* çözümlerine yönelik çizelgeler Şekil 6.8-Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.8'de verilen *GR2* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 4 günde, 1 no.lu operatör tarafından 4 defa, 2 no.lu operatör tarafından 3 defa ve 3 no.lu operatör tarafından 1 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. 1 no.lu operatör için 2 defa ve 2 no.lu operatör için 1 defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuş, 3 no.lu operatör içinse ihtiyaç duyulmamıştır. 1 no.lu operatör için toplam 16 adet işin 29,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 10 adet işin 23 saatlik toplam iş yükü ve 3 no.lu operatör için toplam 4 adet işin 13,5 saatlik toplam iş yükü olduğu görülmektedir. Gece periyodunda sadece 1 ve 2 no.lu operatörlere birer adet iş yaptırılırken, 3 no.lu operatöre 3 adet iş yaptırılmıştır.

	Gündüz	Gece
d ₁	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
o ₁ 8 ¹	j ₁ j ₂ j ₃ j ₄ j ₅ j ₆ j ₇ j ₈	
o ₂ 7	j ₉ j ₁₀ j ₁₁	j ₁₃
o ₃ 3		j ₁₂
d ₂	25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
o ₁ 8 ²	j ₁₄ j ₁₅ j ₁₆ j ₁₇	
o ₂ 4	j ₁₈ j ₁₉	
o ₃ 3		j ₂₀
d ₃	49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60	61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72
o ₁ 7,5 ¹	j ₂₄	j ₂₆
o ₂ 6 ¹	j ₂₁ j ₂₂	
o ₃ 7,5	j ₂₃	j ₂₅
d ₄	73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84	85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96
o ₁ 6 ²	j ₂₈ j ₂₉	
o ₂ 6 ²	j ₂₇ j ₃₀	
o ₃ 0		

Şekil 6.8. *tP60-j30-(10-10-10)-o03* test problemi *GR2* çözümü

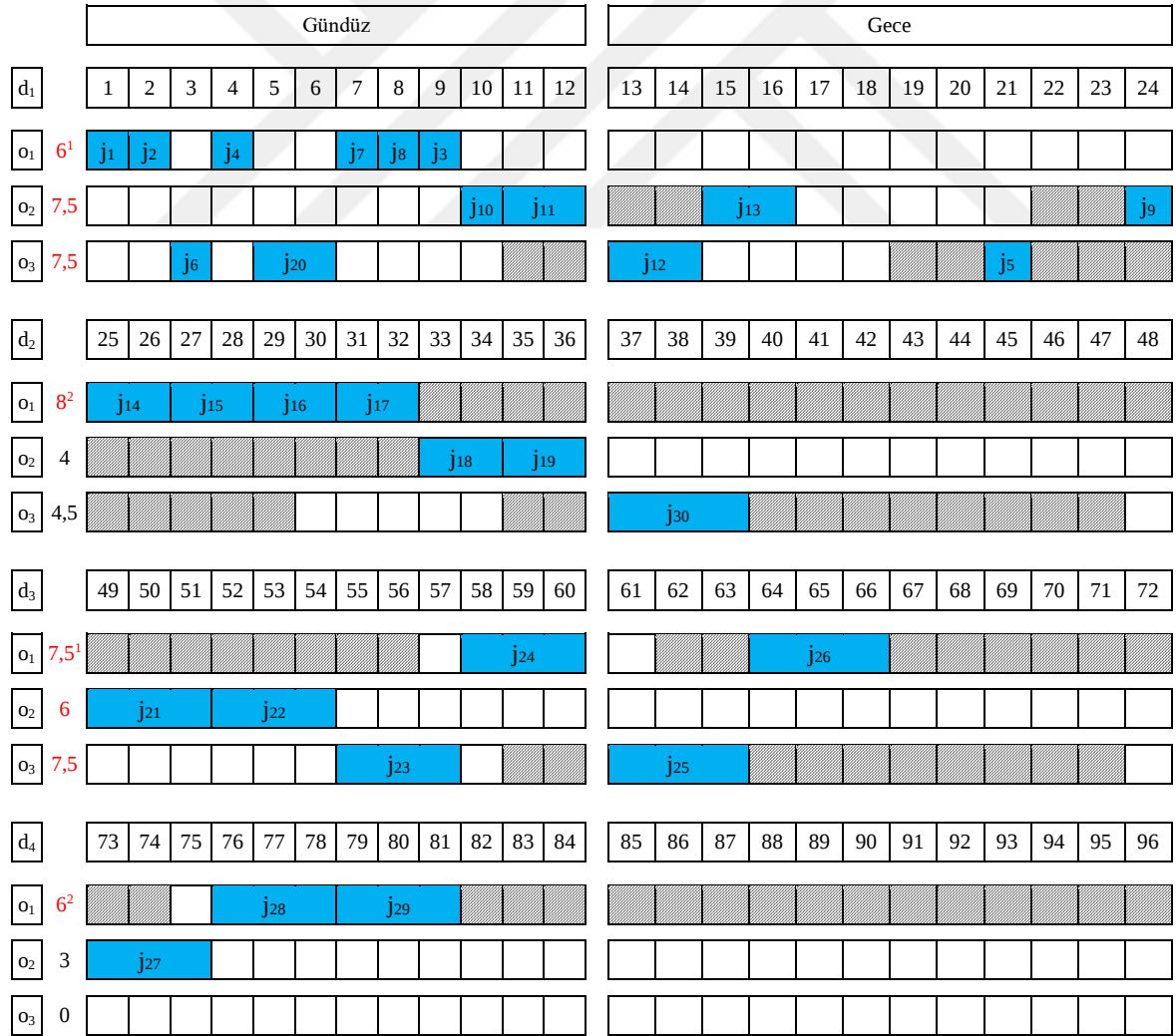
Şekil 6.9’da verilen *ES2* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 4 günde, 1 no.lu operatör tarafından 3 defa, 2 no.lu operatör tarafından 2 defa ve 3 no.lu operatör tarafından 3 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. Her 3 operatör için de birer defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuştur. 1 no.lu operatör için toplam 11 adet işin 22,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 7 adet işin 19,5 saatlik toplam iş yükü ve 3 no.lu operatör için toplam 12 adet işin 27 saatlik toplam iş yükü olduğu görülmektedir. Gece periyodunda 1 no.lu operatöre 2 adet, 2 no.lu operatöre 4 adet ve 3 no.lu operatöre 1 adet iş yaptırılmıştır. 2’nci günde 2 no.lu operatöre aynı gece periyodu içerisinde 2 adet iş yaptırıldığı görülmektedir. 3’üncü günde 2 no.lu operatör tarafından yapılan 29 no.lu işin gündüz periyodunda başlayarak gece periyodunda tamamlandığı görülmektedir.



