



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

İş Analitiği Bilim Dalı

**ÇOKLU YETENEĞE SAHİP VE KISITLI KAYNAKLAR İLE PROJE
PLANLAMASI VE HARCAMA TAKVİMİ OLUŞTURULMASI: BİR
KARAR DESTEK MODELİ**

Öykü PASINLI

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2023

ÇOKLU YETENEĞE SAHİP VE KISITLI KAYNAKLAR İLE PROJE
PLANLAMASI VE HARCAMA TAKVİMİ OLUŞTURULMASI: BİR KARAR
DESTEK MODELİ

Öykü PASİNLİ

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İŞletme Anabilim Dalı
İŞ Analitiği Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2023

KABUL VE ONAY

Öykü PASİNLİ tarafından, “Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklar ile Proje Planlaması ve Harcama Takvimi Oluşturulması: Bir Karar Destek Modeli” başlıklı bu çalışma, 15.06.2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Aydın Ulucan (Başkan)

Doç. Dr. Mustafa Çimen (Danışman)

Prof. Dr. Fazıl Gökgöz

Prof. Dr. Kazım Barış Atıcı

Doç. Dr. Mehmet Soysal

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Uğur Ömürgönülşen

Enstitü Müdürü

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinleri yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

15.06.2023

Öykü PASİNLİ

“*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*”

- (1) Madde 6.1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6.2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7.1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.
* Tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.**

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında zgn olduğunu, **Doç. Dr. Mustafa imen** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

yk PASİNLİ

Her kararında beni koşulsuz destekleyen ve potansiyelimi keşfedebilmem için imkanlar sunan canım annem Ayşe Yeşim Güven'e ve babam Fuat Volkan Pasinli'ye, sevgili kardeşlerim Azra Pasinli'ye ve Tuncay Tuna Pasinli'ye, her zaman yanımda olan, her koşulda beni motive etmeyi başaran, varlığıyla güven veren hayat arkadaşım Kamer Sakallı'ya sonsuz teşekkürler.

TEŞEKKÜR

Hem tez çalışmam süresince hem de lisans hayatım boyunca mentor olarak gördüğüm, bilgisiyle beni aydınlatan, tecrübesiyle yol gösteren, her sorumu sabırla yanıtlayan ve her zaman bana inanan çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa Çimen'e teşekkürü borç bilirim.

Hem tez çalışmam hem de lisans hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli tez jüri hocam Doç. Dr. Mehmet Soysal'a emekleri ve görüşleri için teşekkür ederim.

Değerli görüşleri için tez jüri hocalarım Prof. Dr. Aydın Ulucan'a, Prof. Dr. Fazıl Gökgöz'e, Prof. Dr. Kazım Barış Atıcı'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca karşılaştığım sorunlarla ilgili bana yardımcı olan Cansın Kazanç'a ve Arş. Gör. Nizameddin Alyaparak'a, en stresli anımda bana destek olan Arş. Gör. Seda Büşra Saraç'a teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmam boyunca görüşleriyle bana destek olan ve yokluğumu aratmayan değerli iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

PASİNLİ, Öykü. *Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklar ile Proje Planlaması ve Harcama Takvimi Oluşturulması: Bir Karar Destek Modeli* Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2023.

Proje bazlı çalışan firmalarda proje planlaması, firmaların misyon ve vizyonlarına ulaşabilmeleri için önem taşımaktadır. Proje planlarının gerçeğe yakın oluşturulması projeyi verimli hale getirirken, proje planının gerçek hayatta uygulanabilir olmaması ise firma içerisinde plansız harcamalara ve süre kaybına yol açmaktadır. Bu kayıplar ise firma itibarını zedeleyip müşteri memnuniyetini düşürerek ileride planlanan satışları riske atmaktadır. Bu nedenle proje planının gerçekçi olması işletmeler için büyük önem taşımaktadır. Proje planlamasının gerçekçi yapılması ise, karar vericinin kaynaklarını ve proje gerekliliklerini tanımasıyla başlayan bir süreçtir. Karar vericinin, firmanın ve kaynaklarının potansiyeline hakim olması planlama esnasında karar vericiye büyük bir esneklik sağlamaktadır. Literatürde yer alan çalışmaların çoğunda kaynak, firmanın iş gücü olarak değerlendirilmektedir. Firma kaynaklarının projelere atanması aşamasında farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada, kaynaklarının birden fazla yeteneğe sahip olduğu varsayılan bir firma için proje planlaması yapılacaktır. Proje planlamasının ilk aşaması iş gücü atamaları, ikinci aşaması ise harcama takvimi oluşturulması olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen modelde maliyet minimizasyonu amaçlanmaktadır. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran özellikler; proje kapsamında tamamlanması gereken görevlerin eş zamanlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve optimal bir harcama takvimi oluşturulmasıdır. Numerik analizler sonucunda geliştirilen model ile iş gücü atamalarının optimal bir şekilde yapılabildiği, optimal bir harcama takvimi hazırlanabildiği ve bu esnada maliyetin de minimize edilebildiği gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlaması, Doğrusal Programlama,

Optimizasyon, Harcama Takvimi

ABSTRACT

PASİNLİ, Öykü. *Multi Skilled and Resource Constrained Project Planning and Material Ordering: A Decision Support Model* Master of Science Thesis, Ankara, 2023

Project planning is a critical topic for companies who work on a project basis. It is a tool for the companies to reach their mission and vision. When project plans are created based on real characteristics and capabilities of the company, they result in efficiency and success. However, if project plans are not applicable to real life scenarios, it may lead to an increase in unplanned expenses and loss of time within the company. These losses damage the company's reputation and reduce customer satisfaction, putting future sales at risk. For this reason, it is of great importance for businesses that the project plan is realistic and applicable. Making project planning realistic is a process that starts with the decision maker's recognition of resources and project requirements. The decision maker's mastery of the potential of the firm and its resources provides great flexibility to the decision maker during planning. In most of the studies in the literature, resources of a company is considered as the workforce of the company. There are different approaches for assigning company resources to projects. In this study, a project plan will be formed for a company whose resources are assumed to have more than one talent (multi skilled). The first stage of the project planning is evaluated as the assignment of the workforce to the tasks, and the second stage as forming a material ordering calendar. In developed model, the goal is to minimize the total costs of the project. The features that distinguish this study from other studies are; the tasks can be carried out simultaneously and an optimal expenditure schedule is created. With the model developed as a result of numerical analysis, it was observed that the labor force assignments could be made optimally, an optimal expenditure schedule could be prepared, and the cost could be minimized in the meantime.

Keywords

Multi Skilled Resource Constrained Project Scheduling, Linear Programming, Optimization, Material Ordering

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	ii
ETİK BEYAN.....	iii
ADAMA.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
TABLOLAR DİZİNİ.....	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
GİRİŞ.....	1
1. BÖLÜM: KAVRAMLAR VE LİTERATÜR.....	6
1.1 KAVRAMLAR.....	6
1.2 PROJE PLANLAMA VE FİYATLANDIRMA PROBLEMLERİ....	9
1.3 KAYNAK KISITLI PROJE PLANLAMA PROBLEMLERİ.....	10
1.3.1 Kaynaklar	11

	xi
1.3.1.1	Yenilenebilen Kaynaklar 11
1.3.1.2	Yenilenemeyen Kaynaklar 11
1.3.1.3	Çift Kısıtlı Kaynaklar 11
1.3.2	Faaliyetler/Görevler 12
1.3.2.1	Kesintili (Preemptive) Faaliyetler 12
1.3.2.2	Kesintisiz (Non-Preemptive) Faaliyetler 12
1.3.3	Amaç Fonksiyonu 12
1.3.4	Kaynak Kapasitesi 13
1.3.4.1	Deterministik Kaynak Kapasitesi 13
1.3.4.2	Stokastik Kaynak Kapasitesi 14
1.4	ÇOKLU YETENEĞE SAHİP VE KISITLI KAYNAKLI PROJE PLANLAMA PROBLEMLERİ (ÇYSKKPPP)..... 14
1.5	LİTERATÜR TARAMASI..... 16
2. BÖLÜM:	PROBLEM TANIMI VE MODELİ..... 23
2.1	FİYAT TEKLİFİ HAZIRLANMASI, İŞÇİ ATAMASI VE HARCAMA TAKVİMİ OLUŞTURULMASI PROBLEM TANIMI 23
3. BÖLÜM:	NUMERİK ANALİZLER..... 32
3.1	ÖRNEK OLAY VERİ SETİNİN TANITILMASI..... 32
3.2	ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜ VE ANALİZİ 40
3.3	ÖRNEK OLAY ÜZERİNDE SENARYO ANALİZLERİ..... 47
3.3.1	Senaryo 1: Görevlerin Eş Zamanlı Gerçekleştirilmediği Varsayımının Analizi 47
3.3.2	Senaryo 2: Malzeme Kısıtları 52

3.3.2.1	Senaryo 2.1: Bütün Malzemelerin İlk Hafta Alındığı Varsayımının Analizi	55
3.3.2.2	Senaryo 2.2: Bütün Malzeme Siparişlerinin İlgili Görevin Başladığı Hafta Verildiği Varsayımının Analizi . . .	56
3.3.2.3	Senaryo 2.3: Her Hafta İhtiyaç Duyulacak Kadar Malzeme Siparişinin Verildiği Varsayımının Analizi	57
3.4	BÜYÜK BOYUTLU PROBLEM ÖRNEĞİ	58
3.4.1	Büyük Boyutlu Problem Örneğinin Tanıtılması	59
3.4.2	Büyük Boyutlu Problem Örneğinin Çözümü ve Analizi	62
SONUÇ	65
KAYNAKÇA	69
EK 1:	ORJİNALLİK RAPORU	74
EK 2:	ETİK KURUL MUAFİYET FORMU	75

KISALTMALAR DİZİNİ

KKPPP	Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri
ÇYSKKPPP	Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemleri

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1	Literatür Tablosu	17
Tablo 2	Notasyon Tablosu	26
Tablo 3	Görevlerin Gerektirdiği Yetenek ve Uzmanlıklar	33
Tablo 4	Görevlerin Tamamlanması için Gereken Süreler	34
Tablo 5	Örnek Olay Veri Seti Görevlerin Öncelik Matrisi	36
Tablo 6	Görevlerin Gerektirdiği Malzemeler ve Miktarları (birim miktar) . .	37
Tablo 7	Malzemelerin Haftalık Fiyatları (TL)	38
Tablo 8	Malzeme Sabit Sipariş ve Stok Maliyetleri (TL)	39
Tablo 9	Örnek Olay Veri Seti Özet	39
Tablo 10	Örnek Olay Özet Sonuç Tablosu	40
Tablo 11	Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)	41
Tablo 12	Firma Kaynakları Çalışma Süreleri (Saat)	42
Tablo 13	İkili Değişken-Atama Tablosu	43
Tablo 14	İkili Değişken-Sipariş Tablosu	44
Tablo 15	Sipariş Tablosu (birim miktar)	45
Tablo 16	Envanter Tablosu (birim miktar)	46
Tablo 17	Senaryolar	47
Tablo 18	Senaryo 1 Özet Sonuç Tablosu	49
Tablo 19	Senaryo 1 Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)	50

Tablo 20	Senaryo 1 Sipariş Tablosu (birim miktar)	51
Tablo 21	Senaryo 2 Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)	53
Tablo 22	Senaryo 2 İkili Değişken-Atama Tablosu	54
Tablo 23	Senaryo 2 Özet Sonuç Tablosu	55
Tablo 24	Senaryo 2.1 Envanter Tablosu (birim miktar)	56
Tablo 25	Senaryo 2.2 Envanter Tablosu (birim miktar)	57
Tablo 26	Senaryo 2.3 Sipariş Tablosu (birim miktar)	58
Tablo 27	Büyük Boyutlu Problem Örneği-Görev Süreleri	60
Tablo 28	Büyük Boyutlu Problem Örneği Özet	62
Tablo 29	Büyük Boyutlu Problem Örneği Özet Sonuç Tablosu	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1	Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri	10
Şekil 2	Senaryo 1 Görev Öncelikleri	48

GİRİŞ

Dünya genelinde, işletmeler bünyesinde oluşturulan projeler işletmelerin amaçlarına ve hedeflerine hizmet etmektedir. Sonucunda bir ürün veya çözüm geliştirilen projeler, işletmelerin faaliyetlerinin planlanması ve belirli bir zaman çizelgesine oturtulmasında kritik rol oynamaktadır. Projeler işletmelerin büyümek, gelişmek ve hem yerel hem de küresel pazarlarda kendilerine yer bulamabilmek için kullandıkları araçlardır. Bu araçlar işletmenin sürekli faaliyetini, dolayısıyla da rekabetçi bir ortamda hayatta kalabilmesini sağlamaktadır. Birçok karar verme sürecini içerisinde barındıran projeler, karışık yapılara sahiptir. Projelerin işletmeler için taşıdığı önem nedeniyle bu yapının anlaşılabilmesi ve iyileştirilebilmesi için literatürde proje planlama, yönetme, bütçeleme, maliyetlendirme konularına ilişkin fazla sayıda ve çeşitlilikte çalışma bulunmaktadır.

İşletmelerin başarılı projeler gerçekleştirebilmesi ve belirlenen sürelerde hedeflerine ulaşabilmesi ancak doğru planlamayla mümkün olabilmektedir. Birçok senaryoda projeler işletmelere kârlılık sağlasa da, doğru ve optimal planlama yapılmadığında projeler beklendiği kadar kârlılık sağlayamamakta hatta bazı durumlarda zarara ve itibar kaybına sebep olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı karar vericinin durumu iyi analiz edebilmesi, belirsizliklerin farkında olması ve bu unsurları en aza indirmeye çalışması önem arz etmektedir.

Proje planlama problemleri kısaca bir amaca ulaşabilmek için tamamlanması gereken faaliyetlerin gerçekleşme sürelerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Habibi ve diğ., 2018). Projenin en kârlı şekilde amacına ulaşabilmesi için, proje içerisindeki süreçlerin yönetilerek gerçekleşme sürelerinin optimal hale getirilmesi gerekmektedir. Proje planlaması 4 konseptten oluşmaktadır (Kolisch & Padman, 2001);

- Kaynaklar,
- Faaliyetler,
- Öncelik İlişkileri,
- Performans Ölçümü.

Projeler, faaliyet (literatürde iş paketi, görev, aktivite olarak da bahsedilmektedir) kümelerinden oluşmaktadır. Faaliyetler proje amacının gerçekleştirilebilmesi için tamamlanması gereken süreçlerdir. Faaliyetler projelerin kilometre taşları niteliğindedir. Projelerin tamamlanma aşamalarını göstermektedir. Faaliyetlerin hepsi tamamlandığında proje de tamamlanmış olur. Öncelik ilişkisi konsepti de faaliyetlerle ilintilidir. Literatürde işlenen problemlerde, faaliyetlerin bir kısmı veya tamamı arasında öncelik ilişkisi bulunmaktadır. Bunun sebebi çoğunlukla teknolojik gerekliliklerdir. Öncelik ilişkisi, bir faaliyet tamamlanmadan diğer faaliyetin başlayamama durumunu olarak ifade edilmektedir. Diğerinden önce tamamlanması gereken faaliyete "Öncül Faaliyet", başlayabilmesi için başka bir faaliyetin tamamlanması gereken faaliyete ise "Ardıl Faaliyet" ismi verilmektedir.

Projedeki faaliyetler, işletmedeki kaynaklarla veya gereksinim duyulan bazı kaynakların dışarıdan kiralanmasıyla tamamlanmaktadır. Kaynak kavramının literatürde makine, malzeme, hammadde, işçi vb. birçok varlık için kullanıldığı görülebilmektedir ancak en yaygın haliyle insan kaynaklarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Małachowski ve Korytkowski (2016) tarafından da çalışmalarında bahsedildiği üzere; günümüzde yeterli bütçesi olan her işletme makine, ekipman, malzeme vb. kaynakları hazır olarak alabilecek durumdadır. Her işletme rakipleriyle benzer imkanlara sahip olduğundan, bu noktada fark yaratmak günümüzde pek mümkün olmamaktadır. İşletmeleri ayrıştıran, bazı işletmeleri sektör lideri bazılarını ise başarısız yapan asıl faktör işletmenin çalışanları aracılığıyla kazandığı uzmanlıktır. Bu nedenle işletmenin asıl varlığı çalışanları sayılmaktadır ve ancak çalışanlarının tecrübesi ve bilgisiyle işletme kendi kaynaklarını etkin olarak yönetebilmekte, performansını artırarak gelişim sağlayabilmektedir.

Kaynaklar literatürde 3 kategoriye göre ayrılmış olup (Yenilenebilen, Yenilenemeyen, Çift Kısıtlı) bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde detaylarına ve tanımlarına yer verilecektir. Kaynakların faaliyetlere doğru stratejilerle yerleştirilmesi projenin başarı oranını direkt etkilemektedir. Doğru stratejilerin belirlenebilmesi için de iyi analizler yapılması gerekmektedir. Alınan eğitimler, sektörde kazanılan tecrübe, verimlilik seviyesi, bilgi birikimi vb. özelliklerin hepsi işçiden işçiye değişebilmektedir. Dolayısıyla işletmenin, kaynaklarının özellikleri hakkında bilgi sahibi olması atama yapılırken işletmeye esneklik sağlamaktadır. Aynı zamanda bazı durumlarda,

kaynakların fazla ve gereksiz kullanımını engellemektedir. Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri de bu durumu engellemek için literatüre tanıtılmıştır.

Proje planlama problemlerinde gerçek hayata yaklaşmak için kullanılan varsayımlardan biri kaynakların kısıtlı olmasıdır. Günümüzde işletmelerin çalışanlarına tanımakla yükümlü olduğu haklar bulunmaktadır. Bu haklar sonucunda ve işletmenin de işe alım gücünün sınırsız olmadığı düşünüldüğünde; sınırsız kaynak ile çalışılması gerçek hayat senaryolarında mümkün olmamaktadır.

Tek yetenekli çalışanlardan oluşan bir işletmede, çalışanlar yalnızca tek alanda çalışabildikleri için kendi alanlarında atanabilecekleri müsait bir faaliyeti beklemek durumunda kalmaktadırlar. Bu durumda çalışanların aktif olmadıkları atıl süreler oluşmakta ve bu süreler projeye gider olarak yansımaktadır. Ayrıca faaliyetlerin zamanında tamamlanabilmesi için her yetenek gerekliliğine ayrı ayrı işçiler atandığından çalışan miktarı ihtiyacı da artmaktadır. Diğer yandan, çoklu yeteneğe sahip çalışanlardan oluşan işletmeler daha az çalışana ihtiyaç duymaktadır çünkü farklı faaliyetlerin farklı farklı yetenek gereksinimlerini karşılayabilmektedirler. Çoklu yeteneğe sahip çalışanların atıl zamanları da tek yetenekli çalışanlara göre daha az olmaktadır. Çoklu yeteneğe sahip çalışanlardan oluşan bir işletmenin başka bir avantajı ise, planlamayı çalışanlarının kısıtlı yeteneklerine göre yapmak zorunda olmadığından, çalışanların kapasitesinden çok müşterinin ihtiyaçlarına odaklanabilmesidir (Małachowski & Korytkowski, 2016). Bu durum da müşteri memnuniyetinde ve dolayısıyla satışlarda (yani gelirden) artışa sebep olmaktadır. Małachowski ve Korytkowski (2016) tarafından, çoklu yeteneğe sahip çalışanların genel özelliklerine de değinilmiştir. Yazarlar, çoklu yeteneğe sahip çalışanların öğrenmeye ve gelişmeye daha yatkın olduklarını, değişikliklere daha kolay adapte olduklarını belirtmiştir. İşletmede bu yapının sağlanması sonucunda çalışan memnuniyetinin arttığından ve bu etkenin üretkenlik, verimlilik üzerinde pozitif bir etkisi olduğundan bahsedilmiştir. Deneyimli ve eğitimli çoklu yeteneğe sahip işçilerin, işletmelerin üretkenliğine, ürün kalitesine ve maliyete doğrudan katkı sağladığı belirtilmiştir.

Geçmiş yıllardan günümüze kadar proje planlaması için pek çok yazılım geliştirilmiştir ancak bu alanda yapılan bu çalışmalara rağmen, halen işletmelerin en büyük

gündemi doğru ve gerçekçi proje planlamasıdır. Kaynakların optimal kullanılması, kaynaklardan maksimum verimin alınamaması, süre veya maliyet kısıtlarının sağlanamaması halen projelerde yaygın olarak karşılaşılan sorunlar arasındadır. Bu nedenle bu alanın halen gelişime ve araştırmaya açık olduğu değerlendirilmektedir. Bu tez çalışmasında oluşturulacak problemin çözülmesiyle birlikte maksimum verimlilik, kaynakların doğru kullanımı, süre, maliyet ve öncelik kısıtlarının hepsinin sağlanması hedeflenmektedir. Çoklu yeteneğe sahip çalışanları olduğu varsayılan bir firmada, bir projeye fiyat teklifi hazırlanması için model geliştirilmiştir. Problemin ilk aşaması, iş gücünün proje kapsamında belirlenen görevlere atanmasıdır. Bu aşamada bazı görevlerin eş zamanlı olarak gerçekleştirilebildiği varsayılmıştır. Problemin ikinci aşaması ise harcama takvimi oluşturulmasıdır. Bu harcama takvimi ile, görevlerin tamamlanması için ihtiyaç duyulan malzemelerin siparişlerinin ve bu malzemelere ilişkin elde bulundurma maliyetlerinin en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Çalışma giriş ve sonuç bölümleri dahil olmak üzere 5 bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde, proje planlaması tanımlanmış ve önemine değinilmiştir. İşletmelerin birbirlerinden hangi konularda ayrıştığından bahsedilmiştir. Proje planlama konseptleri ayrı ayrı açıklanmıştır. Aynı zamanda kaynak planlamasının, seçiminin ve analizinin önemi vurgulanmıştır.