Şekil 6.9. *tP60-j30-(10-10-10)-o03* test problemi *ES2* çözümü

Şekil 6.10'da verilen *WS2* çözümünde hem gece periyodunda yapılan işlere yönelik hem de ardışık ağır iş yükü kategorisiyle ilgili dinlenme sürelerinin bulunduğu görülmektedir. 4 günde, 1 no.lu operatör tarafından 4 defa, 2 no.lu operatör tarafından 2 defa ve 3 no.lu operatör tarafından 2 defa ağır kategori iş yükü ile karşılaşmıştır. Sadece 1 no.lu operatör için 2 defa ardışık ağır iş yükü sonrasında dinlenme süresine ihtiyaç duyulmuştur. 1 no.lu operatör için toplam 14 adet işin 27,5 saatlik toplam iş yükü, 2 no.lu operatör için toplam 9 adet işin 20,5 saatlik toplam iş yükü ve 3 no.lu operatör için toplam 7 adet işin 19,5 saatlik toplam iş yükü olduğu görülmektedir. Gece periyodunda 1 no.lu operatöre 1 adet, 2 no.lu operatöre 1 adet ve 3 no.lu operatöre 4 adet iş yaptırılmıştır. 1'nci günde hem 1 no.lu hem de 2 no.lu operatöre aynı gece periyodu içerisinde ikişer adet iş yaptırıldığı görülmektedir.

WS2 çözümü $C_{max} = 81$ amaç fonksiyon değeri ile *ES2*'den daha kötü çözüm üretmiştir.



Şekil 6.10. *tP60-j30-(10-10-10)-o03* test problemi *WS2* çözümü

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, helikopter pilotlarının uçuş saatlerinin planlanmasına yönelik gerçek hayat uygulamasından kurgulanan bir çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Helikopter makine, pilotlar operatör ve görevler iş olarak düşünülmüştür.

Tez probleminde çizelge yapısı, gün temelli olup gündüz ve gece olarak ikiye ayrılmıştır. İşlerin yapıldığı periyoda göre operatörlerin iş yükü hesabı farklılık göstermektedir. Yorgunluk katsayısı uygulanan gece periyodunda yapılacak işler öncesi ve sonrasında belirli kesintisiz dinlenme süreleri bulunmaktadır. Gece periyodunda yapılan işlerin hem süre hem de sayı olarak gündüz periyodunda yapılacak işlere etkileri bulunmaktadır. Operatörlerin günlük iş yükü, normal ve ağır olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Ardışık günlerde ağır kategori iş yükü oluştuğunda operatörlere belirli kesintisiz dinlenme süreleri verilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, makine çalışma kısıtı nedeniyle işler yüksek multiplisiteye sahiptir. Diğer bir ifadeyle az çeşit ve yüksek sayıda işin çizelgelenmesi söz konusudur. Organizasyona özgü iş yükü kurallarına yönelik literatürde benzer alandaki problemlerden ayrıştığı için bütün olarak değerlendirildiğinde tez probleminin özgün olduğu sonucuna varılmıştır.

Problem, temel olarak tek makine problemi olmakla birlikte operatör sayısına göre farklı konfigürasyonlara sahiptir. Gerçek hayat uygulamasında gerçekleşmesi daha muhtemel olan ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonları incelenmiştir. Operatör sayısı artışının etkisinin araştırılması amacıyla ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonuna yönelik de deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Tez probleminin çözümü maksadıyla tam çözüm yaklaşımı ve metasezgisel yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Tam çözüm yaklaşımı kapsamında, ticari bir çözücü olan CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Özellikle büyük boyutlu problemlerin çözüm sürelerinin iyileştirilmesi maksadıyla, geliştirilen ağgözlü kurucu sezgisel algoritmalarla elde edilen çözümler; tam çözüm yaklaşımında hem üst sınır hem de sıcak başlangıç olarak, tavlama benzetimi yaklaşımında ise başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Ayrıca, tavlama benzetimi yaklaşımında komşuluk yapıları geliştirilmiştir.

Çözüm yaklaşımlarının etkinliğinin değerlendirilmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş, farklı boyut ve tipteki test problemleri koşturulmuştur. Literatürde benzer test problemleri olmadığı ve gerçek veriler temin edilemediğinden test problemleri rastgele üretilmiştir. ‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu için toplam 28 adet, ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonu için toplam 36 adet ve ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonu için toplam 20 adet test problemi oluşturulmuştur. Operatör sayısının etkisinin karşılaştırılabilmesi maksadıyla mümkün olduğunca tüm konfigürasyonlar için aynı işlem süreli ve iş sayılı test problemleri oluşturulmuştur. 17 adet problem tüm konfigürasyonlar için, 25 adet problem ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 2 operatör’ konfigürasyonları için, 20 adet problem ‘tek makine 2 operatör’ ve ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonları için, 17 adet problem ‘tek makine 1 operatör’ ve ‘tek makine 3 operatör’ konfigürasyonları için aynı işlem süresi ve iş sayısına sahiptir.

‘Tek makine 3 operatör’ konfigürasyonu hariç her bir test problemi, açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar ($GR1$ $GR2$), bu algoritmalarla elde edilen değerlerin üst sınır olarak kullanıldığı tam çözüm yaklaşımları ($ES1$, $ES2$), sıcak başlangıç olarak kullanıldığı tam çözüm yaklaşımları ($WS1$, $WS2$) ve başlangıç çözümü olarak kullanıldığı tavlama benzetimi yaklaşımlarıyla ($SA1$, $SA2$) toplamda 8 farklı şekilde çözdürülmüştür.

‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonunun tam çözümünde; $ES2$ ve $WS2$ yaklaşımlarının diğer yaklaşımlardan daha iyi performans göstererek test problemlerinin %50’sinde optimal çözüme ulaştığı, $ES2$ yaklaşımının çözüm üretemediği bir durum hariç çalıştırma limiti içerisinde tüm durumlarda uygun çözüm üretilebildiği görülmüştür. ‘Tek makine 1 operatör’ konfigürasyonu tavlama benzetimi yaklaşımında ise hiçbir test problemi için bilinen en iyi çözümden daha iyi bir çözüm bulunamamıştır.