İkinci bölümde, proje planlama problemleri için literatürde ve tez çalışmasında kullanılan kavramlar açıklanmıştır. Proje planlama problemlerine ilişkin zaman içerisinde araştırılan konular başlıklar halinde kronolojik olarak sıralanmış ve ayrı ayrı açıklanmıştır. Kaynak türlerine ilişkin kategorizasyon da örneklerle açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemleri için literatür taraması yapılmış ve ilintili olan çalışmaların detaylarına yer verilmiştir. Bu tez çalışmasıyla en alakalı olduğu düşünülen 24 makale ile literatür tablosu oluşturulmuş ve varsayımlar bu tez çalışmasındaki problem varsayımları ile karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde problem tanımına yer verilmiştir. Organizasyon yapısından ve varsayımlardan bahsedilmiştir. Sonrasında ise bahsedilen probleme ilişkin hazırlanan matematiksel modele yer verilmiştir.

Sonuç bölümünde ise yapılan analizler ve sonuçları incelenecek ve tez çalışmasıyla ilgili genel değerlendirmeler yapılacaktır.

1. BÖLÜM

KAVRAMLAR VE LİTERATÜR

Proje planlamada kaynaklar ve kaynak kısıtlılığı birçok açıdan ele alınmıştır. Bu bölümde, çoklu yeteneğe sahip iş gücü ve kaynak kısıtlılığı ile proje planlamasına ilişkin zaman içerisinde yapılan araştırmalar ve araştırmacıların değindikleri farklı konular, bakış açıları açıklanacak ve tartışılacaktır.

1.1 KAVRAMLAR

Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde kullanılacağı için tanımlanması gereken kavramlara aşağıda yer verilmiştir.

- **Proje Maliyeti:** Bu tez çalışmasında ele alınan örnek projeye ilişkin giderler; işçilik maliyeti, alt yüklenici hizmet alımı maliyeti, finansman gideri, eskalasyon, stok maliyeti ve gecikme maliyetinden oluşmaktadır.
- **İşçilik Maliyeti:** Projeye ilişkin işçilik maliyeti, iş gücünün projeye harcadığı süre üzerinden hesaplanır. İş gücünün mesai saatleri içerisinde projeye harcadığı süre farklı maliyetlendirilirken; mesai saatleri dışında harcadığı süre farklı maliyetlendirilmektedir. İş gücü ücretleri de iki farklı etkene göre değişmektedir. Bu etkenler; iş gücünün bağlı olduğu masraf yeri ve iş gücünün kıdemidir.
- **Alt Yüklenici Hizmet Alımı Maliyeti:** Projeyi gerçekleştiren işletmenin kendi kaynaklarının yeterli olmaması durumunda, alt yüklenici hizmet alımı seçeneği de bulunmaktadır. Alt yüklenici hizmet alımı, işletmenin kendi iş gücünü çalıştırmasına göre daha maliyetli olmasına rağmen; projenin gecikerek cezaya girmesini önlemek için kullanılabilir.
- **Harcama Takvimi:** Proje kapsamında müşteriden farklı aralıklarda ödemeler tahsis edilecektir. Bu ödemeler, projenin bütçesini oluşturmaktadır. Proje kapsamında ihtiyaç duyulan malzemeler bu ödemelerle satın alınmaktadır. Proje ömrünün uzun olduğu durumlarda, malzeme satın alım takviminin iyi yönetilmesi gerekmektedir. Projenin en başında alınan malzemeler stok maliyeti oluş-

tururken, ilerleyen zamanlarda bu alımların yapılması ise enflasyon/döviz kuru farkları sebebiyle zarar riski oluşturmaktadır.

- **Stok Maliyeti (Elde Bulundurma Maliyeti):** Projenin ilerleyen zamanlarında ihtiyaç olacak makine ve malzemelerin önceden alınarak depolarda bekletilmesi sonucu oluşan maliyettir.
- **Ceza Maliyeti:** Projenin, öngörülen ve müşteri ile anlaşılan bitiş tarihinden daha geç bitmesi sonucunda oluşan maliyeti ifade etmektedir. Gecikme maliyeti sabit değildir, gecikme süresi arttıkça gecikme maliyeti de artmaktadır.
- **Envanter:** Projenin tamamlanması için görevlerde ihtiyaç duyulacak malzemelerin işletme bünyesinde bulunan miktarlarını ifade etmektedir.
- **Proje Ömrü:** Proje ömrü, planlama aşamasında yalnızca öngörülebilmektedir. Gerçek proje ömrü, projede birbirini takip eden görevlerin gerçekleşme süreleri toplanarak elde edilmektedir.
- **Görev:** Görevler, projenin kırılımlarıdır. Görevlerin toplam gerçekleşme süresi, proje ömrünü vermektedir. Görevler belirli yetenekler ve bu yeteneklere ilişkin minimum uzmanlık seviyeleri gerektirmektedir ve yalnızca bu yetenek ve uzmanlık seviyesi kombinasyonuna sahip iş gücü görevlere atanabilmektedir. Görevler projelerin aşamalarını gösteren kilometre taşları niteliğindedir.
- **İş Gücü:** Bu çalışmada işçi yerine iş gücü kavramı kullanılacaktır. Bunun sebebi, görevlere yapılan atamaların bireysel olmamasıdır. Atama esnasında işletmeye esneklik kazandırılması adına atamalar aynı masraf yeri altında, aynı iş kulvarında, aynı kıdeme sahip, benzer yeteneklerde aynı seviyelerde uzmanlaşan kişilerin kümülatif müsait çalışma süreleri üzerinden yapılmaktadır. Bu kümülatif müsait çalışma saatleri ise iş gücü olarak adlandırılmıştır.
- **İş Kulvarı:** Bu tez çalışmasında iş kulvarı kavramı, çalışanların alanlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Teknisyenlik kulvarı, mühendislik kulvarı ve idari kulvar olarak üçe ayrılmaktadır. Her kulvarda çalışanlar tecrübelerine ve eğitimlerine göre farklı kademelere sahip olabilmektedir. İşçilik maliyetleri de kulvarlar ve kademeler arasında değişiklik göstermektedir.

- **İşçi/İş Gücü Yetenekleri:** Yetenek, bir işçinin bir işin gerektirdiği aktiviteleri yapabilme kapasitesini göstermektedir. Tecrübe ve bilgi birikimlerine göre aynı masraf yeri altındaki işçi gruplarının bile sahip oldukları yetenekler değişkenlik gösterebilmektedir.
- **Mesai Saati:** Firmanın kaynaklarının mesai saati olarak kabul edilen, iş gücü gruplarının her iş günü çalışmaları gereken minimum zaman aralığını ifade etmektedir. Bu zaman aralığında işçilik maliyetleri olduğu gibi probleme dahil edilmektedir.
- **Fazla Mesai:** Mesai saatlerinin yeterli olmadığı durumlarda iş gücü grupları, yasal sınırlar içerisinde kalacak şekilde haftaiçi mesai saatlerinden sonra veya tatil günlerinde de çalışmaya devam edebilmektedir. Fazla mesaide gerçekleştirilen işçiliklerin maliyetleri, mesai saati maliyetlerinin ikiyle çarpılmasıyla elde edilmektedir ve bu şekilde probleme dahil edilmektedir.
- **Homojen/Heterojen Verimlilik:** Bu kavram, literatüre Heimerl ve Kolisch (2010) tarafından kazandırılmıştır. Önceki çalışmalarda, işçiler farklı yeteneklere sahip olsalar da hepsinin çalışma süresinin göreve aynı katkıyı sağladığı kabul edilmekteydi. Uzmanlık seviyesi konseptinin çoklu yeteneğe sahip ve kısıtlı kaynaklı proje planlama problemlerine kazandırılmasının ardından verimlilik, ölçülebilir bir kavram haline gelmiştir. Bu konseptte göre, uzmanlık seviyesi yüksek olan işçiler bir görevi daha kısa sürede tamamlarken uzmanlık seviyesi düşük olan işçilerin aynı görevi tamamlaması daha uzun sürmektedir. Dolayısıyla görev ve proje ömrü de atanan işçilere/iş gücüne göre farklılık göstermektedir.
- **Masraf Yeri:** Bu çalışmada masraf yeri kavramı, işletmedeki müdürlükleri ifade etmek için kullanılmaktadır. İşletmeye ilişkin genel yönetim giderleri masraf yeri maliyetlerine dahil edilmektedir. Bir masraf yerinin maliyeti o masraf yerindeki işçilere, kullanılan ekipmana, çalışma alanına vb. bir çok farklı etkene göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, iki ayrı iş gücü kadem, uzmanlık seviyesi, yetenek konseptleri açısından aynı olsa bile, farklı masraf yerlerinde çalışıyorlarsa işçilik maliyetleri değişkenlik göstermektedir.
- **Kıdem:** Bu tez çalışmasında bahsi geçen işletmenin organizasyon yapısı gereği

kıdem, çalışanın iş kulvarındaki tecrübe süresine, aldığı eğitimlere ve setifikalara göre belirlenmektedir.

- **Deterministik/Stokastik Kapasite:** Deterministik kapasite, proje planlaması yapılırken işletmenin kendi kaynaklarına ilişkin müsaitliklerinin bilindiği varsayılan kapasite türüdür. Stokastik kapasite ise, daha belirsiz ortamlarda işletmenin kendi kaynaklarının müsait çalışma sürelerini bilemediği/öngöremediği durumlarda kullanılan kapasite türüdür. Stokastik kapasite daha çok, fazla projeli işletmeler tarafından kullanılmaktadır. M. Wang ve diğ. (2022) çalışmasında, stokastik kapasite konseptinin kullanımının özellikle COVID-19 pandemisinden sonra arttığını belirtmektedir.

1.2 PROJE PLANLAMA VE FİYATLANDIRMA PROBLEMLERİ

Proje planlaması ve yönetimi, II. Dünya Savaşı'ndan itibaren ekonomik, teknolojik ve metodolojik gelişmelerle beraber sıklıkla araştırmacıların konusu olmuştur. Projeler, işletmenin misyonuna hizmet eden amaçlarla oluşturulmaktadır(Tavares, 2002). Proje yönetimi; planlama, organizasyon ve kaynak yönetimi konseptlerinden oluşmaktadır (Vanhoucke, 2018).

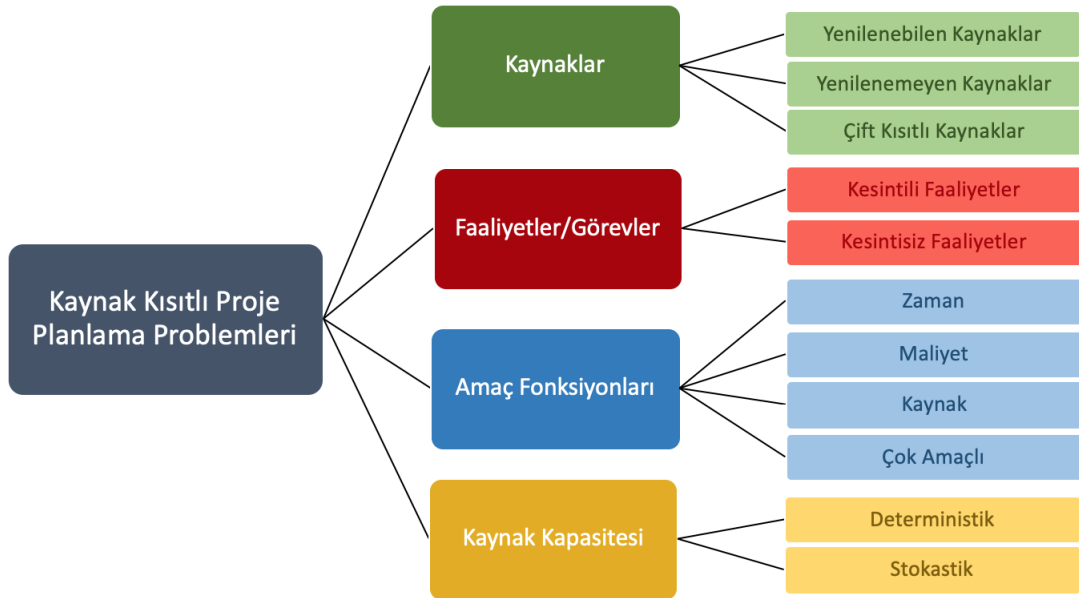
Kaynakların kullanımı ve harcama planından oluşan proje planları, maliyetlerin azalması ve kârlılıkta artış için elzemdir. İş gücü çizelgelemesi proje yönetimi için en gerekli unsur olup bu çizelgeleme aynı zamanda projenin uygulama kılavuzudur (Hartmann & Briskorn, 2022).

Proje planlama problemleri, sınırlı veya sınırsız kaynakların önceden belirlenmiş bir planlama aralığında yer alan faaliyetlere en verimli şekilde atanması üzerine yoğunlaşır (Afshar-Nadjafi, 2021). Bu optimizasyon sürecinde maliyet veya proje süresi en aza indirgenir. Bu şekilde proje maliyetlendirmesi/fiyatlandırması da yapılmış olur.

1.3 KAYNAK KISITLI PROJE PLANLAMA PROBLEMLERİ

Kaynak kısıtlı proje planlama problemleri, birbirine bağımlı faaliyet/görev setlerinden oluşan ve görevlerin gerçekleştirilebilmesi için sınırlı miktarda bulunan kaynaklara ihtiyaç duyan kombinatoriyel problem türleridir (Hosseinian & Baradaran, 2020). Bu problem türleri literatürde inşaat, üretim planlama, Ar-Ge, tedarik zinciri ve servis hizmetleri gibi alanlarda uygulamaya konmuştur (Xie ve diğ., 2021).

Yöneylem araştırması alanında, bu problemlerde ve işletmelerde kullanılan kaynakların optimizasyonu birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Bu çalışmalarda kaynak; makineler, araçlar, hammadde, işçi vb. olarak ele alınmıştır (Reid ve diğ., 2018). Bu alanda en sık karşılaşılan problem ise kaynak kısıtlılığıdır. Kaynak kavramı araştırmacılar tarafından yenilenebilen, yenilenemeyen ve çift kısıtlı olacak şekilde üçe ayrıştırılarak incelenmiş ve kullanılmıştır (Habibi ve diğ., 2018). Bu kategorizasyon Słowiński (1980) tarafından literatüre kazandırılmıştır.



Şekil 1. Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri

Şekil 1’de görülebileceği üzere Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri 4 başlıktan oluşmaktadır;

- Kaynaklar,
- Faaliyetler/Görevler,
- Amaç Fonksiyonu,
- Kaynak Kapasitesi Türü.

Bu başlıkların detaylarına ilerleyen bölümlerde yer verilecektir.

1.3.1 Kaynaklar

1.3.1.1 Yenilenebilen Kaynaklar

Yenilenebilen kaynaklar, yalnızca proje ömrüne bağlı olmayan, firmanın bünyesinde bulunan ve kullanıldıktan bir süre sonra tekrar müsait olarak değerlendirilebilecek kaynakları ifade etmektedir. Bu bağlamda, iş gücü ve üretim makineleri yenilenebilir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Carlier ve Moukrim, 2015, s. 177-189'dan akt., (Habibi ve diğ., 2018))

1.3.1.2 Yenilenemeyen Kaynaklar

Yenilenemeyen kaynaklar yenilenebilen kaynakların aksine, proje ömrü ile sınırlandırılmıştır. Proje ömrü boyunca ulaşılabilir olup proje tamamlandıktan sonra kullanılması mümkün olmayan, yenilenmeyen kaynaklar bu kategoride değerlendirilmektedir. Hammadde ve proje bütçesi, yenilenemeyen kaynaklara verilebilecek örnekler arasındadır.

1.3.1.3 Çift Kısıtlı Kaynaklar

Çift kısıtlı kaynaklar, hem yenilenebilen hem de yenilenemeyen kaynakların özelliklerinden bazılarını taşımaktadır. Bu kaynaklar, projede yer alan görev süreleri ve proje ömrü ile sınırlandırılmıştır. Enerji ve para, bu kaynaklara verilebilecek örnekler arasındadır. Projenin uygulanması aşamasında bu kaynaklara ilişkin ulaşılabilirlik ve kullanım kısıtları bulunduğu için çift kısıtlı kaynaklar olarak değerlendirilmektedir.

1.3.2 Faaliyetler/Görevler

1.3.2.1 Kesintili (Preemptive) Faaliyetler

Kaynak Kısıtlı Proje Planlama alanında yapılan çoğu araştırmada projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken faaliyetlerin bölünemeyeceği varsayılmaktadır. Azınlığı oluşturan bazı çalışmalarda ise kesintili faaliyet varsayımı kullanılmıştır. Kesintili faaliyet varsayımının kullanıldığı bir problemde, devam eden faaliyet herhangi bir zamanda durdurulup tekrar başlatılabilmektedir. Faaliyetin kesilmesi çoğunlukla yetersiz kaynak, malzeme veya makine bozulmaları vb. sebeplerden gerçekleşmektedir. Faaliyet kesintisinin olduğu andan itibaren faaliyetin kaldığı yerden devam etmesine kadar geçen süre için probleme ayrıca maliyet yansıtılmamaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların bazılarında faaliyet kesintisi varsayımı kullanılmış olsa bile kesintiler için bir üst sınır belirlenmiştir. Bu üst sınır, bir faaliyetin en fazla kaç kez bölünebileceğini ifade etmektedir. Habibi ve diğ. (2018) çalışmasında, kesintili faaliyet varsayımına sahip Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemlerinin gerçek hayat senaryolarına daha yakın olduğunu vurgulamıştır.

1.3.2.2 Kesintisiz (Non-Preemptive) Faaliyetler

Kaynak Kısıtlı Proje Planlamasına ilişkin yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda kesintisiz faaliyet varsayımı kullanılmaktadır. Bu varsayımın kullanılabilmesi için, kaynakların da yenilenebilir olması gerekmektedir. Faaliyetlerin başladıktan sonra hiç bölünmeden tamamlandığı varsayılmaktadır. Herhangi bir görev veya makine/malzeme değişimi olması durumunda değişimin hiç vakit kaybedilmeden yapıldığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla bu değişikliklere ilişkin kaybedilen süre olmadığı veya ayrıca maliyet oluşmadığı varsayılmaktadır.

1.3.3 Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu, karar vericinin amacını tanımlamaktadır. Problemde optimali aranan unsurdur. Problemde amaç, problemin ele alınma biçimine göre değişkenlik göstermektedir. Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemlerinin çoğunda amaç proje süresi

ve/veya proje maliyeti minimizasyonudur. Karar verici, problemin hassasiyetine göre amacını belirlemektedir. Projeye elde edilecek ürünün/sistemin/hizmetin müşteriye teslim tarihi daha önemliyse amaç fonksiyonu proje süresi minimizasyonu olacaktır. Geliştirilecek ürün/sistem/hizmet için bir karşılık ayrılması durumu mevcutsa, karar vericinin amacı proje maliyeti minimizasyonu olacaktır. Bu durumda planlama, proje bütçesinin öngörülmesi için yapılacaktır.

Proje süresi ve maliyetine ek olarak; literatürde yer alan çalışmaların bazılarının amaç fonksiyonlarında kaynak minimizasyonuna da rastlanmaktadır. Bu tür çalışmalar Kaynak Yatırım Problemleri başlığı altında incelenmektedir (Habibi ve diğ., 2018). Bu tür problemlerde, işçilere ilişkin maliyetler minimize edilerek projede mümkün olduğunca az kaynak kullanılması amaçlanmaktadır.

Bahsedilen unsurlar dışında literatürde yer alan çalışmalarda başka amaçların da kullanıldığını görmek mümkündür. Ürün/sistem/hizmet kalitesinin maksimizasyonu, alt yükleniciden hizmet alımının minimizasyonu, ceza maliyetinin minimizasyonu vb. gibi unsurlar da bir projede amaç olarak kullanılmışlardır.

Aynı zamanda, projenin farklı amaçları aynı derecede gerektirdiği durumlar da bulunmaktadır. Bu durumda, çok amaçlı fonksiyonlar kullanılmaktadır. Çok amaçlı fonksiyonlardan en sık rastlanana; proje süresi ve maliyetinin aynı anda minimize edilmesidir. Bunun dışında, problemin yapısına göre oluşan farklı hassasiyetlerden yola çıkarak farklı çoklu amaç fonksiyonlu problemlere de rastlanmaktadır.