‘Tek makine 2 operatör’ konfigürasyonunun tam çözümünde; $WS2$ yaklaşımının diğer yaklaşımlardan daha iyi performans göstererek test problemlerinin %33’ünde optimal çözüme ulaştığı, $ES2$ yaklaşımının çözüm üretemediği 4 durum hariç çalıştırma limiti içerisinde tüm durumlarda uygun çözüm üretilebildiği görülmüştür. ‘Tek makine 2 operatör’ konfigürasyonu tavlama benzetimi yaklaşımında ise $SA1$ yaklaşımının bir durum hariç bilinen en iyi çözümden daha iyi çözümler üretemediği görülmüştür.

Tek makine 3 operatör' konfigürasyonunun tam çözümünde sadece *GR2*, *ES2* ve *WS2* yaklaşımları kullanılmıştır. *WS2* yaklaşımının diğer yaklaşımlardan daha iyi performans göstererek test problemlerinin %35'inde optimal çözüme ulaştığı, *ES2* yaklaşımının çalıştırma limiti içerisinde çözüm üretilmediği 2 durum hariç tüm durumlarda uygun çözümler üretilbildiği görülmüştür.

Tam çözüm yaklaşımlarının tüm makine-operatör konfigürasyonlarına yönelik genel değerlendirmesi kapsamında, bütün test problemlerinde optimal çözüme ulaşılmasa bile büyük çoğunluğunda çalıştırma limiti içerisinde uygun çözüm bulunabildiği görülmüştür. Tam çözüm yaklaşımlarıyla elde edilen çözümlerin optimalite farkı dikkate alınarak özellikle planlama maksadıyla kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Tavlama benzetimi yaklaşımlarının genel değerlendirmesi kapsamında, tavlama benzetiminin bazı durumlarda başlangıç çözümünü iyileştiremediği görülmüştür. Özellikle sıkı üst sınıra sahip sıkışık çizelge yapısında geliştirilen komşuluk mekanizmalarının çok etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan gevşek üst sınıra sahip çizelge yapısında komşuluk mekanizmalarının daha etkin çalıştığı gözlemlenmiştir. Daha kısa sürelerde nispeten gevşek çizelge hazırlanması talep edildiği durumlarda tavlama benzetimi kullanımının faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.

Diğer taraftan varsayım olarak çizelgenin boş olarak tasarlanmasının belirli bir seviyede sunilik yarattığı değerlendirilmektedir. Özellikle sıkı üst sınırlar konulduğunda test problemlerinin önemli bir kısmı için açgözlü kurucu sezgisel algoritmalar tarafından optimal veya optimale çok yakın çözümler üretilbilmiştir. Suniliğin ortadan kaldırabilmesi maksadıyla makine ve operatörlerin uygun olmadığı periyotların bulunduğu problemlere yönelik ayrı bir çalışma yapılabilir.

Uzun işlem süresine sahip işler, günlük iş yükü kategorisinin hızlı bir şekilde ağır kategoriye çıkmasına ve ağır iş yükü kategorisinde ardışık çalışmaya yönelik kısıtlarının daha erken devreye girmesine neden olmaktadır. Toplam iş süreleri aynı olan test problemlerinde uzun işlem süreli işlerin fazla olduğu durumlarda çoğunlukla daha yüksek bir üst belirlenebilmektedir. Bununla birlikte işlerin yüksek multiplisiteye sahip olmasının ve iş tipleri sayısının dağılımının, kullanılan parametrelerin değerlerine de bağlı olarak çözüm üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Tez probleminin çözümü maksadıyla önerilen çözüm yaklaşımları ve bunların doğrulanması kapsamında geliştirilen ara programlar, belirli sınırlılıklar dâhilinde uygun çözümler üretilebilmesi ve en azından yaklaşık planlamalar yapılabilmesi maksadıyla kullanılabilir. İstenilen parametre değerleri değiştirilerek çizelge üzerindeki etkileri analiz edilebilir.

Türk Deniz Kuvvetlerinin imkân ve kabiliyetlerinin artırılması kapsamında daha fazla helikopter ve helikopter platformuna sahip gemilerin envantere kazandırılmasıyla birlikte optimizasyona dayalı uçuş harekâtı planlaması ihtiyacı daha fazla hissedilecektir. Hatta, komuta kontrol ve savaş yönetim sistemlerine entegre edilecek daha gelişmiş optimizasyon tabanlı programlar aracılığıyla helikopter pilotlarının iş yükleri anlık olarak takip edilebilir, parametrik değerler ayarlanarak yeni çizelgeler çevrim içi üretilebilir. Bu durumda, kurgusal tez probleminin özellikle helikopterlerin bakım ihtiyaçlarına yönelik olanlar dâhil diğer ilave kısıtlarla birlikte mümkün olduğunca gerçek yaşama uyarlanması daha gerçekçi planlamalar yapılmasını sağlayabilir. Karar vericiler ve planlayıcıların ellerindeki kaynakları ve kapasitelerini bilerek alabileceği risklerin önceden görülebilmesi karar ve icra üstünlüğünün ele geçirilmesine yardımcı olabilir Aynı zamanda, “barışta önce emniyet, savaşta nasıl emredilirse” şiarıyla görev yapan kahraman pilotlarımızın özellikle barış zamanında iş yükü ve yorgunluk yönetiminin optimizasyon temelli olarak daha etkili bir şekilde icra edilmesi sayesinde yaşanabilecek olumsuzların önüne geçilebilir.

Gelecek dönem çalışmaları kapsamında; farklı amaç fonksiyonları için çalışmalar yapılabilir. Örneğin; operatörler arasında iş yükü dengeleme amaç fonksiyonu olarak belirlenebilir. Tavlama benzetimi yaklaşımı, farklı komşuluk mekanizmaları oluşturularak ve parametre optimizasyonu yapılarak daha kapsamlı şekilde uygulanabilir. ‘Tek makine n operatör’ konfigürasyonu için kısıt programlama, diğer metasezgisel yaklaşımlar gibi farklı çözüm yaklaşımları denenebilir, makine ve operatörlerin müsait olmadığı periyotlar tanımlanabilir veya bazı işlerin en erken başlama ve en geç bitiş zamanlarının bulunduğu test problemleri üretilebilir. Ayrıca ‘ m makine n operatör’ konfigürasyonlarında paralel makinelere yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aarts, E.H.L., and Korst, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*, Chichester: Wiley.
- Acar, A.B. ve Çeken, S. (2022). Havacılıkta İş Yüğü ve Yorgunluk Yönetimi, Ünsal, P. ve Çeken, S. (Editörler), *Havacılık Psikolojisi: Kavramlar, Araştırmalar, Uygulamalar*, İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınevi, 565-604.
- AGARD. (1989). Assessing Pilot Workload, *AGARD Advisory Report No 233*, NATO.
- Artigues, C., Demassey, S., and Neron, E. (2008). *Resource Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications*, France: John Wiley & Sons.
- Baker, K.R. (1976). Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey, *Journal of the Operational Research Society*, 27, 155-167.
- Barnhart, C., Cohn, A.M., Johnson, E.L., Klabjan, D., Nemhauser, G.L., and Vance, P.H. (2003). Airline Crew Scheduling, In: Hall, R.W. (Ed.), *Handbook of Transportation Science, International Series in Operations Research & Management Science*, 56, Boston: Springer.
- Bergh, J.V., Beliën, J., Bruecker, P., Demeulemeester, E., and Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 226, 367-385.
- Bernhardt, A., Melo, T., Bousonville, T., and Kopfer, H. (2017). Truck driver scheduling with combined planning of rest periods, breaks and vehicle refueling, *Technical Reports on Logistics of the Saarland Business School*, 14, Saarland University of Applied Sciences (htw saar), Saarland Business School.
- Billings, C., Bason, R., and Gerke, R.J. (1970). Physiological cost of piloting rotary wing aircraft, *Aerospace Medicine*, 41(3), 256-8.
- Blazewicz, J., Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G. (1983). Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity, *Discrete Applied Mathematics*, 5, 11-24.
- Blazewicz, J., Brauner, N., and Finke, G. (2004). Scheduling with discrete resource constraints, *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis* (Ed. Leung, J.Y.T.), USA: CRC Press.
- Blix A.S., Stromme S.B., and Ursin H. (1974). Additional heart rate--an indicator of psychological activation, *Aerospace Medicine*, 45(11), 1219-1222.
- Bowden, Z.E., and Ragsdale, C.T. (2018). The truck driver scheduling problem with fatigue monitoring, *Decision Support Systems*, 110, 20-31.