1.3.4 Kaynak Kapasitesi

1.3.4.1 Deterministik Kaynak Kapasitesi

Deterministik kaynak kapasitesi varsayımının kullanıldığı bir çalışmada, projeye başlanmadan önce bütün kaynakların müsaitlik/kullanılabilirlik durumlarının belirli olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmalarda, planlama süresi içerisinde problemdeki bütün parametrelerin bilindiği ve sabit olduğu varsayımı hakimdir.

1.3.4.2 Stokastik Kaynak Kapasitesi

Stokastik kaynak kapasitesi varsayımının kullanılması için farklı sebeplerden bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Faaliyetlerin tamamlanması için gereken sürelerin belirli olmaması,
- Kaynakların müsaitlik/kullanılabilirlik durumlarının bilinmemesi,
- Projede ciddi gecikmelere sebep olacak afet, iklim değişikliği, hastalık vb. olayların gerçekleşme ihtimalidir. (Habibi ve diğ., 2018)

Bahsedilen sebeplerden biriyle karşılaşılması durumunda veya başka bir deyişle planlama atmosferine belirsizliğin hakim olması durumunda zaman veya bütçe kaybı yaşanmaması adına stokastik kaynak varsayımı kapasitesi çalışmalarda kullanılmaktadır.

Kaynak kısıtlı proje planlama (KKPP) problemlerinde bazı sınırlı varsayımlar bulunduğundan bu problemler gerçek dünyada işletmelerin yüzleştiği karmaşık ve iç içe geçmiş sorunların çözümleri için yetersiz kalmıştır (Hosseinian ve diğ., 2019). Örneğin; klasik KKPP problemlerinde proje ömrü boyunca kullanılabilir kaynaklar sabittir (Hartman & Briskorn, 2011). Bu varsayım uygulamada çok kısıtlayıcı olmaktadır çünkü kullanılabilir kaynaklar, öngörülebilir veya öngörülemeyen sebeplerden ötürü sürekli değişebilmektedir. Bu sebeple araştırmacılar, bu problemlere hassasiyet kazandırabilmek için gerçek dünya ile paralel varsayımlar ekleyerek problem skalasını genişletmiş ve çeşitlendirmişlerdir.

1.4 ÇOKLU YETENEĞE SAHİP VE KISITLI KAYNAKLI PROJE PLANLAMA PROBLEMLERİ (ÇYSKKPPP)

Afshar-Nadjafi (2021) tarafından ÇYS-KKPP problemlerinin genel tanımının; işçinin iş tanımının ilerisine geçerek farklı yetenekler gerektiren işleri de yapabilmesi ve işletmenin ihtiyaçlarına cevap vererek esneklik sağlaması olduğu söylenmektedir. İşçinin işletmeye sağladığı bu esneklik uzun vadede hem işçi için hem de işletme için yararlı olmaktadır. İşçi için iş güvenliği, iş tatmini, yeni kariyer yolları ve mesleki ge-

lişim sağlarken işletmeler için ise optimal kaynak planlaması, üretimde artış, kaynak esnekliği vb. faydalar sağlamaktadır.

Geçmişte yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu KKPP üzerine olsa da, ekonominin ve teknolojinin gelişimi ile beraber çoklu yeteneğe sahip işçilerin sayısında kayda değer artış gerçekleşmiştir. KKPP'nin bu uzantısı, Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama problemleri olarak literatürde yerini almıştır. M. Wang ve diğ. (2022) çalışmasında, bu uzantının bir yazılım geliştirme şirketinden esinlenerek yaratıldığından bahsetmektedir. Bu çalışmaya göre, bahsi geçen işletmede çalışan personelin çoğu aynı anda programlama, veri analizi, hata ayıklama vb. yeteneklerine sahiptir. Bu durum planlama esnasında işletmeye esneklik sağlamaktadır. Bu şekilde BFYSKKPP problemleri, yukarıda bahsedilen KKPP problemlerinin uygulama alanlarının hepsinde kullanılmıştır.

Çoklu yeteneğe sahip ve kısıtlı kaynaklı proje planlama problemleri, literatürde NP-zor kombinatoriyel optimizasyon problemleri olarak tanımlanmaktadır (Correia ve diğ., 2012). KKPP problemlerinde ihtiyaç duyulan esneklik, çoklu yeteneğe sahip işçilerin probleme dâhil edilmesi ile sağlanmaktadır. Bazı kaynaklarda aynı esnekliğin çok amaçlı makineler tarafından da sağlanabileceğine değinilse de (Almeida ve diğ., 2018), bu çalışmada esneklik yalnızca çoklu yeteneğe sahip işçiler tarafından sağlanmaktadır.

Yetenek, bir işçinin bir işi yapabilme kapasitesini göstermektedir. Literatürde yetenekler kategorik ve hiyerarşik olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Kategorik sınıfın kullanıldığı bir problemde, yalnızca gerekli sertifikaları almış işçiler faaliyetlerde çalışabilmektedir. Hiyerarşik sınıfta ise, farklı işçi grupları birbirlerini eğiterek farklı yetenekler kazanıp o yeteneklerin gerçekleştirildiği faaliyetlere atanabilmektedir (De Bruecker ve diğ., 2015). Bu tez çalışmasında işçi yetenekleri kategorik sınıfta değerlendirilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği (İSG) gereklilikleri sebebiyle, yalnızca gerekli eğitimleri ve sertifikaları alan işçiler ilintili faaliyetlere atanabilmektedir.

1.5 LİTERATÜR TARAMASI

Bu tez çalışmasında tanıtılan problemle ilgili daha önce yapılan çalışmaların incelenmesi için "Web of Science" veri tabanı kullanılmıştır. Veri tabanında ilgili makalelere ulaşabilmek için "MS-RCPSP (ÇYS-KKPPP)", "Multi Skilled Resource Constrained Project Scheduling Problem (Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemi)" anahtar kelimeleri ile "topic (konu)" esaslı tarama yapılmış ve 37 çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar ve ilgili referansları tez konusuna göre değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda literatür tablosunda yer alan 24 sayıda çalışmanın konuyla direkt bağlantılı olduğuna karar verilmiştir.

Aynı zamanda; bu tez çalışmasında ele alınacak olan problemde harcama takvimi de konuya dahil edileceğinden, bu konuyla ilgili makalelere ulaşabilmek adına "Web of Science" veri tabanında "Multi Skilled Resource Constrained Project Scheduling Problem and Material Ordering (Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemi ve Malzeme Siparişi)" anahtar kelimeleri ile "topic (konu)" esaslı tarama yapılmış ancak herhangi bir sonuca rastlanmamıştır. Malzeme siparişi/harcama takvimi literatürde daha önce Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemlerine dahil edilmiştir ancak Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemlerinde bu konu incelenmemiştir.

Taranan makalelere ilişkin hazırlanan Tablo 1 (Literatür Tablosu); bu çalışmalarını model, çözüm yöntemi, optimizasyon türü, amaç fonksiyonu, stokastik/deterministik kaynak kapasitesi, homojen veya heterojen verimlilik ve görevlerin eş zamanlı tamamlanıp tamamlanamadığı açılarından özetlemektedir.

Tablo 1. Literatür Tablosu

Yazar	Model	Amaç Sayısı	Min/Maks	Amaç	Verimlilik Tipi	Eş Zamanlı Görev
Heimerl ve Kolisch (2010)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Maliyet	Heterojen	-
Myszkowski ve diğ. (2015)	Analitik Model	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Almeida ve diğ. (2016)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Homojen	-
Zheng ve diğ. (2017)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Homojen	-
L. Wang ve Zheng (2018)	Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Dai ve diğ. (2018)	Karışık Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Myszkowski ve diğ. (2018)	Analitik Model	1	Min	Zaman	Homojen	-
Zhu ve diğ. (2019)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Homojen	-
Hosseinian ve diğ. (2019)	Karışık Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Heterojen	-
Felberbauer ve diğ. (2019)	Stokastik Programlama	1	Min	Alt Yüklenici Hizmet Alımı Maliyeti	Heterojen	-
Joshi ve diğ. (2019)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Mini	Zaman	Homojen	-
Almeida ve diğ. (2019)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Homojen	✓
Chen ve diğ. (2020)	Doğrusal Olmayan Karışık Tam Sayılı Programlama	3	Min/Max	İşçi Yeteneği, Ürün Geliştirme Süresi, Ürün Kalitesi	Heterojen	-
Lin ve diğ. (2020)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Homojen	-
Ghamginzadeh ve diğ. (2021)	Analitik Model	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Snauwaert ve Vanhoucke (2021)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Zaman	Heterojen	-
Zhu ve diğ. (2021)	Karışık Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Hosseinian ve Baradaran (2021)	Karışık Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Myszkowski ve Laszczyk (2021)	Doğrusal Programlama	5	Min	Zaman, Maliyet, Ortalama Maliyet Sapması, Uzmanlık Seviyesi-İş Eşleşmesi, Görev-İşçi Eşleşmesi Sapması	Homojen	-
Cai ve diğ. (2021)	Doğrusal Olmayan Tam Sayılı Programlama	3	Min/Max	Zaman, Maliyet, Görev Kalitesi	Homojen	-
Tian ve diğ. (2022)	Karışık Tam Sayılı Programlama	2	Min	Zaman ve Maliyet	Homojen	-
Y.-Y. Li ve diğ. (2022)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Maliyet	Homojen	-
M. Wang ve diğ. (2022)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	İlave Kaynak Maliyeti	Homojen	-
Ertem ve diğ. (2022)	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min/Max	Ceza Maliyeti, Ödül Ücreti	Homojen	-
Bu çalışma	Karışık Tam Sayılı Programlama	1	Min	Maliyet	Heterojen	✓

Yukarıda yer alan tabloda görülebileceği üzere kısıtlı kaynak ile proje planlaması/bütçeleme, literatürde birçok farklı açıdan ele alınmıştır. Bu tez çalışmasında kaynaklar yenilenebilir olup yalnızca iş gücü açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışma da dahil olmak üzere çalışmaların büyük çoğunluğunda asıl amaç, proje bütçesinin içerisinde kalacak şekilde maliyetin en aza indirgenmesidir. Dolaylı olarak proje ömrü de en aza indirgenmektedir.

Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri literatüre tanıtılmadan önce, kaynakların tek yeteneğe sahip olduğu varsayılıyor ve bu problemler Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemleri başlığı altında toplanıyordu. Halbuki gerçek hayatta, tamamlanması gereken görevler birden fazla yetenek gerektirebiliyor ve bu görevlerin tamamlanması için görevlere her bir yetenek için işçi atanması gerekiyordu (Almeida ve diğ., 2016). Bu da kaynakların fazla kullanımına ve dolayısıyla kaynak kıtlığına yol açıyordu. İşçinin birden fazla yeteneğe sahip olması konseptinin Néron (2002) tarafından literatüre tanıtılmasının ardından bu konu birçok araştırmacı tarafından çalışmalara konu edilmiştir. Néron (2002), çalışmanın matematiksel modeli için doğrusal programlamayı kullanmıştır. Çalışmanın amacı, proje ömrünün en aza indirgenmesidir. Çalışmada kaynak kısıtlılığının ve görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin probleme dahil edilmediği belirtilmiştir. Sonrasında Bellenguez-Morineau ve Néron (2007) tarafından yapılan çalışmada ise probleme hem çalışanların müsait olmama durumları hem de görevlerin öncelik ilişkileri eklenmiştir. Bu çalışmada da amaç proje ömrünün en aza indirgenmesidir. Sonuçlar, bu problemin küçük ve orta büyüklükteki veri setleri için çözümlerbilir olduğunu göstermiştir.

İlerleyen yıllarda Heimerl ve Kolisch (2010) tarafından "Heterojen Verimlilik" tanımıyla bahsedilecek olan uzmanlık seviyesi kavramı literatüre ilk kez Bellenguez ve Néron (2005) sayesinde tanıtılmıştır. Bellenguez ve Néron (2005) çalışmalarında bu konseptten, "Yeteneklerin Hiyerarşik Seviyeleri" tanımıyla bahsetmiştir. Projede çalışacak işçilerin sahip oldukları yeteneklerdeki uzmanlaşma seviyeleri probleme verimlilik olarak dahil edilmiş ve farklı uzmanlık seviyelerine sahip iki farklı işçinin aynı işi(görevi) tamamlama sürelerinin değişkenlik gösterdiğine değinilmiştir. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da amaç, proje ömrünün en aza indirgenmesidir. Bu tez çalışmasında da ağırlıklı olarak kullanılan heterojen verimlilik konseptinin temelleri Bellenguez ve Néron (2005) tarafından atılmış olsa da kavramı literatüre kazandı-

ran ve birçok çalışmaya referans olan makale, Heimerl ve Kolisch (2010) tarafından yazılmıştır. Heimerl ve Kolisch (2010) tarafından geliştirilen problemde, kaynakların çoklu yeteneğe sahip ve kısıtlı olduğu varsayılmıştır. Problemde atama yapılan birden çok proje bulunmaktadır. Problemin çözümü için Karışık Tam Sayılı Programlama kullanılmış ve proje maliyetinin en aza indirgenmesi amacıyla CPLEX'te çözülmüştür. Sonuç bölümünde projedeki iş yükünün azalması ve kaynakların yetenek çeşitliliğinin artması durumlarında, projenin toplam maliyetinde azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışmaların dışında, heterojen verimlilik konseptini kullanan yazarlar arasında Fırat ve Hurkens (2012) bulunmaktadır. Çalışmalarında bu kavramdan "Yetenek Seviyelendirme" olarak bahsetmişlerdir. Problemin amacı maliyetin en aza indirgenmesi ve işçi takımlarının bir gün içerisinde gerçekleştirdikleri iş miktarının maksimize edilmesidir. Bu amaca ulaşabilmek için Karışık Tam Sayılı Programlama ile modelleme yapılmıştır. Felberbauer ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada da heterojen verimlilik kavramı ve konsepti kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da işçilerin farklı yetenekleri ve bu yeteneklere ilişkin uzmanlık seviyeleri bulunmaktadır. İşçinin iş için harcadığı süre uzmanlık puanıyla çarpılmakta ve atandığı faaliyetin tamamlanması, bu orana göre gerçekleşmektedir. Felberbauer ve diğ. (2019) projedeki faaliyetlerin çoğunlukla firmanın kendi kaynakları tarafından gerçekleştirilmesini, firmada atıl kaynak bulunmamasını amaçlamaktadır bu sebeple amaç fonksiyonu, alt yüklenici hizmet alımı maliyetini en aza indirmektedir. Heterojen verimlilik konsepti, Snauwaert ve Vanhoucke (2021) tarafından iki ayrı kavram altında incelenmiştir; Derinlik (Depth) ve Genişlik (Breadth). Genişlik, bir işçinin sahip olduğunu yeteneklerin çeşitliliğini belirtirken derinlik ise, bu yeteneklerdeki verimlilik seviyelerini ifade etmektedir. İşçinin sahip olduğu yeteneğin derinliğiyle işçinin atandığı faaliyetin tamamlanma süresi arasında ters orantı bulunmaktadır. Bu çalışmanın modeli de Karışık Tam Sayılı Programlama kullanılarak oluşturulmuştur ve amaç, proje ömrünün en aza indirgenmesidir.

Uzmanlık seviyesi konsepti Zheng ve diğ. (2017) tarafından da incelenmiş ve çalışmaya "Yatkınlık Seviyesi" kavramıyla dahil edilmiştir ancak proje ömrünü en aza indirmeyi amaçlayan bu çalışmada işçilerin yeteneklere olan yatkınlık seviyeleri verimliliği etkilememektedir. Yatkınlık seviyesi yalnızca işçi atamalarını sınırlamak için kullanılmıştır. Görevin gerektirdiği yeteneğe, yalnızca eşiğin üzerinde yatkınlık

seviyesine sahip olan işçiler atanabilmektedir. Atamadan sonra her işçinin görevde çalıştığı süre, çalışma sürelerine bağlı olarak eşit oranda gerçekleşme sağlamaktadır.

Heterojen verimlilik ve uzmanlık seviyesi kavramlarının literatüre kazandırılmasının ardından, bu konsepti kullanarak yapılan çalışmaların bazılarında, proje ömrü boyunca bu uzmanlık seviyelerinin gelişebileceği öne sürülmüştür. Bu konsept Öğrenme Etkisi veya Öğretme-Öğrenme olarak literatürde yerini almıştır. Bu konseptlerin kullanıldığı çalışmalarda yetenekler, hiyerarşik sınıfta değerlendirilmektedir. Hosseinian ve diğ. (2019), hem heterojen verimlilik hem de öğrenme etkisi konseptlerini birleştirerek proje ömrünü en aza indirgeyen bir problem oluşturmuştur. Bu problemde yer alan bazı görevler birden fazla işçi gerektirmektedir. Bu görevlere atanan işçilerden bazıları uzmanlık seviyesi yüksek işçilerken diğerleri ise uzmanlık seviyesi düşük işçilerse, öğrenme etkisinin devreye girebileceği belirtilmiştir. Deneyimsiz işçiler, uygulama esnasında deneyimli işçileri izleyerek işi öğrenebilmekte ve bu şekilde kendi uzmanlık seviyelerini artırabilmektedir. Daha fazla işçinin uzmanlık seviyelerinin artmasıyla faaliyetler daha kısa sürelerde tamamlanabilmekte, bu da proje ömrünü azaltırken maliyetin de düşmesini sağlamaktadır. Chen ve diğ. (2020) de öğrenme etkisini çalışmalarında kullanmışlar, hatta amaç fonksiyonlarına dahil etmişlerdir. Problemde değerlendirilen işçilerin uzmanlık seviyeleri değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada öğrenme, işçilerin birbirlerine öğretmesi ile değil, işlere harcanan süre ile paralel artmaktadır. Uzmanlık seviyesi en yüksek olan işçilerin daha fazla öğrenmeyeceği varsayılmıştır. Başlangıçtaki uzmanlık puanları işçilere Ar-Ge yöneticileri, proje yöneticileri, sektör uzmanları veya işe alım uzmanları tarafından atanmaktadır. Uzmanlık puanları her görevin başında ve sonunda ölçülmektedir. Problemde kullanılan çok amaçlı optimizasyon modelinin amaçları; işçi öğrenmesinin ve ürün kalitesinin maksimize edilmesi ve ürün geliştirme süresinin en aza indirgenmesidir.

Bu tez çalışması kapsamında incelenen makaleler, Tablo 1’de yer alan başlıklar açısından incelenmiştir. Bu başlıklardan biri olan konsept ise kaynak kapasitesinin belirliliği/belirsizliğidir. Problemlerin deterministik veya stokastik oluşu kaynak kapasitesi açısından ele alınmıştır. Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemlerine ilişkin literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu deterministik kaynak kapasiteli problemlerden oluşmaktadır. Kaynak kapasitesinin deterministik olması, firmanın planlanacak proje için ayracağı kaynaklarının müsaitliğinin bilini-

yor olması anlamına gelmektedir. Projede çalışabilecek işçi sayısı ve müsaitlikleri veri setinin içerisinde probleme dahil edilmektedir. İncelenen makaleler arasında H. Li ve Womer (2009), Myszkowski ve diğ. (2015), Almeida ve diğ. (2016), Zheng ve diğ. (2017), L. Wang ve Zheng (2018), Dai ve diğ. (2018), Myszkowski ve diğ. (2018), Zhu ve diğ. (2019), Joshi ve diğ. (2019), Almeida ve diğ. (2019), Chen ve diğ. (2020), Lin ve diğ. (2020), Ghamginzadeh ve diğ. (2021), Snauwaert ve Vanhooche (2021), Zhu ve diğ. (2021), Hosseinian ve Baradaran (2021), Myszkowski ve Laszczyk (2021), Cai ve diğ. (2021), Tian ve diğ. (2022), Y.-Y. Li ve diğ. (2022), Erttem ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmalarda deterministik kaynak kapasitesi kullanılmıştır.

Diğer yandan bazı araştırmacılar ise stokastik kaynak kapasitesinin gerçek hayat senaryolarına çok daha uygun bir yaklaşım olduğunu savunmuşlardır. Stokastik kaynak kapasitesi kullanarak çalışmalarını gerçekleştiren yazarlar arasında; Heimerl ve Kolisch (2010), Hosseinian ve diğ. (2019), Felberbauer ve diğ. (2019), Chen ve diğ. (2020), M. Wang ve diğ. (2022) yer almaktadır. M. Wang ve diğ. (2022) çalışmasında stokastik kaynak kapasitesi kullanma sebebinin gerçek hayata daha yakın senaryolar oluşturabilmek, daha yakın sonuçlar elde edebilmek olduğunu belirtmiştir. Gerçek hayat senaryolarına örnek olarak ise COVID-19 salgınına örnek göstermiştir. COVID-19 salgınıyla beraber raporlu veya izinli işçilerin sayısı çoğaldığından ve ilerleyen zamanlarda işe gelecek/gelmeyecek personel saptanamadığından ötürü, firmaların çok büyük bir plansızlık ile karşı karşıya kaldığını belirtmiştir. Firmanın, bu ve benzeri durumlara vakit kaybetmeden adapte olabilmesi, rekabetin güçlü olduğu bir sektörde firma için büyük avantajlar sağlayabilecektir. Bu nedenle planlama yapılırken kaynakların (yalnızca işçilik değil makine, ekipman, hammadde vb. öğelerin de) stokastik varsayılmasının firma için kritik önem taşıdığı görüşü bu yazarlar tarafından savunulmuştur.

Literatür taraması kapsamında incelenen çalışmaların çoğunda doğrusal programlama modelleri kullanılmıştır ancak sınırlı sayıda olsa da bu çalışmaların aksine; Correia ve Saldanha-da-Gama (2014), Felberbauer ve diğ. (2019), Chen ve diğ. (2020), Cai ve diğ. (2021), M. Wang ve diğ. (2022) çalışmalarında doğrusal olmayan modeller kullanmışlardır. Correia ve Saldanha-da-Gama (2014), doğrusal olmayan programlama ile modelleme yapmış ve sonrasında modele ekledikleri sürekli kısıtlar ile modeli

doğrusala çevirmişlerdir. Bu şekilde problem; Karışık Tam Sayılı Programlama ile modellenmiştir. Amaç fonksiyonunda proje maliyeti en aza indirgenmektedir. Proje maliyetleri sabit ve değişken maliyetlerden oluşmaktadır. Sonuç bölümünde, Çok Yetenekli ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemi olan bu problemin, kabul edilebilir bir süre içerisinde optimal sonuca ulaştığı (veya kabul edilebilir derecede yaklaştığı) belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, yukarıda incelenen çalışmalarla benzer olarak Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemi çözülecektir ancak oluşturulan problem, çeşitli yönlerden önceki çalışmalardan ayrılmaktadır. Literatür taramasında bahsedilen çalışmaların tamamında işçilerin birden fazla yeteneğe sahip olabildiği varsayılmıştır. Bazı çalışmalarda ek olarak heterojen verimlilik konsepti de işlenmiştir ancak incelenen makalelerden yalnızca birinde eş zamanlı görev gerçekleştirme yeteneği bulunmaktadır (Almeida ve diğ., 2019), bu çalışmaya ise heterojen verimlilik dahil edilmemiştir.

Bu tez çalışmasında işçilik, diğer çalışmalardan farklı ele alınmıştır. İşçi ataması bireysel değil, aynı masraf yerinde, aynı iş kulvarında çalışan, aynı kıdeme (dolayısıyla uzmanlık puanına) ve yeteneklere sahip işçilerin toplam müsait saatleri üzerinden yapılmaktadır. Projenin kilometre taşları olan görevler, yetenek gereksinimlerine göre görev kısımlarına ayrılmıştır ve atamalar görev bazında yapılmaktadır. Öncelik ilişkileri görevler özelinde belirlenmiş olup aralarında öncelik ilişkileri bulunmayan görevlerin gerçekleşmeleri kesişebilmektedir. Her durumda bir görevin başlaması için diğerinin tamamlanmasına gerek duyulmamaktadır. Bazı görevler aynı anda başlayabilmekte, bazıları ise diğer görevler devam ederken sonlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayıran başka bir etken ise bu çalışma kapsamında harcama takvimine de karar verilecek olmasıdır. Müşteriden alınacak ödemeler proje bütçesini oluşturacaktır. Bu ödemelerin bir kısmı işçilikler için bir kısmı ise görevlerde ihtiyaç duyulacak malzemelerin satın alımı için ayrılacaktır. Satın alımların doğru zamanlarda yapılabilmesi için probleme stok maliyetleri ve enflasyon/döviz kuru artış öngörülere dahil edilmiş ve harcama takviminin de optimize edilmesi amaçlanmıştır.

2. BÖLÜM

PROBLEM TANIMI VE MODELİ

2.1 FİYAT TEKLİFİ HAZIRLANMASI, İŞÇİ ATAMASI VE HARCAMA TAKVİMİ OLUŞTURULMASI PROBLEM TANIMI

Bu çalışma kapsamında, yeni oluşturulacak bir projeye fiyat teklifinin hazırlanması ve projedeki görevler için iş gücü planlaması yapılması hedeflenmektedir. Problem kapsamında iş gücünün yeni oluşturulacak projeye ayırabileceği sürenin önceden belirlendiği varsayılmaktadır.

Projeler, görev kümelerinden oluşmaktadır. Proje kapsamında belirlenen görevlerin hepsi tamamlandığında proje sonlanmaktadır. Görevler, projenin aşamalarını belirten kilometre taşlarıdır (milestone). Bazı görevler arasında öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Öncelik ilişkisi bulunan görevlerden bir ardıl görev, öncül görevi tamamlanmadan başlayamamaktadır. Bazı görevlerse aynı anda gerçekleştirilebilmektedir.

Görevlerin gerçekleştirilebilmesi için proje sahibi firmanın iki seçeneği bulunmaktadır. Kendi kaynaklarını kullanarak müsait iş gücünü görevlere atayabilmektedir. Bu atamanın gerçekleşebilmesi için iş gücünün hem görevin gerektirdiği yeteneğe sahip olması, hem de o yetenekteki uzmanlık seviyesinin önceden belirlenmiş eşik değere eşit veya eşik değerden fazla olması gerekmektedir. İş gücü gruplarının uzmanlık seviyelerine göre görevi tamamlama süreleri değişkenlik göstermektedir. Aynı göreve atanan iki iş gücü grubunun aynı yetenekteki uzmanlık seviyelerinin farklı olması durumunda, biri işini daha erken tamamlarken diğeri ise daha geç bitirmektedir. İşçilerin aynı işleri farklı sürelerde gerçekleştirebilmelerine , literatürde heterojen verimlilik (heterogeneous efficiency) ismi verilmektedir (Heimerl & Kolisch, 2010). Görevlerin gerçekleştirilebilmesi için firmanın sahip olduğu diğer seçenek ise alt yüklenici hizmet alımıdır. Alt yüklenicinin her görevi yetenek ve verimlilik kavramı olmadan, süresinde (1 birim uzmanlık seviyesi ile) tamamlayabildiği varsayılmaktadır. Verimlilik açısından alt yüklenici hizmet alımı daha avantajlı görünse de maliyeti firmanın kendi kaynaklarını kullanmasına göre daha yüksek olduğundan firma, olabildiğince kendi kaynaklarıyla görevleri tamamlamaya çalışmaktadır.

Firmadaki projelerde gerçekleştirilen görevlerle paralel işleri yapan masraf yerleri (müdürlükler) bulunmaktadır. Her bir masraf yerinde farklı kulvarlarda, farklı kıdemlere ve yeteneklere sahip iş gücü grupları bulunmaktadır. İş gücü gruplarının, projelerde gereksinim duyulan alanlarda uzmanlaşmış olmaları yetenek, o yetenekte kazanmış oldukları bilgi ve tecrübeleri ise uzmanlık seviyesi olarak tanımlanmaktadır. Her iş gücü grubunun, yetenek kümesindeki yeteneklerden en az birinde uzmanlaşmış olması gerekmektedir. İş gücünün kıdemi, uzmanlık seviyesi ile paraleldir. Uzmanlık seviyesi değişkeni atamada, kıdem değişkeni ise maliyet hesaplamasında kullanılmaktadır. İş gücü grupları, tecrübeleri ve eğitimleri sonucunda terfi alarak kıdem kazanmaktadır. Bu nedenle firmada farklı kıdemlerde ve farklı kulvarlarda faaliyet gösteren birçok iş gücü grubu bulunmaktadır. İş gücü planlaması kapsamında atanacak farklı kulvarlardaki iş gücü grupları farklı kıdemlere, yeteneklere ve uzmanlık seviyelerine sahiptir.

Projelerde maliyet hesaplaması yapılırken, işçilik maliyetleri müdürlük bazında belirlenen oranlarla (masraf yeri oranı) çarpılmaktadır. İş gücü gruplarının maliyetleri, kulvarlarına, kıdemlerine ve masraf yerlerine göre hesaplanmaktadır. Masraf yerlerine atanan masraf yeri maliyet oranları nedeniyle aynı kulvarda, aynı kıdeme ve maaşa sahip olan ancak farklı masraf yerlerinde görev yapan iş gücü gruplarının işçilik maliyetleri değişkenlik göstermektedir. İşçilik maliyetleri mesai saatinde harcanan işçilik ve fazla mesaide harcanan işçilik olarak ikiye ayrılmaktadır. Fazla mesai maliyetleri, iş gücü gruplarının saatlik maaşlarının 2 katı olacak şekilde probleme dahil edilmiştir.

Projenin öngörülen ve müşteriyle anlaşılan sürede tamamlanamaması durumunda, gecikme yaşanan her hafta için projeye ceza maliyeti yansımaktadır. Projenin öngörülen sürede tamamlanması firmanın kendi kaynaklarıyla mümkün değilse, karar vericinin alt yüklenici hizmet alımını tercih etmesi ve alt yüklenici hizmet alımı maliyetine katlanması veya projede gecikme yaşanması ve ceza maliyetine katlanması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında kurulan model karar vericiye doğru tercihi yapması için yol gösterecektir.

Proje bütçesi, müşterinin yaptığı/yapacağı ödemelerden oluşmaktadır. Bu bütçenin bir kısmı işçilikler için ayrılırken geri kalanı ise görevlerin gerektirdiği malzemelerin

satın alınması için kullanılmaktadır.

Proje kapsamında malzemelerin ödeme/satın alma takvimlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Erken alınan malzemelerde ve yatırımlarda fiyat artışı riski düşüktür ancak daha uzun süre depoda duracaklarından stok maliyeti (elde bulundurma maliyeti) sebebiyle bütün malzemelerin projenin başında tek seferde alınması optimal bir seçim olmamaktadır. Fiyat artışları haftalık olarak hesaplanmakta olup enflasyon/döviz kuru artışı öngörülerini yansıtmaktadır. Ayrıca, aynı malzemedeki artışta ihtiyaç doğdukça sipariş verilmesi hem uygulanabilirlik hem de maliyet açısından uygun olmadığı için siparişlere sabit sipariş maliyeti eklenmiştir. Sabit sipariş maliyeti her malzeme için malzemenin fiyatına göre değişkenlik göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında işçilerin atamalarının, fazla mesailerinin, alt yüklenici hizmet alımının ve harcama takviminin belirleneceği bir karar problemi optimize edilmeye çalışılmaktadır. Çalışma sonucunda ise projenin optimal bir şekilde maliyetlendirilmesi ve projeye ilişkin fiyat teklifinin hazırlanması hedeflenmektedir.

Yukarıda bahsedilen çok amaçlı problemin oluşturulabilmesi için, aşağıda yer alan ek varsayımlar kabul edilmiştir:

- İşçilerin çalışma saatleri yasal düzenlemelere göre sınırlandırılmıştır.
- İş gücü ataması işçi özelinde yapılmamaktadır. İş gücü grubunun toplam müsait saatine göre saat bazında atama yapılmaktadır.
- Her göreve yalnızca bir işçi atanmak zorunda değildir. Yeterlilikleri sağlayarak göreve atanan bir işçinin çalışma süresinin dolması durumunda, yeterlilikleri sağlayan başka bir iş gücü grubu, diğerinin kaldığı yerden işe devam edebilmektedir.
- Her görevin tamamlanması gerekmektedir.
- Bir görev başladığında bölünemeyeceği, durdurulamayacağı varsayılmaktadır. Görev devam ederken süre kısıtları nedeniyle iş gücü grupları arasında görev değişikliği gerekse bile, asıl çalışma sürelerine herhangi bir ilave süre eklenmemektedir. Değişikliklerin seri bir şekilde, hiç süre kaybedilmeden yapıldığı varsayılmaktadır.

- İşçilik maliyetleri saat bazında hesaplanmaktadır ve sadece planlanan projede çalıştıkları süre kadar olan maliyetleri hesaplamaya dahil edilmektedir. Proje dışında iş yerinde geçirilen süreler için alınan maaşlar proje maliyetine dahil edilmemektedir.
- Kadrolu işçi sayısı sabittir. Altyüklenici hizmet alımı dışında kadrolu işe alım veya işten çıkarmanın proje süresi boyunca yapılmadığı varsayılmaktadır.
- Bir görevin tamamlanma süresi, o görevde çalışan iş gücü gruplarının uzmanlık seviyelerine göre değişmektedir..
- Görevlerin gerektirdiği yetenekler ve uzmanlık seviyeleri önceden belirlenmiştir ve proje esnasında değişmez.
- Proje ömrü boyunca işçilerin terfi almadığı veya kaybetmediği, dolayısıyla iş gücü gruplarının hiç değişmediği varsayılmaktadır.
- Projenin gerektirdiği malzemeler proje bütçesiyle alınacağından, malzemeler yalnızca planlanan projede kullanılacaktır. Bu nedenle projenin başlangıç zamanındaki envanter miktarı bütün malzemeler için sıfırdır.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde ve ilerleyen bölümlerde kullanılacak sembollerin açıklamalarına Tablo 2’de yer verilmiştir.

Tablo 2. Notasyon Tablosu

Sembol	Açıklama
G :	Görevler Kümesi
I :	İş Gücü Grupları (İş Kulvarı) Kümesi
K :	Kıdem
M :	Masraf Yeri Kümesi
S :	Yetenekler Kümesi
P :	Görevlerde Kullanılacak Malzemeler Kümesi
t :	Haftalar $t = 0, \dots, T$
g :	görev $g \in G$
i :	İş gücü grubu (iş kulvarı) $i \in I$

Notasyon Tablosu Devamı 2

Sembol	Açıklama
k :	Kıdem $k \in K$
m :	Masraf yeri $m \in M$
s :	Yetenek $s \in S$
u :	Uzmanlık seviyesi
p :	Malzeme $p \in P$
β_g :	g görevinin gerektirdiği yetenek (s)
$I_{\beta_g k}$:	g görevinin gerektirdiği yeteneğe sahip olan k kıdemli iş gücü grubu
u_{iks} :	k kıdemli i iş gücünün s yeteneğindeki uzmanlık seviyesi
θ_g :	g görevinin gerektirdiği minimum uzmanlık seviyesi
v :	Mesai saati (saat)
o :	Fazla mesai (saat)
a :	Alt yüklenici
c :	Maliyet
c^a :	Alt yüklenici maliyeti
c_{mki}^v :	m masraf yerindeki k kıdemli i iş gücü grubunun mesai saatleri içerisindeki maliyeti
c_{mki}^o :	m masraf yerindeki k kıdemli i iş gücü grubunun fazla mesaideki maliyeti
c_p :	Gecikme cezası maliyeti (haftalık)
$f c_p$:	p malzemesinden sipariş vermenin sabit maliyeti
$h o l c_p$:	p malzemesinin stok (elde bulundurma) maliyeti
r_g :	g görevinin tamamlanması için gereken minimum süre (saat)
$A_{itm k}^v$:	m masraf yerinde k kıdemli i iş gücünün t haftasında mesai saatleri içerisindeki müsaitliği (saat)
$A_{itm k}^o$:	m masraf yerinde k kıdemli i iş gücünün t haftasında fazla mesaideki müsaitliği (saat)
g' :	g görevi tamamlandıktan sonra başlayabilen ardıl görev
$O_{gg'}$:	g ile g' görevi arasındaki öncelik durumu (öncelik varsa 1, yoksa 0)
t' :	t haftasından sonra gelen hafta ($t' = t + 1$)
B :	Projenin öngörülen ve müşteriyle anlaşılan bitiş haftası

Notasyon Tablosu Devamı 2

Sembol	Açıklama
J :	Karar değişkenlerinin alabileceği maksimum değer (Big M)
x_{gtmki}^v :	m masraf yerinde k kıdemli i iş gücü grubu tarafından t haftasında g görevi için mesai saatleri içerisinde harcanan süre (saat)
x_{gtmki}^o :	m masraf yerinde k kıdemli i iş gücü grubu tarafından t haftasında g görevi için fazla mesaide harcanan süre (saat)
y_{gt} :	Alt yüklenici tarafından t haftasında g görevi için harcanan süre (saat)
w_{gt} :	İkili değişken; t haftasında g görevine atama yapıldıysa 1, aksi takdirde 0
d_t :	İkili değişken; projenin son gerçekleşme haftasıysa 1, aksi takdirde 0
e_{tp} :	t haftasında p malzemesinin envanterdeki miktarı
rp_{gp} :	g görevinin tamamlanması için gereken p malzemesinin miktarı
o_{tp} :	t haftasında p malzemesinden verilen sipariş miktarı
wo_{tp} :	İkili değişken; t haftasında p ürününden sipariş verildiyse 1, aksi takdirde 0
f_{tp} :	t haftasında p malzemesinin fiyatı

Minimize (en küçük)

$$\begin{aligned}
& \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \left(\sum_{t=0}^T \sum_{i \in I_{\beta_{gk}}} (c_{mki}^v * x_{gtmki}^v + c_{mki}^o * x_{gtmki}^o) + (c^a * y_{gt}) \right) \\
& + \sum_{t: t > B} (d_t * c_p * (t - B)) + \sum_{t=0}^T \sum_{p \in P} (holc_p * e_{tp}) \\
& + \sum_{t=0}^T \sum_{p \in P} (wo_{tp} * f_{c_p}) + \sum_{t=0}^T \sum_{p \in P} (o_{tp} * f_{tp}) \quad (2.1)
\end{aligned}$$

Amaç fonksiyonu (2.1); mesai saatleri içerisindeki ve fazla mesaideki işçilik maliyetlerini, alt yüklenici maliyetini ve gecikme cezası maliyetini (dolayısıyla da proje süresini) en aza indirmeyi hedeflemektedir. Projenin müşteri ile önceden anlaşılan ve öngörülen bitiş tarihinden önce veya o tarihte bitmesi durumunda amaç fonksiyonuna ceza maliyeti yansımayacaktır. Öngörülen tarihte projede yer alan görevlerin

tamamı gerçekleştirilmiş olmazsa; gecikmes yaşanan hafta kadar ceza maliyeti projeye yansıtacaktır.

subject to (kısıtlar)

$$r_g \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t=0}^T (u_{iks} * (x_{gtmki}^v + x_{gtmki}^o)) + y_{gt} \quad \forall g \in G, s = \beta_g \quad (2.2)$$

Kısıt (2.2), görevlerin tamamlanması için gereken minimum sürenin göreve ayrılmasını sağlamaktadır. İşçilik süreleri, heterojen verimlilik sebebiyle denkleme direkt dahil edilmemiştir. İş gücü gruplarının uzmanlık seviyeleri değişkenlik gösterdiğinden görevlerde harcadıkları süre uzmanlık seviyeleriyle çarpılarak kısıta eklenmiştir. Alt yüklenicinin uzmanlık seviyesi ise 1 varsayıldığından, gerçekleşme süreleri herhangi bir çarpana ihtiyaç duyulmaksızın kısıta dahil edilmiştir.

$$\sum_{g \in G} x_{gtmki}^v \leq A_{imkt}^v \quad \forall k \in K, \forall m \in M, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.3)$$

Kısıt (2.3) işçilik gerçekleştirmelerinin, iş gücü gruplarının mesai saatleri içerisindeki müsait saatlerinden fazla olmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{g \in G} x_{gtmki}^o \leq A_{imkt}^o \quad \forall k \in K, \forall m \in M, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.4)$$

Kısıt (2.4) işçilik gerçekleştirmelerinin, iş gücü gruplarının fazla mesaideki müsait saatlerinden fazla olmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i, k: u_{ik\beta_g} \geq \theta_g} x_{gtmki}^v = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} x_{gtmki}^v \quad \forall m \in M, \forall g \in G, t = 0, \dots, T \quad (2.5)$$

Kısıt (2.5), mesai saatleri içerisinde atamaları yapılan iş gücü gruplarının görevlere yalnızca gerekli yeteneği ve uzmanlık seviyesini sağlıyorsa atanmalarını sağlamaktadır.

$$\sum_{i,k:u_{ik\beta_g} \geq \theta_g} x_{gtmki}^o = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} x_{gtmki}^o \quad \forall m \in M, \forall g \in G, t = 0, \dots, T \quad (2.6)$$

Kısıt (2.6), fazla mesaide atamaları yapılan iş gücü gruplarının görevlere yalnızca gerekli yeteneği ve uzmanlık seviyesini sağlıyorlarsa atanmalarını sağlamaktadır.

$$J * w_{gt} \geq x_{gtmki}^v \quad \forall m \in M, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.7)$$

$$J * w_{gt} \geq x_{gtmki}^o \quad \forall m \in M, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.8)$$

$$J * w_{gt} \geq y_{gt} \quad \forall g \in G, t = 0, \dots, T \quad (2.9)$$

(2.7), (2.8), (2.9) kısıtları t haftasında g görevine mesai saatlerinde (x_v), fazla mesaide (x_o) firmanın kendi kaynaklarının veya alt yüklenici (y) atamıp atanmadığını gösteren kısıtlardır.

$$J * (1 - w_{g't}) \geq \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{t \leq \tau \leq T} (x_{g'\tau mki}^v + x_{g'\tau mki}^o + y_{g'\tau})$$

$$\forall g \in G, g' \in G : O_{gg'} = 1, t = 0, \dots, T \quad (2.10)$$

Kısıt (2.10), g görevi g' görevinin öncülüysen; g görevi tamamlanmadan g' görevine atama yapılmamasını sağlayan kısıttır.

$$\sum_t^T J * (1 - d_t) \geq \sum_{t':t+1} x_{gt'mki}^v + x_{gt'mki}^o + y_{gt'}$$

$$\forall m \in M, \forall g \in G, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.11)$$

$$\sum_{t \in T} d_t = 1 \quad (2.12)$$

Kısıt (2.11) ve (2.12); t haftası görevin son haftasıysa, sonraki haftalara mesai saatlerinde veya fazla mesaide firmanın kendi kaynaklarının ve alt yüklenicinin atanmamasını sağlayan kısıtlardır.

$$J * wo_{tp} \geq o_{tp} \quad \forall p \in P, t = 0, \dots, T \quad (2.13)$$

Kısıt (2.13), t haftasında p malzemesinden sipariş verilip verilmediğini gösteren kısıttır.

$$\sum_{p \in P} e_{0p} = 0 \quad (2.14)$$

$$e_{tp} = e_{t-1p} - \sum_{g \in G} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (rp_{gp} * u_{ikbg} / r_g * (x_{gtmki}^v + x_{gtmki}^o)) + o_{tp} \quad \forall p \in P, t = 0, \dots, T \quad (2.15)$$

Kısıt (2.14) ve (2.15), başlangıç haftasında ve sonrasındaki haftalarda envanter miktarlarını gösteren kısıtlardır.

$$x_{gtmki}^v \geq 0 \quad \forall g \in G, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.16)$$

$$x_{gtmki}^o \geq 0 \quad \forall g \in G, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall i \in I, t = 0, \dots, T \quad (2.17)$$

$$y_{gt} \geq 0 \quad \forall g \in G, t = 0, \dots, T \quad (2.18)$$

$$d_t \in \{0, 1\} \quad t = 0, \dots, T \quad (2.19)$$

$$w_{gt} \in \{0, 1\} \quad \forall g \in G, t = 0, \dots, T \quad (2.20)$$

$$e_{tp} \geq 0 \quad \forall p \in P, t = 0, \dots, T \quad (2.21)$$

$$o_{tp} \geq 0 \quad \forall p \in P, t = 0, \dots, T \quad (2.22)$$

$$wo_{tp} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, t = 0, \dots, T \quad (2.23)$$

Kısıt 2.16-2.23 değişkenlerin değer kısıtlarını tanımlamaktadır.