- Böðvarsdóttir, E.B., Bagger, N.C.F., Høffner, L.E., and Stidsen, T. (2022). A flexible mixed integer programming-based system for real-world nurse rostering, *Journal of Scheduling*, 25, 59–88.
- Brucker, P., Qu, R., and Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity, *European Journal of Operational Research*, 210(3), 467-473.
- Burke, E.K., De Causmaecker, P., Berghe, G.V., and Van Landeghem, H. (2004). The state of the art of nurse rostering, *Journal of Scheduling*, 7, 441-499.
- Cain, B. (2007). A Review of the Mental Workload Literature, *Technical Report*, Defence Research and Development Canada Toronto Human System Integration Section.
- Caldwell, J.L., and Gilreath, S.R. (2001). Work and sleep hours of US Army aviation personnel working reverse cycle, *Military Medicine*, 166(2), 159-166.
- Cerny, V. (1985). Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45, 41-51.
- Cohen, S.I., and Silverman, A.J. (1957). Measurement of Pilot Mental Effort, *AGARD Report 148*.
- Cooper, G.E., and Harper, R.P. (1969). The Use of Pilot Rating in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities, *AGARD Advisory Report No 567*, NATO.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., and Stein, C. (2001). *Introduction to Algorithm*, MIT Press.
- Curry, R., Jex, H., Levison, W., and Stassen, H. (1979). Final report of the control engineering group, In: Moray, N. (Ed.), *Nato Conference Series 8 Mental Workload: Its theory and measurement*, New York: Plenum Press, 235-253.
- Çelik, F., and Güner, E. (2024). A Workload dependent resource constrained scheduling problem for navy helicopter pilots, *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 20(1), 67-90.
- Dantzig, G.B. (1954). Letter to the Editor---A Comment on Edie's 'Traffic Delays at Toll Booths, *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(3), 339-341.
- Deveci, M., and Demirel, N.Ç. (2018). Evolutionary algorithms for solving the airline crew pairing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 115, 389-406.
- Dosa, G. (2007). The Tight Bound of First Fit Decreasing Bin-Packing Algorithm Is $\text{FFD}(I) \leq 11/9 \text{OPT}(I) + 6/9$. *Combinatorics, Algorithms, Probabilistic and Experimental Methodologies*, ESCAPE 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4614, Berlin: Springer.

- Dussault, C., Jouanin, J.C., and Guezennec, C.Y. (2004). EEG and ECG changes during selected flight sequences, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(10), 889-897.
- Eggemeier, F.T. (1988). Properties of workload assessment techniques, *Advance in Psychology*, 52, 41-62.
- Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., and Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models, *European Journal of Operational Research*, 153, 3-27.
- Feltman, K.A., Bernhardt, K.A., and Kelley, A.M. (2019). Measuring Rotary-Wing Aviator Workload Within Four Workload Domains, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63, 1363-1366.
- Firth P.A. (1973). Psychological factors influencing the relationship between cardiac arrhythmia and mental load, *Ergonomics*, 16(1), 5-16.
- Gafarov, E. R., Lazarev, A. A., and Werner, F. (2011). Single machine scheduling problems with financial resource constraints: Some complexity results and properties, *Mathematical Social Sciences*, 62(1), 7-13.
- Garey, M.R., and Johnson, D.S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, San Francisco: W.H. Freeman and Company.
- Gartner, W.B., and Murphy, M.R. (1976). Pilot workload and fatigue: A critical survey of concepts and assessment techniques, *NASA Report No TN D 8365*.
- Gendreau, M., Ferland, J., Gendron, B., Hail, N., Jaumard, B., Lapierre, S., Pesant, G., and Soriano, P. (2007). Physician scheduling in emergency rooms, In: Burke, E.K., and Rudová, H. (Eds.), *Practice and Theory of Automated Timetabling V*, Germany: Springer, 53-66.
- Goel, A. (2009). Vehicle Scheduling and Routing with Drivers' Working Hours, *Transportation Science*, 43(1), 17-26.
- Goel, A. (2018). Legal aspects in road transport optimization in Europe, *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, 114, 144-162.
- Goel, A., Archetti, C., and Savelsbergh, M. (2012). Truck driver scheduling in Australia, *Computers & Operations Research*, 39, 1122-1132.
- Goemans, M.X., and Rothvoss, T. (2020). Polynomiality for bin packing with a constant number of item types, *Journal of the ACM*, 67 (6), 38:1-38:21.
- Gopher, D., and Donchin, E. (1986). Workload - An examination of the concept, In: Boff, K.R., Kaufman, L., and Thomas, J.P. (Eds.), *Handbook of perception and human performance*, Vol. 2 *Cognitive processes and performance*, New York: John Wiley and Sons.

- Graham, R.L., Lawler, E.E., Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G. (1979). Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey, *In Annals of Discrete Mathematics*, 5, 287-326.
- Goudswaard, A., Kuipers, B., Schoenmaker, N., Houtman, I.L.D., Jettinghof, K., Ruijs, P.A.J., Savenije, W.M., Osinga, D.S.C., and Koomen, M. (2006). Road Transport Working Time Directive Self-employed and Night Time Provisions, *TNO Report R0622373/018-31364*, DG Energy and Transport.
- Jafari, H., and Salmasi, N. (2015). Maximizing the nurses' preferences in nurse scheduling problem: mathematical modeling and a meta-heuristic algorithm, *Journal of Industrial Engineering International*, 11, 439-458.
- Hadianti, R., Novianingsih, K., Uttunggadewa, S., Sidarto, K. A., Sumarti, N., and Soewono, E. (2013). Optimization Model for an Airline Crew Rostering Problem: Case of Garuda Indonesia, *Journal of Mathematical & Fundamental Sciences*, 45(3).
- Hale, H.B., Anderson, C.A., Williams E.W., and Tanne, E. (1968). Endocrine-metabolic Effect of Unusually Long or Frequent Missions C-130E or C-135B Aircraft, *Aerospace Medicine*, 39, 561-570.
- Hart, S.G. (2006). NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50, 904-908.
- Hart, S.G., and Hauser, J.R. (1987). Inflight application of three pilot workload measurement techniques, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 58(5), 402-410.
- Hart, S.G., and Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research, In: Hancock, P.A., and Meshkati, N. (Eds.), *Human mental workload*, North-Holland: 139-183.
- Howitt, J.S. (1969). Flight-deck Workload Studies in Civil Transport Aircraft, *In Conference Proceedings No 56 Measurement of Aircrew Performance*, Paris: AGARD.
- Huey, B.M., and Wickens, C.D. (1993). *Workload transition: Implications for individual and team performance*, National Academy Press, 54.
- ICAO. (2014). *Fatigue management guide for helicopter operators*.
- İnternet: Deniz Kuvvetleri Komutanlığı. (2024). Platformlar Helikopterler SH-70 Helikopterleri. URL: <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/sh-70-helikopterleri>, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.
- İnternet: IBM. (2024). ILOG CPLEX Optimization Studio 22.1.1 Documentation. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/icos/22.1.1>, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.

- İnternet: HT-18 Helicopter Training Squadron. (2024). Helo Communities Navy Helicopters. URL: <https://www.cnatra.navy.mil/tw5/ht18/helos-navy.asp#:~:text=Navy%20Helicopters&text=The%20primary%20mission%20of%20the,of%20surface%20craft%20and%20ships>, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.
- İnternet: SHGM. (2016). Aşırı Yorgunluk Risk Yönetimi (FRM) Çalıştayı düzenlendi. URL: <https://web.shgm.gov.tr/tr/manset-haber/5229-asiri-yorgunluk-risk-yonetimifrm-calistayi-duzenlendi>, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.
- Jenney, L.L., Older, H.J., and Cameron, B.J. (1972). Measurement of Operator Workload in an Information Processing Task, *NASA Contractor Report CR 2150*.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, J.C.D., and Vecchi, M.P. (1983). Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 671-680.
- Kleinberg, J., and Tardos, E. (2005). *Algorithm Design*, Boston: Pearson.
- Knust, F., and Xie, L. (2017). Simulated annealing approach to nurse rostering benchmark and real-world instances, *Annals of Operations Research*, 272, 187-216.
- Koç, Ç., Jabali, O., and Laporte, G. (2018). Long-haul vehicle routing and scheduling with idling options, *Journal of The Operational Research Society*, 69(2), 235-246.
- Kok, A.L., Meyer, C.M., Kopfer, H., and Schutten, J.M.J. (2010). A Dynamic Programming Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and the European Community Social Legislation, *Transportation Science*, 44(4), 442-454.
- Lageweg, B.J., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G. (1981). Computer-Aided Complexity Classification of Deterministic Scheduling Problems, *Technical Report BW 138/81*, Amsterdam: The Mathematical Centre.
- Lageweg, B.J., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G. (1982). Computer-Aided Complexity Classification of Combinatorial Problems, *Communications of the ACM*, 25, 817-822.
- Legrain, A., Bouarab, H., and Lahrichi, N. (2015). The nurse scheduling problem in real-life, *Journal of Medical Systems*, 39(1), 160.
- Lenstra, J.K., and Rinnooy Kan, A.H.G. (1979). Computational Complexity of Discrete Optimization Problems, *Annals of Discrete Mathematics*, 4, 121-140.
- Littell, D.E., and Joy, R.J.T. (1969). Energy cost of piloting fixed- and rotary-wing aircraft, *Journal of Applied Physiology*, 26, 282-5.
- Lysaght, R.J., Hill, S.G., Dick, A.O., Plamondon, B.D., and Linton, P.M. (1989). *Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies*, United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 17.