3. BÖLÜM

NUMERİK ANALİZLER

Bu bölümde, hazırlanan matematiksel model örnek veri seti ile çalıştırılarak yapılan sayısal analizler anlatılacak ve sonuçlarına ilişkin yorumlara yer verilecektir. Öncelikle, gerçek hayat senaryolarından esinlenerek hazırlanan veri seti tanıtılacak ve bu örnek olay, hazırlanan model ile çözülecektir. Sayısal analizler kapsamında, bu çalışma için geliştirilen matematiksel model çözüldürken IBM OPL ILOG CPLEX Optimization Studio yazılımının 22.1.1 sürümü kullanılmıştır. Sonuca 64 GB belleğe ve 64 bit işletim sistemine sahip Intel(R) Xeon(R) Silver 4216 CPU 2.10 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılarak ulaşılmıştır. Çözüm, ortalama 6 saat sürmüştür.

Tam Sayılı Doğrusal Programlama kullanılan matematiksel model ile proje maliyetinin (dolaylı olarak da proje ömrünün) en aza indirgenmesi ve harcama takvimi için optimal bir sonuç elde edilmesi hedeflenmiştir. Modele işçilik, alt yüklenici hizmet alımı, ceza, stok (elde bulundurma), satın alma ve sabir sipariş maliyetleri eklenmiştir. Bu doğrultuda örnek olay çözümü sonucunda beklenen, mümkün olan minimum maliyet ve süre ile bütün görevlerin tamamlanarak projenin sonlandırılmasıdır.

Problem, proje bazlı çalışan Ankara merkezli bir savunma sanayii firmasının süreçleri örnek alınarak kurgulanmıştır. Firmanın yeni bir proje için müşteri makamına teklif vermesi süreci bu çalışmayla yeniden kurgulanmıştır. Bu çalışma sonucunda müşteriye verilen teklifteki maliyet ile gerçekleşen maliyetin birbirine yaklaşması beklenmektedir.

3.1 ÖRNEK OLAY VERİ SETİNİN TANITILMASI

Problem çözümünde kullanılan veriler rassal üretilmiştir. Problemde 1 müşteri makamı ve proje sahibi 1 firma bulunmaktadır. Firma tarafından yürütülen pek çok proje olmasına rağmen, işçilerin yeni planlanacak projeye ayırabilecekleri süreler önceden belirli olduğundan, yalnızca 1 proje için planlama yapılacaktır. Proje kapsamında tamamlanması gereken 15 adet görev bulunmaktadır. Planlamalar haftalık bazda yapılmaktadır ve müşteri ile anlaşılan bitirme tarihi, proje başlangıcından 8 hafta son-

radır. 15 adet görevin 8 haftada biteceğine dair müşteriye taahhüt verilmiştir. Proje ömrünün 8 haftayı geçmesi durumunda, gecikme yaşanan her hafta için 40.000 TL tutarında ceza ödenmektedir. Projenin planlama ufku 10 haftadır.

Görevlerin gerçekleştirilebilmesi için firma kendi kaynaklarını kullanabileceği gibi, yeterli olmadığı durumlarda alt yükleniciden de destek alabilmektedir. Firmanın kendi kaynaklarından projeye atayabileceği 5 masraf yeri ve bu masraf yerlerinin altında 3'er iş gücü grubu bulunmaktadır. İş gücü grupları; tenisyenlik kulvarı, idari kulvar ve mühendislik kulvarı olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Masraf yerlerinin hepsinde, 3 iş gücü grubundan 3 farklı kıdeme sahip işçiler bulunmaktadır. İş gücü gruplarının mesai saatlerindeki ve fazla mesaideki müsait saatleri bütün iş gücü, masraf yeri, kıdem ve hafta kombinasyonlarına göre saatlik olarak hesaplanmıştır. Müsaitlikler, 10. haftaya kadar olan zaman dilimi için hesaplanmıştır. Alt yüklenicinin müsait süresinin sınırsız olduğu varsayılmıştır.

β_g, θ_g	1	2	3	4	5	6	7
1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
10	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
12	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7

Tablo 3. Görevlerin Gerekthirdiği Yetenek ve Uzmanlıklar

Problem, iş gücü gruplarının görevlere atanması ile başlamaktadır. İş gücü gruplarının görevlere atanabilmesi için farklı kısıtlamalar bulunmaktadır. Görevlerin gerektirdiği 7 yetenek bulunmaktadır. Görevler, bu yeteneklerden birinde (0-1) aralığında uzmanlık seviyesi gerektirmektedir. Görevlerin gerektirdiği yeteneklere ve minimum uzmanlık seviyelerine Tablo 3'te yer verilmiştir. 5 masraf yerinde çalışan ve toplamda 3 farklı kідeme sahip 3 ayrı iş gücü grubunun her biri de en az 1 yetenekte uzmanlaşmak zorundadır. Tablo 3'te görülebileceği üzere, iş gücü gruplarının uzmanlık seviyeleri de (0-1) aralığında değişmektedir. Bir iş gücü grubunun bir göreve atanabilmesi için görevin gerektirdiği yetenekte en az görev gereksinimi kadar uzmanlaşmış olması gerekmektedir. Bu kriteri sağlayan bir durum olmadığında ise görev, alt yüklenici tarafından tamamlanmaktadır çünkü alt yüklenici uzmanlık puanı her yetenek için 1 kabul edilmiştir.

r_g	Saat
1	785
2	935
3	860
4	1.010
5	710
6	1.215
7	780
8	1.000
9	1.315
10	1.520
11	405
12	640
13	490
14	510
15	805

Tablo 4. Görevlerin Tamamlanması için Gereken Süreler

İş gücü gruplarına atanan uzmanlık seviyeleri, aynı zamanda gerçekleşen sürelerin

hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Görevlerin tamamlanması için gereken süre-
lere Tablo 4'te yer verilmiştir. Tablodaki süreler, görevi gerçekleştiren iş gücünün
uzmanlık seviyesinin 1 olduğu varsayılarak oluşturulmuştur. Bütün iş gücü grupla-
rının uzmanlık seviyeleri 1'den küçük olduğundan, iş gücü gruplarının görevlerdeki
çalışma süreleri görevlere direkt yansımamaktadır. Uzmanlık seviyesi bu noktada ve-
rimlilik açısından ele alınmaktadır. İş gücü grubunun bir görevde geçirdiği sürenin
göreve yansması; uzmanlık puanı ile çarpılması sonucu ortaya çıkmaktadır. İş gücü
grubu görev için çok süre harcarsa bile uzmanlık seviyesi düşükse görevin tamam-
lanmasına fazla katkısı olmamaktadır. Bu durum alt yüklenici için geçerli değildir.
Alt yüklenici uzmanlık seviyesi her yetenek için 1 kabul edildiğinden, alt yüklenici
çalışma süresi görevin tamamlanmasına direkt (çalışılan süre kadar) etki etmektedir.

Çalışılan sürelerle bağlı olarak amaç fonksiyonuna işçilik maliyeti yansımaktadır. İş-
çilik maliyetleri, firmanın kendi kaynakları için masraf yeri, kıdem ve iş gücü grubuna
göre değişkenlik göstermektedir. Fazla mesai maliyetleri, normal maliyetlerin 2 katı
olacak şekilde saatlik olarak hesaplanmıştır.

Alt yüklenici maliyeti ise saatlik 1.500 TL olarak hesaplanmıştır. Alt yüklenici mali-
yeti de, iş gücü gruplarının maliyeti de çalışma süreleri ile çarpılarak amaç fonksiyo-
nuna dahil edilmiştir.

$O_{gg'}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 5. Örnek Olay Veri Seti Görevlerin Öncelik Matrisi

Görevlerden bazıları öncelik ilişkileri ile birbirine bağlanmıştır. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri Tablo 5'te gösterilmiştir. İki görev arasında öncelik ilişkisi varsa değer 1, yoksa 0 olmaktadır. Tablo 5'te görülebileceği üzere; 1. ve 2. görevler arasında, 2. ve 3. görevler arasında, 4. ve 5. görevler arasında, 6. ve 7. görevler arasında, 7. ve 8. görevler arasında, 9. ve 10. görevler arasında, 10. ve 11. görevler arasında, 12. ve 13. görevler arasında son olarak ise 14. ve 15. görevler arasında öncelik ilişkileri bulunmaktadır. Tabloda değeri 1 olan hücrelerin satırlarında yer alan görevler öncül, sütunlarında yer alan görevler ise ardıl kabul edilmektedir. Öncül görevler tamamlanmadan ardıl görevlere atama yapılması mümkün değildir. Görevlerin tabloda yer alan sıraya göre tamamlanması gerekmektedir.

rP_{gp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9	19	21	4	18	8	3	19	2	7
2	5	11	0	14	18	5	4	1	5	5
3	0	19	9	15	6	12	6	9	0	1
4	15	0	20	0	0	12	5	6	4	0
5	5	12	19	4	13	6	7	5	5	5
6	3	13	6	7	17	10	3	15	3	7
7	4	1	9	5	15	0	8	20	4	2
8	11	0	18	4	0	10	3	6	2	10
9	0	3	11	2	9	2	6	0	0	13
10	3	1	0	13	5	19	4	7	3	10
11	0	12	17	10	2	6	0	19	1	0
12	5	14	0	0	10	16	0	18	0	5
13	8	9	10	10	0	1	6	0	8	13
14	2	6	6	15	2	0	1	16	2	2
15	0	0	7	0	9	1	0	18	0	14

Tablo 6. Görevlerin Gerektirdiği Malzemeler ve Miktarları (birim miktar)

İş gücü gruplarının atamalarına ilişkin kısıtlar sağlandıktan sonra problem, son etap olan harcama takviminin oluşturulması ile devam etmektedir. Görevlerin tamamlanabilmesi için hem görevlere iş gücü atanması hem de gerekli malzemelerin iş gücü gruplarına sağlanması gerekmektedir. Projenin tamamlanması için ihtiyaç duyulacak 10 farklı malzeme bulunmaktadır. Her görevin gereksinim duyduğu malzemeler ve miktarları, görevlerin niteliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bazı görevler, belirli malzemelere ihtiyaç duyulmadan tamamlanabilmektedir. Görevlerin tamamlanması için ihtiyaç duyulan malzemelere ve miktarlarına Tablo 6'da yer verilmiştir.

f_{tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	150	84	52	48	23	47	119	65	131	72
2	159	89,04	55,12	50,88	24,38	49,82	126,14	68,9	138,86	76,32
3	160,5	89,88	55,64	51,36	24,61	50,29	127,33	69,55	140,17	77,04
4	162	90,72	56,16	51,84	24,84	50,76	128,52	70,2	141,48	77,76
5	163,5	91,56	56,68	52,32	25,07	51,23	129,71	70,85	142,79	78,48
6	165	92,4	57,2	52,8	25,3	51,7	130,9	71,5	144,1	79,2
7	166,5	93,24	57,72	53,28	25,53	52,17	132,09	72,15	145,41	79,92
8	168	94,08	58,24	53,76	25,76	52,64	133,28	72,8	146,72	80,64
9	169,5	94,92	58,76	54,24	25,99	53,11	134,47	73,45	148,03	81,36
10	171	95,76	59,28	54,72	26,22	53,58	135,66	74,1	149,34	82,08

Tablo 7. Malzemelerin Haftalık Fiyatları (TL)

İhtiyaç duyulan çoğu malzeme ithal edilmektedir. Sık sık değişen döviz kurları sebebiyle malzemelerin fiyatlarının da haftalık bazda değiştiği varsayılmıştır. Malzemelerin fiyatlarına Tablo 7’de yer verilmiştir. Bu fiyatlara ek olarak, her sipariş verildiğinde malzeme fiyatlarına eklenen sabit sipariş maliyeti bulunmaktadır. Sabit sipariş maliyeti her malzeme için değişkenlik göstermektedir.

Planlanan proje kapsamında ihtiyaç duyulan malzemeler, kullanıma alınmadan önce belirli bir alanda depolanmaktadır. Depolama alanı sınırlı olduğundan depolarda kullanılmayı bekleyen malzemelere stok (elde bulundurma) maliyeti yansımaktadır. Siparişi verilen malzemeler yalnızca bu proje için kullanılacağından, bu malzemelere ilişkin stok maliyetleri de proje maliyeti olarak kabul edilmektedir. Malzemelerin kapladıkları alana göre stok maliyeti değişmektedir. Tablo 8’de hem malzemelerin sabit sipariş maliyetleri hem de stok maliyetleri gösterilmiştir.

p	fc_p	$holc_p$
1	300	25
2	200	14
3	500	28
4	200	6
5	1100	19
6	900	12
7	1000	29
8	100	6
9	480	12
10	800	22

Tablo 8. Malzeme Sabit Sipariş ve Stok Maliyetleri (TL)

Örnek olay veri setine ilişkin genel bilgiler Tablo 9’da özetlenmiştir. Devam eden bölümde bu veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların analizleri paylaşılacaktır.

Setler ve Parametreler	Birim	Değer
Planlama Ufku	Hafta	$T = 1, 2, \dots, 10$
Sözleşme Teslim Tarihi	Hafta	$B = 8$
Görev		$G = 1, 2, \dots, 15$
Toplam Görev Süresi	Saat	12.980
Gecikme Cezası	Hafta	$c_p = 40.000 TL$
İş Gücü Grubu		$I = 1, 2, 3$
Kıdem		$K = 1, 2, 3$
Masraf Yeri		$M = 1, 2, 3, 4, 5$
Malzeme		$P = 1, 2, \dots, 10$
Alt Yüklenici Maliyeti	Saat	$c^a = 1.500 TL$
Yetenek		$S = 1, 2, \dots, 7$

Tablo 9. Örnek Olay Veri Seti Özet

Örnek Olay Sonuçları	Değer
Toplam Maliyet (TL)	11.930.250
Proje Bitiş Haftası	10
Toplam İşçilik Maliyeti (TL)	3.082.820
Toplam Alt Yüklenici Hizmet Alımı Maliyeti (TL)	8.698.800
Toplam Gecikme Cezası Maliyeti (TL)	80.000
Toplam Sabit Sipariş Maliyeti (TL)	16.060
Toplam Elde Bulundurma Maliyeti (TL)	9.346
Malzeme Toplam Satın Alma Maliyeti (TL)	43.224
Toplam Çalışma Süresi (saat)	19.263

Tablo 10. Örnek Olay Özet Sonuç Tablosu

3.2 ÖRNEK OLAY ÇÖZÜMÜ VE ANALİZİ

Bu bölümde, yukarıda tanımlanan örnek olay için maliyet minimizasyonu altında elde edilen sonuçlar incelenecektir. Tanıtılan veri seti kullanılarak ulaşılan sonuçlara Tablo 10'da yer verilmiştir.

Projenin planlanması aşamasında hesaplanan işçilik maliyeti, alt yüklenici maliyeti, ceza maliyeti, elde bulundurma maliyeti, sabit sipariş maliyeti ve malzeme maliyeti projenin toplam maliyetini oluşturmaktadır.

İşçilik, firmanın kendi kaynakları tarafından yapılan çalışmaları ifade etmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere, firmanın kendi kaynakları tarafından harcanan süreler, görevlerin tamamlanmasını direkt etkilememektedir. İş gücü gruplarının harcadığı süreler uzmanlık puanları ile çarpıldığından görevlerin gerçekleşme süreleri harcanan sürelerle oranla daha düşük kalmaktadır. Tanıtılan örnek olay veri setinin çözümü sonucunda mesai saatleri içerisinde firmanın kendi kaynakları tarafından harcanan sürenin 10.432 saat, fazla mesaide harcanan sürenin ise 3.031 saat olduğu gözlemlenmiştir. 10 haftalık planlama ufkunda firmanın kendi kaynakları toplamda 13.463 saat planlaması yapılan projede çalışmıştır. Bu sürenin toplam görev süresine yansımaları (uzmanlık puanları ile çarpıldıktan sonra) 7.181 saattir. Başka bir deyişle, 12.980 saat

olan görev süresinin %55'i firmanın kendi kaynakları tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tablo 10'da görülebileceği üzere, işçilik maliyeti 3.082.830 TL'dir. Bu maliyetin 1.969.300 TL'si mesai saatlerinde, 1.113.520 TL'si ise fazla mesaide oluşmuştur. Fazla mesaide harcanan süreler ile mesai saatlerinde harcanan süreler arasında büyük bir fark gözlemlenmesine rağmen örnek olay veri setindeki fazla mesai işçilik maliyeti, mesai saati işçilik maliyetinin 2 katı olduğundan toplam maliyetleri birbirine yakındır. İşçilik maliyeti toplam maliyetin %26'sını oluşturmaktadır.

Alt yüklenici hizmet alımı, alt yüklenici tarafından çalışılan süreyi ifade etmektedir. Firmanın kendi kaynaklarının aksine, örnek olay veri setinde alt yüklenicinin uzmanlık seviyesi 1 kabul edildiğinden alt yüklenicinin çalıştığı süreler görevlerin tamamlanmasını direkt etkilemektedir.

<i>y_{gt}</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	860
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175,9
6	1.215	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1.520	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	490
14	510	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	28,3	0

Tablo 11. Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)

Örnek olay veri setinin çözümü sonucunda elde edilen alt yüklenici çalışma saatlerine Tablo 11'de yer verilmiştir. Alt yüklenici tarafından çalışılan toplam süre 5.799

$x^v + x^o$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	643	196,2	276	0	348	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	551,5	583	343	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	340	476	485	539	406,3	413	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	186	219	169	189
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	255	274	210	234	252	206	276	210	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	385	226,4	360	332	173	156	276	172	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	646,8
12	0	86,8	0	297	0	498	34,8	0	430	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	174,6	0	0	170	196	0	211	184	174

Tablo 12. Firma Kaynakları Çalışma Süreleri (Saat)

saattir. Görevlerin yaklaşık %45'i alt yüklenici tarafından tamamlanmaktadır. Tablo 11'de görülebileceği üzere; 3, 6, 8, 10, 13 ve 14. görevler tamamen alt yüklenici tarafından tamamlanmıştır. Bunun sebebi, görev koşullarını sağlayan firma çalışanlarının bu görevlere ayıracak sürelerinin olmamasıdır. Bunun dışında alt yüklenici 5 ve 15. görevlerde, firma kaynakları ile beraber çalışmıştır. 5. görevin %25'i 10. haftada, 15. görevin ise %0,04'ü 14. haftada alt yüklenici tarafından gerçekleştirilmiştir. Firmanın kendi kaynakları tarafından çalışılan süreler Tablo 12'de yer verilmiştir. Firmanın kendi kaynakları, 10 hafta boyunca toplamda 13.463 saat çalışmıştır. 1, 2, 4, 7, 9, 11 ve 12. görevler tamamen firmanın kendi kaynakları ile gerçekleştirilmiş olup bu görevlerde alt yüklenici çalışmamıştır.

Alt yüklenici hizmet alımı maliyeti örnek olay veri seti için saatlik 1.500 TL olup problemin çözümü sonucunda ulaşılan toplam alt yüklenici maliyeti 8.698.800 TL tutarındadır. Bu maliyet, toplam maliyetin %73'ünü oluşturmaktadır.

Hangi görevde hangi hafta çalışıldığını gösteren ikili değişkenin sonuçlarına Tablo 13'te yer verilmiştir. Tablo, hem alt yüklenici hem de iş gücü atamalarını kapsamaktadır. Atama yapılan haftalarda değer 1, atama yapılmayan haftalarda ise değer 0'dır.

w_{gt}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1

Tablo 13. İkili Değişken-Atama Tablosu

Atama sonuçlarına ilişkin veriler, yukarıda detaylıca incelenmiştir. Bundan sonraki kısımda, problemin 2. aşaması olan harcama takvimi incelenecektir. Örnek olay veri seti tanıtımında bahsedildiği üzere görevlerin gerçekleştirilebilmesi için işçiliğe olduğu kadar malzemelere de ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemelerle ilişkilendirilen stok maliyeti, sabit sipariş maliyeti, malzeme fiyatlarının zaman içerisinde artış göstermesi gibi unsurlar harcama takvimi oluşturulmasını kritik kılmaktadır. Malzeme kısıtları problemden çıkarıldığında elden edilen atama sonuçları ile malzeme kısıtları ekledikten sonra elde edilen atama sonuçları arasında farklar gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle model, hem atamayı hem de harcama takvimini optimalleştirerek gerçekleştirmeleri bu optimale göre yansıtmaktadır.

Örnek olay veri setinde projenin 0 envanter ile başladığı varsayılmıştır. Dolayısıyla projedeki faaliyetlere ilk haftadan itibaren atama yapılabilmesi için, malzeme siparişlerinin bir kısmının da ilk hafta verilmesi gerekmektedir. Sipariş verilen haftaların gösterilmesi için modele dahil edilen ikili değişkenin sonuçlarına Tablo 14’te yer verilmiştir.

w_{0tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
8	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0

Tablo 14. İkili Değişken-Sipariş Tablosu

Tablo 14’teki satırlar haftaları, sütunlar ise malzemeleri temsil etmektedir. y malzemesinden x haftasında sipariş verilmesi durumunda matriste bu kesişime karşılık gelen değer 1 olmaktadır. Sipariş verilmemesi durumunda ise değer 0 olmaktadır. 2 ve 9. haftalar haricinde bütün haftalarda sipariş verilmiştir. Verilen her sipariş için malzeme fiyatlarına ek olarak sabit sipariş maliyeti eklenmektedir. Her malzeme için sabit sipariş maliyeti farklı olup 10 hafta içerisinde toplamda 33 kez sipariş verilmiştir. Projenin tamamı için toplam sabit sipariş maliyeti 16.060 TL tutarındadır.

Hangi malzemedan ne kadar sipariş verildiğine ilişkin detaylar Tablo 15’te yer almaktadır. Tabloda yer alan satırlar haftaları, sütunlar malzemeleri, değerler ise sipariş miktarlarını ifade etmektedir.

o_{tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,4	16,8	23,2	8,8	29,6	24,9	17,8	26,5	8,6	18,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	9,8	0,0	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8	0,0	0,0
5	13,3	0,0	23,7	0,0	28,6	0,0	0,0	0,0	0,0	15,5
6	0,0	12,9	0,0	0,0	0,0	29,6	0,0	17,7	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	29,2	0,0	0,0	13,4	0,0	11,2	0,0
8	8,3	15,7	12,8	0,0	32,3	0,0	0,0	18,6	0,0	15,8
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	14,2	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	22,7	0,0	0,0

Tablo 15. Sipariş Tablosu (birim miktar)

Görevlerin tamamlanması için verilen bu siparişler, örnek veri olay setinin tanıtılması sırasında Tablo 6'da listelenen görev gereklilikleri ile örtüşmemektedir. Örneğin; Tablo 6'da bütün görevlerin tamamlanabilmesi için 1. malzemeden 70 adet satın alınması gerektiği belirtilmiştir ancak Tablo 15'te 1. malzeme için sipariş verilen toplam miktarın 41 adet olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi, alt yüklenicinin gerçekleştirdiği görevlerdir. Alt yüklenici göreve atandığında, gerçekleştirmeleri kendi kaynakları ile tamamladığı varsayılmıştır. Alt yüklenici, firmanın satın aldığı malzemelerden kullanmadığı için bir görevin ne kadarı alt yüklenici tarafından gerçekleştirilirse, o görev için sipariş verilen malzeme miktarı da o kadar azalmaktadır. Sonuç olarak sipariş verilen toplam malzeme miktarı (o_{tp}), görevlerin toplam malzeme gerekliliklerinin (rp_{gp}) %58'ini oluşturmaktadır. Sipariş verilen malzemelerin toplam fiyatları (f_{tp}) 43.224 TL tutarındadır. 16.060 TL tutarındaki toplam sabit sipariş maliyeti de eklendiğinde, malzemelerin satın alınması için ödenen toplam tutarın 59.284 TL olduğu hesaplanmıştır.

Görevlerin gerçekleştirmeleri 10 hafta boyunca devam etmektedir. Aynı görev için birden çok haftada atama yapılmıştır. Bu da, görevlerin her hafta kısmi olarak tamamlandığı anlamına gelmektedir. Göreve ilişkin tamamlanma süreleri de görevin gerektirdiği malzemeler de tek haftada tükenmediği için, görevin tamamlanmayan kısımla-

rına diğer haftalarda devam edilmektedir. Bu durum, görev için sipariş verilen malzemelerin görev tamamlanana kadar barındırılmasını gerektirmektedir. Kısmen kullanılan ve tekrar kullanılmak üzere envantere saklanan malzemeler için stok maliyeti oluşmaktadır. Stok maliyeti malzeme boyutlarına, saklama koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Kullanım gününe kadar envantere bekleyen malzemelerin hepsi için stok maliyeti hesaplanmıştır. Haftalar içerisinde malzemelerin envanter durumları Tablo 16'da gösterilmektedir.

e_{tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,83	8,71	10,15	6,81	20,78	19,78	14,82	18,17	7,23	12,78
2	0	4,59	0	5,31	13,12	15,22	11,77	7,76	5,68	7,69
3	4,74	0	6,71	3,43	5,72	11,14	8,10	0	4,01	3,67
4	0	5,05	0	2,58	0	4,13	5,29	10,68	2,80	0
5	8,27	0	12,48	0,83	20,31	0	2,35	0	1,21	10,41
6	3,33	7,12	5,99	0	12,20	21,09	0	3,90	0	4,89
7	0	0	0	22,47	0	17,50	8,96	0	7,98	0
8	4,75	8,48	5,31	15,29	18,04	13,91	4,33	11,06	4,40	8,88
9	0,93	0	0	10,75	5,78	7,27	1,30	0	1,93	3,05
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 16. Envanter Tablosu (birim miktar)

Tablo 16'daki satırlar haftaları, sütunlar malzemeleri, değerler ise envantere saklanan malzeme miktarlarını ifade etmektedir. $t = 0$ 'da bütün malzemelere ilişkin envanter 0 kabul edilmiştir. Bu nedenle ilk haftada bütün malzemelerden sipariş verilmektedir. Proje 10. haftada tamamlandığından görevlerin tamamının son haftaya kadar gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Bu nedenle stoklar (envanter) $t = 10$ 'a gelindiğinde tamamen kullanılarak tüketilmiştir. Tablo 16'da belirtilen envanter değerleri için toplamda 9.346 TL stok (elde bulundurma) maliyetine katlanması gerekmektedir.

Sonuç olarak örnek olay veri seti çözümü ile projenin 10. haftada tamamlanmış olacağı saptanmıştır. Müşteri ile anlaşılan teslim tarihi 8. hafta olduğundan, firma 2 haftalık gecikme cezası ödemek durumunda kalacaktır. Müşteriye ödenecek gecikme

cezası haftalık 40.000 TL olup proje tamamlandığında ödenecek toplam gecikme cezası ise 80.000 TL tutarındadır.

Bahsedilen maliyetlerin hepsi toplanarak toplam maliyet olan 11.930.250 TL'yi oluşturmaktadır. İleriki bölümde, örnek olay veri seti üzerinde yapılan parametre değişikliklerinin sonuçları ne yönde etkilediği incelenecektir.

3.3 ÖRNEK OLAY ÜZERİNDE SENARYO ANALİZLERİ

Bu bölümde, daha önce tanıtılan veri seti kullanılarak farklı parametrelerdeki değişikliklerin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenecektir. Örnek olay üzerinden incelenecek senaryolar Tablo 17'de özetlenmiştir. Senaryo analizleri için örnek olay veri seti kullanılmıştır. Gerçekleştirilen senaryo analizleri ile bu tez çalışması kapsamında literatüre yapılan katkıların katma değerini ve dolayısıyla çalışmanın akademik ve pratik önemini vurgulamak adına, modele dahil edilen varsayımlar çıkarılarak bu varsayımların göz ardı edilmesinin karar vericiyi optimal politikadan ne kadar uzaklaştıracağını gösterilmesi amaçlanmıştır.

Senaryo	Açıklama
Senaryo 1	Görevlerin Eş Zamanlı Gerçekleştirilmediği Varsayımının Analizi
Senaryo 2	Malzeme kısıtları
Senaryo 2.1	Bütün malzemelerin ilk hafta alınması
Senaryo 2.2	Bütün malzeme siparişlerinin görevin başladığı hafta verilmesi
Senaryo 2.3	Her hafta o haftada ihtiyaç duyulacak kadar malzeme siparişi verilmesi

Tablo 17. Senaryolar

3.3.1 Senaryo 1: Görevlerin Eş Zamanlı Gerçekleştirilmediği Varsayımının Analizi

Bu çalışmayı daha önce gerçekleştirilen birçok çalışmadan ayıran unsurlardan biri, aralarında öncelik ilişkisi bulunmayan görevlerin eş zamanlı olarak gerçekleştirilebiliyor olmasıdır. Böylece farklı görevlere aynı haftalar içerisinde atamalar yapılarak

Sonuçlar	Örnek Olay	Senaryo 1
Toplam Maliyet (TL)	11.930.250	16.896.748
Proje Bitiş Haftası	10	15
Toplam İşçilik Maliyeti (TL)	3.082.820	1.390.905
Toplam Alt Yüklenici Hizmet Alımı Maliyeti (TL)	8.698.800	15.189.300
Toplam Gecikme Cezası Maliyeti (TL)	80.000	280.000
Toplam Sabit Sipariş Maliyeti (TL)	16.060	10.580
Toplam Elde Bulundurma Maliyeti (TL)	9.346	5.795
Malzeme Toplam Satın Alma Maliyeti (TL)	43.224	20.168
Toplam Çalışma Süresi (saat)	19.263	15.964

Tablo 18. Senaryo 1 Özet Sonuç Tablosu

Senaryo 1 çözümü için örnek olay veri setinde yalnızca planlama ufku ve öncelik ilişkileri değiştirilmiştir. Diğer veriler aynı bırakılmıştır.

Senaryo 1 analizi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, öncelikle alt yüklenici hizmet alımı maliyetindeki artış dikkat çekmektedir. Görevlerin sırayla tamamlanması gerekliliği, firmanın kendi kaynakları tarafından gerçekleştirilen işlerde azalmaya sebep olmuştur. İş gücü gruplarının müsait süreleri sınırlı olduğundan, görevlerin sırayla gerçekleştirilmesi durumunda firmanın kaynakları, görevlere yeterli süreyi ayıramamıştır. Dolayısıyla eksik kalan görevler, alt yüklenici tarafından tamamlanmıştır. Bu durum toplam maliyette %42 oranında artışa sebep olmuştur. Senaryo 1 çözümünde alt yüklenici tarafından çalışılan süreler Tablo 19’da yer verilmiştir.

S1 <i>y_{gt}</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	320,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	314,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	783,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	581,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1.215	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	508	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1.000	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1.089,6	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.520	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	248,2	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	490	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	510	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	685,3

Tablo 19. Senaryo 1 Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)

Tablo 19’da görülebileceği üzere alt yüklenici 11. görev dışında bütün görevlerde çalışmıştır. Senaryo 1’de tamamen firma kaynakları tarafından tamamlanan tek görev 11’dir. Diğer görevlerin ise büyük çoğunluğu yine alt yüklenici tarafından tamamlanmıştır. Görevlerin eş zamanlı gerçekleştirilememesi varsayımı (Senaryo 1) ile elde edilen sonuçta alt yüklenicinin proje ömrü boyunca toplam çalışma süresi 10.126 saatir. Alt yüklenici tarafından çalışılan saat ve buna ilişkin oluşan alt yüklenici maliyet verilerinde, örnek olay ile karşılaştırıldığında Senaryo 1’deki sonuç değerlerinde %75 artış gözlemlenmiştir. Örnek olayda projenin yalnızca %45’i alt yüklenici tarafından tamamlanırken Senaryo 1’de bu oran %78’e yükselmiştir.

Oluşturulan modelin görevlerin eş zamanlı gerçekleştirilememesi varsayımıyla (Senaryo 1) çözülmesi sonucunda, firma kaynakları tarafından harcanan süre 5.838 saate düşmüştür. Firmanın kendi kaynaklarının toplam çalışma süresinde %70 düşüş gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak işçilik maliyetinde de %55 oranında azalma gözlenmektedir. Firma kaynakları tarafından harcanan sürenin %75’i mesai saatlerinde, %25’i ise fazla mesaide gerçekleşmiştir. Senaryo 1’de görevlerin yalnızca %22’si firmanın kendi kaynakları tarafından tamamlanmıştır.

Atamalara ilişkin sonuçlardaki farklılıklar gibi, Senaryo 1 ile modelin 2. aşaması olan

harcama takviminde de değişiklikler meydana gelmiştir. Görevlerin çoğu alt yüklenici tarafından tamamlandığı için, malzemelere olan ihtiyaç da azalmıştır. Örnek olayda 33 kez sipariş verilirken Senaryo 1’de sipariş sayısı 21’e düşmüştür. Bu durum, toplam sabit sipariş maliyeti tutarında %34 azalışa sebep olmuştur.

S1 <i>otp</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8,64	21,57	12,42	14,13	24,95	12,17	10,63	14,15	8,70	11,29
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5,66	0	12,94	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	16,23	0	0	6,97	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	10,34	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	3,06	20,57	18,04	0	0	15,94	0	32,70	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,14
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 20. Senaryo 1 Sipariş Tablosu (birim miktar)

15 hafta boyunca sipariş verilen malzemelerin miktarları Tablo 20’de gösterilmektedir. Örnek olay ile karşılaştırıldığında, sipariş verilen malzeme miktarlarının Senaryo 1’de %22 oranında azaldığı gözlenmiştir. Bu sebeple, malzemelerin toplam satın alma fiyatında da %53 düşüş gerçekleşmiştir. Sabit sipariş satın alma maliyeti de eklendiğinde proje boyunca ihtiyaç duyulacak malzemelerin satın alma maliyeti Senaryo 1 için 30.748 TL hesaplanmıştır.

Görevlerin eş zamanlı gerçekleşemediği varsayımıyla çözülen Senaryo 1’deki satın alınan malzemelerin sayısındaki düşüş, elde bulundurma maliyetinde de düşüşe sebep olmuştur. Örnek olay ve Senaryo 1 toplam elde bulundurma maliyeti açısından

karşılaştırıldığında Senaryo 1'deki maliyette %38 düşüş gözlenmiştir.

Tablo 18'e bakıldığında malzeme maliyetlerinin tamamında düşüş gerçekleşmesine rağmen toplam maliyette %42 oranında artış gerçekleşmiştir. Bunun başlıca sebebi alt yüklenici maliyetindeki artıştır. Örnek olay ile karşılaştırıldığında Senaryo 1'de artış gözlemlenen başka bir maliyet ise gecikme cezası maliyetidir. Senaryo 1'de planlama ufku 15 haftaya çıkarılmasına rağmen müşteri ile sözleşilen teslim tarihi halen 8. hafta olduğu için, Senaryo 1'de gecikme cezası 7 hafta için 280.000 TL olacak şekilde hesaplanmıştır.

Görevlerin eş zamanlı gerçekleşmemesi varsayımıyla oluşturulan Senaryo 1 için yukarıda elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak, görevlerin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesinin firmaya fayda sağladığı açıkça görülmektedir. Görevlerin eş zamanlı olarak gerçekleştirilebildiği durumda firma hem maliyetten hem de süreden tasarruf etmektedir. Ayrıca, bu durumda firma kendi kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanabilmektedir.

3.3.2 Senaryo 2: Malzeme Kısıtları

Bu bölümde, orijinal modelde yer alan malzeme kısıtlarının (2.13, 2.14 ve 2.15) problemde çıkarılarak 3 varsayıma göre harcama takvimi oluşturulması durumunda elde edilecek sonuçlar incelenecek ve karşılaştırılacaktır. Malzeme sipariş kararlarının modele dahil edilmemesi durumunda karar vericinin basit sezgisel yöntemlerden birini kullanması beklenmektedir. Bu nedenle senaryo analizlerinde 3 örnek sezgisel yöntem denenmiştir. Bu 3 varsayım aşağıda listelenmiştir;

- Bütün malzemelerin ilk hafta alınması,
- Bütün malzeme siparişlerinin görevin başladığı hafta verilmesi,
- Her hafta o haftada ihtiyaç duyulacak kadar malzeme siparişi verilmesi.

Senaryolar incelenmeden önce örnek olay veri seti, malzeme kısıtları dahil edilmeden çalıştırılmıştır. İşçilik, alt yüklenici, ceza vb. sonuçların hepsi, incelenecek 3 senaryo

için de aynı olacaktır. 3 senaryoda da malzeme kısıtlarının yalnızca maliyete etkisi incelenecektir.

Malzeme kısıtları modelden kaldırılarak örnek olay veri seti tekrar çözüldüğünde işçilik, alt yüklenici, gecikme sürelerinde ve maliyetlerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Yalnızca atama yapılan haftalarda veya görevlerde değişiklik gözlenmiştir ancak bu değişiklik, toplama yansımamıştır. Malzeme maliyetleri probleminden çıkarıldığı için toplam maliyet 11.861.620 TL'ye düşmüştür.

Malzeme kısıtlarının modelden çıkarılmasının ardından toplam maliyetle beraber, atama yapılan haftalarda veya görevlerde de değişiklik saptanmıştır. Toplam süreler ve atama yapılan iş gücü aynı olsa bile malzeme kısıtları kaldırıldıktan sonra ufak değişiklikler gerçekleşmiştir.

S2 y_{gt}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	860
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	175,9	0	0	0
6	1.215	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000
9	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1.520	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	490
14	510	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	20,3	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 21. Senaryo 2 Alt Yüklenici Hizmet Alımı (Saat)

Alt yüklenici tarafından çalışılan süreler Tablo 21'de gösterilmiştir. Çalışılan toplam süre ve gerçekleşen maliyet aynı olsa bile, bazı farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin; 5.

görev örnek olayda alt yüklenici tarafından 10. haftada gerçekleştirilirken, malzeme kısıtları olmadan çözülen Senaryo 2’de 8. haftada gerçekleştirilmektedir.

Alt yüklenici ve firmanın kendi kaynakları dahil olacak şekilde hangi haftalarda hangi görevlere atama yapıldığını gösteren ikili değişkenin matrisine de Tablo 22’de yer verilmiştir.

S2 w_{gt}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1

Tablo 22. Senaryo 2 İkili Değişken-Atama Tablosu

Sonuçlar	Örnek Olay	Senaryo 2.1	Senaryo 2.2	Senaryo 2.3
Toplam Maliyet (TL)	11.930.250	11.956.200	11.951.126	12.011.499
Toplam Sabit Sipariş Maliyeti (TL)	16.060	5.580	22.320	55.800
Toplam Elde Bulundurma Maliyeti (TL)	9.346	48.686	24.888	0
Malzeme Toplam Satın Alma Maliyeti (TL)	43.224	40.314	42.298	94.079

Tablo 23. Senaryo 2 Özet Sonuç Tablosu

Tablo 23'e bakıldığında, bu bölümde incelenecek varsayımların tamamı örnek olay veri seti sonuçları ile karşılaştırıldığında maliyet bakımından avantajlıdır. Örnek olay çözümünde probleme dahil edilmiş olan malzeme kısıtları, maliyet bakımından optimal bir harcama takvimi oluşturmaktadır. Bu nedenle malzeme kararlarının modelde yer alması, kritik önem taşımaktadır.

Tablo 23'te bütün senaryoların sonuçları birbirleriyle ve örnek olayla karşılaştırılmıştır. İlerleyen bölümlerde, Senaryo 2'nin altında maddelenen 3 senaryo ve sonuçları kendi başlıkları altında incelenecektir.