- McAtee, A., Russell, D., Feltman, K., Swanberg, D.E., Statz, J.K., Ramiccio, J., and Harding, T. H. (2017). Pilot cueing synergies for degraded visual environments, *Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017*, 10197, 150-159.
- Mendonca, F.A., Keller, J., and Lu, C. (2019). Fatigue identification and management in flight training: An investigation of collegiate aviation pilots, *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 6(5).
- Miller, J.G. (1960). Information input overload and psychopathology, *The American journal of psychiatry*, 116, 695-704.
- Mulder, G., Mulder, L.J.M., Meijman, T.F., Veldman, J.B.P., and Roon, A.M.V. (2000). A psychophysiological approach to working conditions, In: Backs, R.W., and Boucsein, W. (Eds.), *Engineering psychophysiology: Issues and applications*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 139-159.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Commercial Motor Vehicle Driver Fatigue, Long-Term Health, and Highway Safety: Research Needs*, Washington, DC: The National Academies Press.
- Özder, E., Özcan, E., and Eren, T. (2020). A Systematic Literature Review for Personnel Scheduling Problems, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 19, 1695-1735.
- Pinedo, M.L. (2007). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering)*, New York: Springer.
- Pinedo, M.L. (2022). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems* (6th ed.), New York: Springer International Publishing.
- Portugal, R., Lourenço, H.R., and Paixão, J.P. (2009). Driver scheduling problem modelling, *Journal of Public Transport*, 1, 103-120.
- Reid, G.B., and Nygren, T.E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload, *Advances in Psychology*, 52, 185-218.
- Rolfe J.M., and Lindsay S.J. (1973). Flight deck environment and pilot workload: biological measures of workload, *Applied Ergonomics*, 4(4), 199-206.
- Rolfe, J.M., Chappelow, J.W., Evans, R.L., Lindsay, S.J.E., and Browning, A.C. (1974). Evaluating Measures of Workload Using a Flight Simulator, *Proceedings of the AGARD Conference on Simulation and Study of High Workload Operations*, AGARD-CP-146, A4-l-A4-9.
- Sadeghniaat-Haghighi, K., and Yazdi, Z. (2015). Fatigue management in the workplace, *Industrial Psychiatry Journal*, 24(1), 12.

- Slowinski, R. (1980). Two approaches to problems of resource allocation among project activities - A comparative study, *Journal of the Operational Research Society*, 31(8), 711-723.
- Ryu, K., and Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(11), 991-1009.
- Tennstedt, C.R. (1973). The Pilot - His Problems and Requirements. In *Symposium on Flight Deck Environment and Pilot Workload*, London: Royal Aeronautical Society.
- Tilk, C., and Goel, A. (2020). Bidirectional labeling for solving vehicle routing and truck driver scheduling problems, *European Journal of Operational Research*, 283(1), 108-124.
- Turhan, A.M., and Bilgen, B. (2020). A hybrid fix-and-optimize and simulated annealing approaches for nurse rostering problem, *Computers & Industrial Engineering*, 145.
- US Department of the Navy. (2013). *Navy Planning, NWP 5-01*, Washington, DC: Headquarters US Navy.
- Van Laarhoven, P.J.M., and Aarts, E.H.L. (1987). *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Dordrecht: Reidel.
- Welford, A. T. (1967). Single-channel operation in the brain, *Acta Psychologica*, 27, 5-22.
- Wickens, C.D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance*, New York: Harper Collins Publishers Inc.
- Wierwille, W.W., and Casali, J.G. (1983). A Validated Rating Scale for Global Mental Workload Measurement Applications, *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 27(2), 129-133.



Gazili olmak ayrıcalıktır