3.3.2.1 Senaryo 2.1: Bütün Malzemelerin İlk Hafta Alındığı Varsayımının Analizi

Bütün malzemelerin projenin ilk haftasında sipariş edildiği varsayımıyla oluşturulan Senaryo 2.1'e ilişkin alt yüklenici hizmet alımı ve atamalar Tablo 21 ve 22'de gösterilmektedir. Var olan çalışma saatleri üzerinden, malzemelerin ilk hafta satın alım maliyetleri ve haftalar içerisindeki envanter durumları hesaplanmıştır. Senaryo 2.1'e ilişkin envanter verileri Tablo 24'te yer almaktadır.

S2.1 e_{tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	36,86	61,99	91,01	37,06	83,59	46,83	28,93	95,86	18,87	44,58
2	32,24	57,96	82,24	35,80	76,13	41,35	25,98	85,04	17,45	39,32
3	27,22	53,65	71,20	34,10	68,17	37,31	22,84	74,54	15,77	34,40
4	21,89	49,17	60,15	32,59	60,83	32,74	19,90	64,73	14,15	29,79
5	16,95	43,65	49,31	30,86	52,24	28,20	17,06	53,52	12,63	24,58
6	11,67	37,54	40,19	29,41	43,76	21,26	14,02	41,79	11,17	19,52
7	8,32	30,41	34,22	22,50	31,46	17,74	9,50	38,00	7,89	14,64
8	4,78	22,69	26,91	15,85	18,43	13,58	4,49	33,16	4,60	8,91
9	0,93	14,24	21,60	10,75	5,78	7,27	1,30	22,65	1,93	3,05
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 24. Senaryo 2.1 Envanter Tablosu (birim miktar)

Tablo 24’te verilen envanter miktarları ile malzemelerin stok maliyetleri çarpılarak toplam elde bulundurma maliyetine ulaşılmıştır. Proje başında olacak şekilde 10 hafta içerisinde yalnızca bir kez sipariş verildiğinden, sabit satın alma maliyetinde ciddi bir düşüş olmuştur ancak görevlerin hepsi tamamlanana kadar malzemeler depolarda saklanmaya devam edildiği için, elde bulundurma maliyetinden ötürü Senaryo 2.1’de, örnek olay ile karşılaştırıldığında toplam malzeme maliyetinde artış gözlenmiştir. Örnek olay ile karşılaştırıldığında, Senaryo 2.1’de elde bulundurma maliyeti (stok maliyeti) %81 artmıştır. Sabit sipariş maliyeti örnek olay ile karşılaştırıldığında Senaryo 2.1’de çok daha düşük olsa da, toplam maliyetlerde üstünlük sağlamak için yeterli olmamıştır. Örnek olay veri setinde malzeme maliyetlerinin tamamının toplamı 68.630 TL iken, bütün malzemelerin projenin başında alınması senaryosunda toplam malzeme maliyeti 94.580 TL’ye yükselerek %27 artış göstermiştir.

3.3.2.2 Senaryo 2.2: Bütün Malzeme Siparişlerinin İlgili Görevin Başladığı Hafta Verildiği Varsayımının Analizi

Bütün malzeme siparişlerinin ilgili görevin başladığı hafta verilmesi varsayımıyla çözülen modelde de atama verileri olarak Tablo 21 ve 22’de gösterilen veriler kullanılmıştır. Görevlerin başladığı haftalarda, o görevin tamamlanması için gereken bütün malzemelerin siparişi verilecek şekilde hesaplama yapılmış ve sonucunda ulaşılan envanter (stok) durumları Tablo 25’te gösterilmiştir.

S2.2 e_{tp}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	24,10	28,95	43,84	5,04	29,99	30,33	11,64	34,55	5,11	20,10
2	23,48	25,93	50,95	8,79	46,35	25,84	16,71	61,28	7,69	30,56
3	18,46	21,62	39,90	7,09	38,39	21,80	13,58	50,78	6,01	25,64
4	13,13	17,14	28,86	5,58	31,06	17,22	10,64	40,97	4,39	21,03
5	8,19	11,63	18,02	3,85	22,46	12,69	7,79	29,76	2,87	15,82
6	2,90	5,51	8,89	2,40	13,98	5,75	4,75	18,03	1,41	10,76
7	8,32	18,41	17,22	12,50	29,46	11,74	9,50	19,00	6,89	14,64
8	4,78	10,69	9,91	5,85	16,43	7,58	4,49	14,16	3,60	8,91
9	0,93	2,24	4,60	0,75	3,78	1,27	1,30	3,65	0,93	3,05
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 25. Senaryo 2.2 Envanter Tablosu (birim miktar)

Görevlerin başlatıldığı haftalarda, başlayan görevlerin tamamlanabilmesi için ihtiyaç duyulan bütün malzemelerin siparişlerinin verildiği varsayılmıştır. Bir önceki senaryonun aksine, farklı haftalarda siparişler verildiği için örnek olay ile karşılaştırıldığında Senaryo 2.2’de sabit sipariş maliyeti artmıştır. Senaryo 2.1’deki gibi bütün siparişlerin proje başında verilmesi yerine farklı haftalarda siparişler verilmesinin başka bir sonucu olarak ise malzemelerin toplam satın alım fiyatlarında Senaryo 2.1 ile karşılaştırıldığında artış gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ise, haftalar içerisinde farklı etkenlerden dolayı malzeme fiyatlarına yansıyan artışlardır.

Stok maliyeti açısından ele alındığında, Senaryo 2.1 ile kıyaslandığında Senaryo 2.2 için elde edilen stok maliyeti yarıya düşmüştür. Buna rağmen görevlerin başladığı hafta kümülatif malzeme siparişlerinin verilmesi varsayımı, örnek olayda oluşturulan optimal harcama takvimi ile kıyaslandığında maliyet açısından avantaj sağlayamamıştır. Örnek olay veri setinde malzemelerin toplam maliyetleri 68.630 TL iken Senaryo 2.2’de bu tutar 89.506 TL’ye yükselerek %23 artışa sebep olmuştur.

3.3.2.3 Senaryo 2.3: Her Hafta İhtiyaç Duyulacak Kadar Malzeme Siparişinin Verildiği Varsayımının Analizi

Yalnızca 1 haftalık görev ihtiyacı kadar sipariş verilmesi, dolayısıyla her hafta sipariş verilmesi varsayımıyla çözülen modeldeki atama verileri olarak yine Tablo 21 ve 22’deki veriler kullanılmıştır. Bu senaryoda verilen siparişler haftalık ihtiyaç kadar

verildiği için 1 hafta içerisinde tükünmektedir dolayısıyla bu senaryoda depolanacak malzeme olmadığından, stok maliyeti de bulunmamaktadır. Bu nedenle diğer 2 senaryonun aksine bu senaryoda envanter değil sipariş verileri gösterilecektir. Senaryo 2.3'e ilişkin sipariş verileri Tablo 26'da yer almaktadır.

S2.3 <i>otp</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,87	7,03	8,06	0,95	6,95	7,63	2,32	8,44	0,88	4,82
2	6,23	3,98	10,73	1,23	7,32	6,73	3,40	11,46	1,85	5,05
3	4,62	4,31	10,52	1,71	7,97	3,72	3,01	10,34	1,57	4,94
4	4,86	4,49	10,44	1,51	7,35	4,21	2,79	9,62	1,50	4,63
5	4,62	5,52	10,42	1,73	8,60	4,28	2,75	11,08	1,43	5,23
6	4,90	6,12	8,64	1,45	8,50	6,63	2,92	11,58	1,36	5,09
7	3,35	9,08	13,11	8,21	18,14	4,82	8,41	3,79	3,27	13,32
8	3,54	7,72	7,34	6,65	13,05	4,16	5,03	4,83	3,29	5,76
9	3,85	8,45	5,31	5,11	12,65	6,31	3,18	10,51	2,67	5,86
10	0,93	14,24	21,60	10,75	5,78	7,27	1,30	22,66	1,93	3,05

Tablo 26. Senaryo 2.3 Sipariş Tablosu (birim miktar)

Bu senaryoda, siparişlerin yalnızca haftalık ihtiyaçlar şeklinde verildiği varsayılmıştır. Bunun bir sonucu olarak malzemeler sürekli kullanımda olduğundan stok maliyeti oluşturmamaktadır. Buna rağmen, her haftanın kendi ihtiyacına göre sipariş verildiği için 10 haftalık periyotta her hafta sipariş verilmesi gerekmiştir. Tablo 26'da gösterildiği üzere her hafta her malzemedan farklı miktarlarda sipariş verilmiş bu nedenle her seferinde her malzeme için sabit sipariş maliyetine katlanılmıştır. 10. haftaya kadar verilen siparişlerin de fazlalığı sebebiyle haftalara sari fiyat artışları da maliyeti etkilemiştir.

Bu senaryoda elde edilen toplam malzeme maliyeti 149.879 TL tutarındadır. Örnek olay ile karşılaştırıldığında, malzeme maliyetinde %54 artış gözlenmiştir. Yukarıda açıklanan senaryoların (2.1, 2.2, 2.3) örnek olay ile karşılaştırıldığı veriler Tablo 23'te yer almaktadır.

3.4 BÜYÜK BOYUTLU PROBLEM ÖRNEĞİ

Bu bölümde, çalışma kapsamında oluşturulan matematiksel model daha geniş bir veri setiyle tekrar çözülecek ve sonuçlarına ilişkin yorumlar yapılacaktır. Öncelikle, örnek

olay veri setinin genişletilmiş hali tanıtılacaktır. Bu verinin çözümü için IBM OPL ILOG CPLEX Optimization Studio yazılımının 22.1.1 sürümü kullanılmıştır. Sonuca 64 GB belleğe ve 64 bit işletim sistemine sahip Intel(R) Xeon(R) Silver 4216 CPU 2.10 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılarak ulaşılmıştır. Bu bölümde incelenecek veri setiyle optimal sonuca, 24 saat zaman kısıtı konularak %9 yaklaşılabilmektedir. İlerleyen başlıklar altında genişletilen veri seti detaylıca incelenecek ve optimale %9 yaklaşan sonuçlar yorumlanacaktır.

3.4.1 Büyük Boyutlu Problem Örneğinin Tanıtılması

Gerçeğe daha yakın bir proje planı elde edilmesi adına, örnek olayda kullanılan veri seti genişletilerek matematiksel model tekrar çözülmüştür. Örnek olayda olduğu gibi bu veride de 1 müşteri makamı, proje sahibi 1 firma ve planlanacak 1 adet proje bulunmaktadır.

Görev sayıları değiştirilmemiştir. Bu veri setinde de 15 görev bulunmaktadır ancak görevlerin tamamlanması için gereken süreler değiştirilmiştir. Büyük boyutlu problem örneğinde görevlerin tamamlanması için gereken süreler Tablo 27’de yer almaktadır.

r_g	Saat
1	7.500
2	12.000
3	8.500
4	9.100
5	7.600
6	8.400
7	9.000
8	7.100
9	8.200
10	8.135
11	7.900
12	6.830
13	7.940
14	8.620
15	8.050

Tablo 27. Büyük Boyutlu Problem Örneği-Görev Süreleri

Tablo 27’de verilen büyük boyutlu problem örneğine ait görev gerekliliklerinin tamamlanabilmesi için firma bünyesinde bulunan iş gücü gruplarının sayısı 5’e, kıdem sayısı ise 4’e çıkarılmıştır. Masraf yeri sayısı örnek olay veri setinde olduğu gibi 5 bırakılmıştır. İş gücü gruplarının müsaitlik saatleri kıdem, masraf yeri ve haftaya göre saatlik bazda hesaplanmıştır. Büyük boyutlu problem örneğinde planlama ufku 30 haftaya çıkarılmıştır. İş gücü gruplarının mesai saatlerinde ve fazla mesaideki müsaitlikleri 30 hafta için hesaplanmıştır. Müşteri ile anlaşılan teslimat tarihi 24. hafta olup bu haftadan itibaren yaşanan her gecikme için haftalık olarak 100.000 TL ceza oluşacaktır.

Görevlerin öncelik sıralamalarında da herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Büyük boyutlu problem örneğindeki görevlerin öncelik sıralamaları Tablo 5’te yer almaktadır.

Görevlerin tamamlanabilmesi için yine iki seçenek bulunmaktadır. Firmanın kendi

kaynaklarıyla görevleri tamamlaması maliyet bakımın avantajlı olan seçenektir. Firma kaynaklarının (iş gücü grupları) görevlere atanabilmeleri için iş gücü gruplarının görev gerekliliklerini sağlaması gerekmektedir. Görev sayısı ve öncelik sıralamaları gibi, görevlerin gerektirdiği yetenekler ve eşik uzmanlık değerleri örnek veri setindekiyle aynı bırakılmıştır. Büyük boyutlu problem örneğindeki görevlerin yetenek ve uzmanlık seviyelerine Tablo 3'te yer verilmiştir. Bu gereklilikleri sağlamayan iş gücünün görevlere atanması mümkün olmamaktadır. Görevlerin gerektirdiği süre iş gücü müsaitliklerinin %84'ünü oluştursa da, hem gerekliliklerin sağlanamaması durumunda iş gücü görevlere atanmadığı için hem de gereklilikleri sağlayarak göreve atansa bile çalıştığı süreler uzmanlık puanları ile çarpıldığı için firmanın kendi kaynakları, projenin tamamlanmasında çoğunlukla tek başına yeterli olmamaktadır. Bu noktada, bütün görevlerin tamamlanması gerektiği için alt yüklenici hizmet alımı seçeneğine başvurulabilmektedir. Alt yüklenici hizmet alımının saatlik ücreti 1.500 TL olup alt yüklenici uzmanlığı 1 kabul edildiği için, alt yüklenici tarafından çalışılan saatler görevlerin tamamlanmasına direkt etki etmektedir.

Problemin 1. aşaması olan atamaya ilişkin veriler tanıtılmış olup 2. aşama olan harcama takvimine ilişkin veriler de aşağıda tanıtılacaktır.

Örnek olay veri setindeki malzeme sayısı artırılarak 100'e çıkarılmıştır. 15 görevden her birinin tamamlanabilmesi için 100 malzemedan farklı miktarlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemelerin fiyatları, örnek olay veri setinde olduğu gibi her hafta artmaktadır. Örnek olay veri setinden farklı olarak bu bölümde hafta sayısı 30'a çıkarıldığından 100 farklı malzemenin fiyatı 30 hafta için de hesaplanmış ve planlama ufku uzun olduğu için malzeme fiyatları ilk ve son hafta karşılaştırıldığında daha belirgin değişiklikler göstermiştir. Malzemelerin satın alım fiyatları dışında sipariş esnasında toplam fiyata eklenen sabit sipariş maliyetleri de 100 malzeme için farklı olacak şekilde probleme dahil edilmiştir. Malzemelerin niteliklerine ve kapladıkları alanlara göre değişen stok maliyeti (elde bulundurma maliyeti) de 100 farklı malzeme için hesaplanarak probleme dahil edilmiştir. $t = 0$ zamanında envanterin 0 olduğu, yani proje başında projeye ilişkin envantere hiçbir malzeme bulunmadığı ve gerekli bütün malzemelerin proje bütçesi kapsamında sipariş verilmesi gerektiği varsayılmıştır.

Büyük boyutlu problem örneğine ilişkin özet bilgiler Tablo 28'de yer almaktadır. Bü-

yük boyutlu problem örneğinin optimale %9 yaklaşan çözüme ilişkin sonuçlar bir sonraki bölümde yorumlanacaktır.

Setler ve Parametreler	Birim	Değer
Planlama Ufku	Hafta	$T = 1, 2, \dots, 30$
Sözleşme Teslim Tarihi	Hafta	$B = 24$
Görev		$G = 1, 2, \dots, 15$
Toplam Görev Süresi	Saat	124.875
Gecikme Cezası	Hafta	$c_p = 100.000 TL$
İş Gücü Grubu		$I = 1, 2, 3, 4, 5$
Kıdem		$K = 1, 2, 3, 4$
Masraf Yeri		$M = 1, 2, 3, 4, 5$
Malzeme		$P = 1, 2, \dots, 100$
Alt Yüklenici Maliyeti	Saat	$c^a = 1.500 TL$
Yetenek		$S = 1, 2, \dots, 7$

Tablo 28. Büyük Boyutlu Problem Örneği Özet

3.4.2 Büyük Boyutlu Problem Örneğinin Çözümü ve Analizi

Bu bölümde, yukarıda tanıtılan büyük boyutlu problem örneği için maliyet minimizasyonu altında optimale %9 yaklaşan sonuçlar incelenecektir. Tanıtılan veri seti kullanılarak elde edilen sonuçlara Tablo 29'da yer verilmiştir.

Örnek Olay Sonuçları	Değer
Toplam Maliyet (TL)	90.043.713
Proje Bitiş Haftası	30
Toplam İşçilik Maliyeti (TL)	34.575.607
Toplam Alt Yüklenici Hizmet Alımı Maliyeti (TL)	53.610.735
Toplam Gecikme Cezası Maliyeti (TL)	600.000
Toplam Sabit Sipariş Maliyeti (TL)	387.995
Toplam Elde Bulundurma Maliyeti (TL)	252.442
Malzeme Toplam Satın Alma Maliyeti (TL)	616.934
Toplam Çalışma Süresi (saat)	138.374

Tablo 29. Büyük Boyutlu Problem Örneği Özet Sonuç Tablosu

Projenin planlanması aşamasında hesaplanan işçilik maliyeti, alt yüklenici maliyeti, ceza maliyeti, elde bulundurma maliyeti, sabit sipariş maliyeti ve malzeme maliyeti projenin toplam maliyetini oluşturmaktadır.

%9 optimale yaklaşan sonuçta proje 30. haftada tamamlanmaktadır. Müşteri ile anlaşılan hafta 24. hafta olduğundan projeye 6 haftalık gecikme cezası yansımıştır. Gecikme cezası maliyeti 600.000 TL olarak hesaplanmıştır.

İşçilik, firmanın kendi kaynakları tarafından çalışılan süreyi ifade etmektedir. Büyük boyutlu problem örneği sonuçlarına göre firma kaynakları tarafından mesai saatleri içerisinde 97.018 saat, fazla mesaide ise 41.356 saat çalışılmıştır. Bu süreler iş gücü gruplarının uzmanlık puanları ile çarpıldığı için firmanın kendi kaynaklarının görev saatlerine katkısı toplamda 89.135 saat olmuştur. Projenin %71'i firmanın kendi kaynakları tarafından tamamlanmıştır. Buna ilişkin mesai saatleri içerisinde 18.664.709 TL, fazla mesaide ise 15.910.898 TL işçilik maliyeti oluşmuştur.

Alt yüklenici hizmet alımı, alt yüklenici tarafından çalışılan süreyi ifade etmektedir. Firmanın kendi kaynakları tarafından karşılanamayan 35.740 saatlik görev, alt yüklenici tarafından tamamlanmıştır. Başka bir deyişle, projenin %29'u alt yüklenici tarafından tamamlanmıştır. Örnek olay veri seti ile karşılaştırıldığında alt yüklenici hizmet alımında azalma olduğu gözlenmektedir. Alt yüklenici tarafından çalışılan süre

karşılığında projeye 53.610.735 TL tutarında alt yüklenici hizmet alımı maliyeti yansımıştır. Bu tutar toplam maliyetin %60'ını oluşturmaktadır.

Örnek olay veri setinin aksine büyük boyutlu problem örneğinde, tamamen alt yüklenici tarafından tamamlanan bir faaliyet bulunmamaktadır. Alt yüklenici yalnızca 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 13 ve 14 numaralı görevlerde kısıtlı sürelerle çalışmıştır. 2, 6, 9, 11, 12 ve 15 numaralı görevler, tamamen firmanın kendi kaynakları tarafından tamamlanmıştır.

Atama sonuçlarının ardından, problemin 2. aşaması olan harcama takvimine ilişkin sonuçlar incelenecektir.

Büyük boyutlu problem örneğinde projenin 0 envanter ile başladığı varsayılmıştır. Dolayısıyla görevlere ilk haftadan itibaren atama yapılabilmesi için malzeme siparişlerinin bir kısmının da ilk haftadan verilmesi gerekmektedir. Alt yüklenici tarafından tamamlanan görev gereklilikleri için malzeme ihtiyacı bulunmamaktadır. Alt yüklenicinin çalışmalarını kendi malzemeleri ile gerçekleştirdiği varsayılmıştır. Dolayısıyla yalnızca firmanın kendi kaynakları tarafından tamamlanan gerekliliklere istinaden malzeme siparişi verilmiştir. 30 hafta boyunca 100 malzeme için toplamda 692 kez sipariş verilmiştir. Buna ilişkin 387.995 TL tutarında sabit sipariş maliyeti projeye yansımıştır. Bu siparişler farklı haftalarda farklı fiyatlar ile verilmiş olup malzemelerin toplam fiyatı ise 616.934 TL olarak hesaplanmıştır. Malzemeler için tedarikçilere ödenen toplam maliyete sabit sipariş maliyeti ve malzeme satın alma maliyeti toplanarak ulaşılmıştır. Tedarikçilere toplamda 1.004.929 TL ödenmiştir. Bu tutar toplam maliyetin %1'ini oluşturmaktadır.

Büyük boyutlu problem örneğinde $t = 0$ haftasında 0 envanter ile başlayan problem, en geç 30. haftada tamamlanması gerektiğinden $t = 30$ haftasını da 0 envanter ile kapatmıştır. Siparişi verilen bütün malzemeler 30. haftaya kadar kullanılmış ve tüketilmiştir. Bu kapsamda 252.442 TL tutarında elde bulundurma (stok) maliyeti projeye yansımıştır. Stok maliyeti de eklendiğinde malzemelere ilişkin bütün maliyetler, toplam maliyetin %1'ini geçmemektedir.

Bahsedilen maliyetlerin tamamı toplanarak proje maliyeti olan 90.043.713'yi oluşturmaktadır.

SONUÇ

Projeler, işletmeler tarafından hem yerel hem küresel pazarlarda yer sahibi olabilmek veya konumlarını koruyabilmek amacıyla planlanan ve sonucunda ürün, sistem, hizmet veya çözüm geliştirilen araçlardır. Projelerin etkin bir şekilde planlanması işletmeler için büyük önem taşımaktadır. İşletmelerin proje planı aşamasında projelere hem mali açıdan hem de süre açısından gerekli karşılığı ayırabilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde hem işletmenin plansız harcamaları artacak hem de müşteri memnuniyeti riske girecektir. Bu durumun önlenmesi adına işletmeler proje planlarını mümkün olduğunca gerçeğe yaklaştırmaya çalışmaktadır. Proje planlaması için birçok yazılım geliştirilmiş olmasına rağmen bu alanda yapılmaya devam eden araştırmalar, bu alandaki ihtiyacın henüz tam olarak karşılanamadığını ve bu alanın geliştirilmeye açık olduğunu kanıtlamaktadır.

Proje planlaması altında geliştirilen alanlardan biri olan Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemleri, proje planlarını zaman ve maliyet bakımından optimale ulaştırırken diğer yandan da uygulama esnasında farklı iyileştirmeler gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Bu problemlerde iş gücü, sahip olduğu yeteneklerle beraber değerlendirildiğinden iş gücünün çalışma alanları diğer problem türlerine göre daha geniştir. İş gücü, deneyimleme şansı bulduğu birçok farklı işte çalışabildiği için hem iş tatmini artmakta hem de işletme için vazgeçmesi daha zor bir kaynak haline gelmektedir. Aynı zamanda işletmede oluşturulacak projeye ilişkin maliyet ve/veya süre de en aza indirildiği için bu problemlerde iş gücü ve işletme için kazan kazan durumu oluşmaktadır.

Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklı Proje Planlama Problemleri kapsamında literatür taranırken birçok faydalı çalışma bulunmuş ve bu çalışmalarda kullanılan yöntemlerden bazıları bu çalışmaya da dahil edilmiştir. Bu yöntemlerden biri, yukarıdaki bölümlerde detaylıca açıklanan heterojen verimlilik konseptidir. Literatür taranırken, planlanan projelerdeki faaliyetlerin/görevlerin çoğu çalışmada sıralanarak gerçekleştirildiğine rastlanmıştır. İşletmenin yeterli sayıda kaynağının olduğu ve görevlerin bir kısmının teknolojik gerekliliklerle bağlanmadığı bir ortamda görevlerin sıralı olması kısıtı zaman kaybına yol açtığından öncelik kısıtları bu çalışmada yal-

nızca gerekli görevlerde olacak şekilde daraltılmıştır. Bu durum, eş zamanlı faaliyet gerçekleştirme olarak ifade edilmiştir. Taranan literatürde bu yapıya benzer yalnızca 1 çalışmaya rastlanabilmektedir, o çalışmada ise heterojen verimlilik bulunmamaktadır. Bu nedenle heterojen verimlilik konseptiyle eş zamanlı faaliyet gerçekleştirebilme yeteneğinin bu çalışmada birleştirilmesiyle literatüre katkı sağlayacak yenilikçi bir çalışma gerçekleştirildiği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada oluşturulan problemin ikinci aşaması harcama takviminden oluşmaktadır. Bu etapta, haftalar veya malzemeler bazında değişen maliyetler gerçeğe en yakın şekilde en aza indirgenerek planlanmaktadır. Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kaynak Kısıtlı Proje Planlama Problemlerine ilişkin literatür taranırken harcama takviminin dahil edildiği bir çalışmaya rastlanamamıştır bu nedenle harcama takviminin de daha önce çalışılmamış ve dolayısıyla literatüre katkı sağlayan bir unsur olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenen problemdeki yapı, Ankara'da faaliyet gösteren bir savunma sanayii firmasından örnek alınarak oluşturulmuştur. Bu firmada gerçekleştirilen projelerde, projenin özelliğine bağlı olarak birçok maliyet oluşmaktadır ancak bu çalışmada, her projede mutlaka olması gereken temel 3 maliyet dikkate alınmıştır; işçilik, malzeme ve ceza. Bu maliyetler farklı kısıtları ile çalışmaya dahil edilmiştir. Projede yer alan görevler firma kaynakları tarafından tamamlanabilmektedir bu durumda firmanın kendi kaynaklarına ilişkin işçilik maliyeti oluşmaktadır. Firmanın kendi kaynakları tarafından görevlere zaman ayrılamaması durumunda, görevlerin alt yükleniciye verilerek tamamlanması seçeneği ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada maliyet işçilik maliyetinden alt yüklenici maliyetine dönüşmektedir. Projenin önceden müşteriyle anlaşılan tarihe yetişebilmesi için firma çoğunlukla bu seçeneği değerlendirmek durumunda kalmaktadır. Alt yüklenici hizmet alımı maliyeti firma kaynaklarının maliyetine göre çok daha yüksek olduğundan, alt yükleniciden hizmet alınması veya görevin firmanın kendi kaynaklarıyla gerçekleştirilmesi ve ardından gecikme cezasına katlanması proje için kritik bir karardır. Temel proje maliyetlerinden biri olan malzeme maliyeti de farklı boyutlara sahiptir. Öncelikle, malzeme fiyatları zaman içerisinde değişiklik göstermektedir. Planlama ufku uzun olan projelerde malzeme fiyat değişiklikleri önceden planlanmazsa, çok büyük plansız harcamalara sebebiyet vermektedir. Malzemelerin projenin başında alınması da malzeme maliyet-

ninin başka bir boyutu sebebiyle tercih edilmemektedir: elde bulundurma maliyeti. Depolama alanı sınırlı olduğundan depolanan malzemelere ilişkin oluşan maliyetler, malzemelerin toplu olarak projenin başında alınmasını caydırıcı kılmaktadır.

Çalışma kapsamında oluşturulan örnek olay veri setinde firmada 3 farklı kıdeme sahip 3 farklı iş gücü grubunun (mühendislik kulvarı, idari kulvar ve teknisyenlik kulvarı) çalıştığı 5 farklı masraf yeri olduğu varsayılmıştır. İş gücü gruplarının müsaitlikleri 10 hafta için hesaplanmış olup 10 haftalık planlama ufku için elde edilen sonuçlar ve yapılan analizler incelenmiştir. Tez çalışmasındaki örnek olayın sonuçları incelendiğinde, görevlerin eş zamanlı gerçekleştirilebilmesinin ve harcama takviminin amaç fonksiyonuna dahil edilmesinin maliyeti azaltmaya yardımcı olduğu görülmüştür. Örnek olay veri seti üzerinden yapılan analizlerin ilkinde (S1), görevlerin eş zamanlı gerçekleştirilebilmesi yeteneği çalışmadan çıkarılmış ve bütün görevlerin öncül görevi tamamlandıktan sonra başlaması kısıtı probleme dahil edilmiştir. Bu durumda hem proje süresi 15 haftaya çıkmış hem de alt yükleniciden hizmet alımı artmıştır. Örnek olayla karşılaştırıldığında Senaryo 1'de hesaplanan toplam maliyette %42 artış gözlenmiştir. Optimal sonuçla karşılaştırıldığında yaşanan bu sapma, Senaryo 1 varsayımının maliyet ve süre bakımından avantajlı olduğunu göstermektedir.

İncelenen ikinci senaryonun 3 alt başlığı bulunmaktadır. Harcama takviminin amaç fonksiyonuna dahil edilmesi yerine probleme dahil edilmeden farklı sezgisel yöntemlerle planlanması durumunda nasıl sonuçlarla karşılaşılacağı incelenmiştir. Bu kapsamda model, malzeme kısıtları olmadan çalıştırılmış ve sonuçlar üzerinde 3 farklı strateji ayrı ayrı uygulanmıştır. İkinci senaryonun ilk alt başlığı (S2.1) bütün malzemelerin projenin ilk haftasında alınması varsayımdır. Yukarıda da bahsedildiği üzere malzemelerin ilk hafta alınması fiyat artışlarından kaçmak için mantıklı bir alternatif gibi görünse de, projenin ilerleyen haftalarında kullanılacak malzemeler haftalarca depoda beklediğinden elde bulundurma maliyetinin probleme dahil olmasıyla bu varsayım, maliyet açısından avantajlı olmamaktadır. Örnek olay malzeme maliyeti ile karşılaştırıldığında Senaryo 2.1 için hesaplanan toplam malzeme maliyetinde %27 artış gözlenmiştir.

İkinci senaryonun ikinci alt başlığı (S2.2) bütün malzeme siparişlerinin ilgili görevin başladığı hafta verildiği varsayımdır. Her görev başlangıcında sipariş verildiği

için sabit sipariş maliyeti senaryo 2.2’de hayli artmıştır. Farklı haftalarda siparişler verildiğinden bütün malzemeler depolarda beklemek zorunda kalmamış dolayısıyla stok maliyetinde düşüş gerçekleşmiştir. Farklı haftalarda sipariş verilmesi, fiyat artışlarıyla karşılaşılmasına sebebiyet vermiştir. Örnek olay malzeme maliyeti ile karşılaştırıldığında Senaryo 2.2 için hesaplanan toplam malzeme maliyetinde %23 artış gözlenmiştir.

İkinci senaryonun üçüncü alt başlığı (S2.3) her hafta, o hafta ihtiyaç duyulacak kadar malzeme siparişinin verilmesi varsayımdır. Her hafta sipariş verilmesi, sabit sipariş maliyetini çok artırarak örnek olay veri seti için şu ana kadar incelenen senaryoların hepsinden yüksek bir maliyet elde edilmesine neden olmuştur. Haftalık ihtiyaç kadar sipariş verildiğinden bu senaryo kapsamında elde bulundurma maliyeti oluşmamıştır ancak her hafta sipariş verildiği için malzemelerin bütün fiyat artışlarına katlanılması gerekmiştir. Sonuç olarak örnek olay malzeme maliyeti ile karşılaştırıldığında Senaryo 2.3 için hesaplanan toplam malzeme maliyetinde %54 artış gözlenmiştir. Malzeme kısıtlarının probleme etkilerinin incelendiği ikinci senaryolar arasında maliyeti en yüksek çıkan senaryo 2.3 olmuştur.

Bütün senaryolar ve sapmalar değerlendirildiğinde, hiçbiri örnek olay veri setine maliyet avantajı sağlayamamıştır. Böylece proje planının optimal halinin örnek olay olduğu kanıtlanmıştır. Sonrasında örnek olay veri seti genişletilmiş ve zaman kısıtı konarak çözülmüştür. Bu çalışma ile hem modelin daha büyük verilerde nasıl çalıştığının gözlenmesi hem de gerçek hayat senaryolarına daha çok yaklaşılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma, kısıtlı ve çoklu yeteneğe sahip kaynakları olan bir firmanın deterministik bir planlama ortamında eş zamanlı faaliyet gerçekleştirebilme yetisine sahip olması durumunda heterojen verimlilik konsepti de dahil edilerek proje planının ve harcama takviminin optimal bir şekilde oluşturulabilmesini sağlamıştır. Gelecek dönemlerde, hem daha büyük veri setleriyle daha kısa sürede sonuç alınabilmesi için hem de stokastik ortamlarda da gerçeğe yakın planlamaların yapılabilmesi için sezgisel yaklaşımların geliştirilmesi mümkündür.

KAYNAKÇA

- Afshar-Nadjafi, B. (2021). Multi-skilling in scheduling problems: A review on models, methods and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 107004.
- Almeida, B. F., Correia, I. & Saldanha-da-Gama, F. (2016). Priority-based heuristics for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 57, 91–103.
- Almeida, B. F., Correia, I. & Saldanha-da-Gama, F. (2018). A biased random-key genetic algorithm for the project scheduling problem with flexible resources. *Top*, 26(2), 283–308.
- Almeida, B. F., Correia, I. & Saldanha-da-Gama, F. (2019). Modeling frameworks for the multi-skill resource-constrained project scheduling problem: a theoretical and empirical comparison. *International Transactions in Operational Research*, 26(3), 946–967.
- Bellenguez, O. & Néron, E. (2005). Lower bounds for the multi-skill project scheduling problem with hierarchical levels of skills. *Practice and Theory of Automated Timetabling V: 5th International Conference, PATAT 2004, Pittsburgh, PA, USA, August 18-20, 2004, Revised Selected Papers 5*, 229–243.
- Bellenguez-Morineau, O. & Néron, E. (2007). A branch-and-bound method for solving multi-skill project scheduling problem. *RAIRO-operations Research*, 41(2), 155–170.
- Cai, J., Peng, Z., Ding, S. & Sun, J. (2021). Problem-specific multi-objective invasive weed optimization algorithm for reconnaissance mission scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107345.
- Chen, R., Liang, C., Gu, D. & Zhao, H. (2020). A competence-time-quality scheduling model of multi-skilled staff for IT project portfolio. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106183.

- Correia, I., Lourenço, L. L. & Saldanha-da-Gama, F. (2012). Project scheduling with flexible resources: formulation and inequalities. *OR spectrum*, 34(3), 635–663.
- Correia, I. & Saldanha-da-Gama, F. (2014). The impact of fixed and variable costs in a multi-skill project scheduling problem: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 230–238.
- Dai, H., Cheng, W. & Guo, P. (2018). An improved Tabu search for multi-skill resource-constrained project scheduling problems under step-deterioration. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(6), 3279–3290.
- De Bruecker, P., Van den Bergh, J., Beliën, J. & Demeulemeester, E. (2015). Workforce planning incorporating skills: State of the art. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 1–16.
- Ertem, M., As' ad, R., Awad, M. & Al-Bar, A. (2022). Workers-constrained shutdown maintenance scheduling with skills flexibility: Models and solution algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108575.
- Felberbauer, T., Gutjahr, W. J. & Doerner, K. F. (2019). Stochastic project management: multiple projects with multi-skilled human resources. *Journal of Scheduling*, 22, 271–288.
- Firat, M. & Hurkens, C. A. (2012). An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 15(3), 363–380.
- Ghamginzadeh, A., Najafi, A. A. & Khalilzadeh, M. (2021). Multi-objective multi-skill resource-constrained project scheduling problem under time uncertainty. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(2), 518–534.
- Habibi, F., Barzinpour, F. & Sadjadi, S. (2018). Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. *Journal of project management*, 3(2), 55–88.
- Hartman, S. & Briskorn, D. (2011). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem Cc: 000. *Operations Research Management Science*, 51(1), 67.
- Hartmann, S. & Briskorn, D. (2022). An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of operational research*, 297(1), 1–14.

- Heimerl, C. & Kolisch, R. (2010). Scheduling and staffing multiple projects with a multi-skilled workforce. *OR spectrum*, 32(2), 343–368.
- Hosseinian, A. H. & Baradaran, V. (2020). P-GWO and MOFA: two new algorithms for the MSRCPSP with the deterioration effect and financial constraints (case study of a gas treating company). *Applied Intelligence*, 50(7), 2151–2176.
- Hosseinian, A. H. & Baradaran, V. (2021). A multi-objective multi-agent optimization algorithm for the multi-skill resource-constrained project scheduling problem with transfer times. *RAIRO-Operations Research*, 55(4), 2093–2128.
- Hosseinian, A. H., Baradaran, V. & Bashiri, M. (2019). Modeling of the time-dependent multi-skilled RCPSP considering learning effect: An evolutionary solution approach. *Journal of Modelling in Management*, 14(2), 521–558.
- Joshi, D., Mittal, M., Sharma, M. K. & Kumar, M. (2019). An effective teaching-learning-based optimization algorithm for the multi-skill resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Modelling in Management*.
- Kolisch, R. & Padman, R. (2001). An integrated survey of deterministic project scheduling. *Omega*, 29(3), 249–272.
- Li, H. & Womer, K. (2009). Scheduling projects with multi-skilled personnel by a hybrid MILP/CP benders decomposition algorithm. *Journal of Scheduling*, 12, 281–298.
- Li, Y.-Y., Lin, J. & Wang, Z.-J. (2022). Multi-skill resource constrained project scheduling using a multi-objective discrete Jaya algorithm. *Applied Intelligence*, 52(5), 5718–5738.
- Lin, J., Zhu, L. & Gao, K. (2020). A genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 140, 112915.
- Małachowski, B. & Korytkowski, P. (2016). Competence-based performance model of multi-skilled workers. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 165–177.
- Myszkowski, P. B. & Laszczyk, M. (2021). Diversity based selection for many-objective evolutionary optimisation problems with constraints. *Information Sciences*, 546, 665–700.
- Myszkowski, P. B., Olech, Ł. P., Laszczyk, M. & Skowroński, M. E. (2018). Hybrid differential evolution and greedy algorithm (DEGR) for solving multi-skill

- resource-constrained project scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 62, 1–14.
- Myszkowski, P. B., Skowroński, M. E., Olech, Ł. P. & Oślizło, K. (2015). Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem. *Soft Computing*, 19(12), 3599–3619.
- Néron, E. (2002). Lower bounds for the multi-skill project scheduling problem. *Proceeding of the eighth international workshop on project management and scheduling*, 274–277.
- Reid, K. N., Li, J., Veerapen, N., Swan, J., McCormick, A., Kern, M. & Owusu, G. (2018). Shift Scheduling and Employee Rostering: An Evolutionary Ruin & Stochastic Recreate Solution. *2018 10th Computer Science and Electronic Engineering (CEECE)*, 19–23.
- Słowiński, 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.
- Snauwaert, J. & Vanhoucke, M. (2021). A new algorithm for resource-constrained project scheduling with breadth and depth of skills. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 43–59.
- Tavares, L. V. (2002). A review of the contribution of operational research to project management. *European Journal of Operational Research*, 136(1), 1–18.
- Tian, Y., Xiong, T., Liu, Z., Mei, Y. & Wan, L. (2022). Multi-Objective multi-skill resource-constrained project scheduling problem with skill switches: Model and evolutionary approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 167, 107897.
- Vanhoucke, M. (2018). Planning projects with scarce resources: Yesterday, today and tomorrow’s research challenges. *Frontiers of Engineering Management*, 5(2), 133–149.
- Wang, L. & Zheng, X.-l. (2018). A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 54–63.
- Wang, M., Liu, G. & Lin, X. (2022). Dynamic Optimization of the Multi-Skilled Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Uncertainty in Resource Availability. *Mathematics*, 10(17), 3070.

- Xie, F., Li, H. & Xu, Z. (2021). An approximate dynamic programming approach to project scheduling with uncertain resource availabilities. *Applied Mathematical Modelling*, 97, 226–243.
- Zheng, H.-y., Wang, L. & Zheng, X.-l. (2017). Teaching–learning-based optimization algorithm for multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Soft Computing*, 21(6), 1537–1548.
- Zhu, L., Lin, J., Li, Y.-Y. & Wang, Z.-J. (2021). A decomposition-based multi-objective genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Knowledge-Based Systems*, 225, 107099.
- Zhu, L., Lin, J. & Wang, Z.-J. (2019). A discrete oppositional multi-verse optimization algorithm for multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 85, 105805.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 10/07/2023

Tez Başlığı : Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklar ile Proje Planlaması ve Harcama Takvimi Oluşturulması: Bir Karar Destek Modeli

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 10/07/2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda işaretlenmiş filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5 'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç
- Kaynakça hariç
- Alıntılar hariç
- Alıntılar dâhil
- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Öykü PASİNLİ

Öğrenci No: N20134007

Anabilim Dalı: İşletme

Programı: İş Analitiği

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Mustafa ÇİMEN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI ETİK KOMİSYON MUAFİYETİ FORMU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 10/07/2023

Tez Başlığı: Çoklu Yeteneğe Sahip ve Kısıtlı Kaynaklar ile Proje Planlaması ve Harcama Takvimi Oluşturulması: Bir Karar Destek Modeli

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmam:

1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır,
2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir.
3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir.
4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, mülakat, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir.

Hacettepe Üniversitesi Etik Kurullar ve Komisyonlarının Yönergelerini inceledim ve bunlara göre tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kurul/Komisyon'dan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Öykü PASİNLİ
Öğrenci No: N20134007
Anabilim Dalı: İşletme
Programı: İş Analitiği
Statüsü: Yüksek Lisans Doktora Bütünleşik Doktora

DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI

Doç. Dr. Mustafa ÇİMEN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

Detaylı Bilgi: <http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr>
Telefon: 0-312-2976860 Faks: 0-3122992147 E-posta: sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr