

**İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) YAPIMININ PROJE  
DEĞERLENDİRME VE GÖZDEN GEÇİRME TEKNİĞİ (PERT)  
İLE PLANLANMASI**

**Fahrettin KIZIL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İşletme Ana Bilim Dalı Sayısal Yöntemler Bilim Dalı**

**Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Mahmut ATLAS**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Sosyal Bilimler Enstitüsü**

**Ocak 2020**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Fahrettin KIZIL'ın "İnsansız Hava Aracı (İHA) Yapımının Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) ile Planlanması" başlıklı tezi **13 Ocak 2020** tarihinde, aşığıdaki jüri tarafından Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca toplanan **İşletme Anabilim Dalı Sayısal Yöntemler Bilim Dalında**, yüksek lisans tezi olarak değerlendirilerek kabul edilmiştir.

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : **Dr.Öğr.Üy. Mahmut ATLAS**

Üye :**Prof. Dr. Gülnur KECEK**

Üye :**Doç. Dr. Ali ÖZDEMİR**

**Prof. Dr. Bülent GÜNŞOY**  
**Anadolu Üniversitesi**  
**Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal**  
**Bilimler Enstitüsü Müdürü**

## ÖZET

### İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) YAPIMININ PROJE DEĞERLENDİRME VE GÖZDEN GEÇİRME TEKNİĞİ (PERT) İLE PLANLANMASI

Fahrettin KIZIL

İşletme Anabilim Dalı

Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Ocak 2020

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Mahmut ATLAS,

Bu araştırmada son zamanlarda ülkemizde ve dünyada askeri ve sivil alanda kullanımı ve önemi hızla artan İnsansız Hava Araçları (İHA) uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bu yönüyle bugüne kadar yapılmış olan çalışmalardan ayrılmaktadır.

Araştırmada şebeke analizi tekniklerinden olan Kritik Yol Tekniği (CPM-Critical Path Method) ve Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT-Program Evaluation and Review Technique) teknikleri ile Hedef Programlama (HP) teknikleri açıklanmıştır. İlk olarak 22 faaliyetten oluşan bir mini insansız hava aracı (İHA) yapım süreci PERT tekniği ile planlanarak zaman ve maliyet analizi yapılmış, sonrasında problem hedef programlama tekniği ile yeniden çözülerek her iki teknikle bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın birinci bölümünde, şebeke analizi ile ilgili genel olarak bilgi verilmiş ve şebeke analizi kavramları açıklanmıştır. İkinci bölümünde, şebeke analiz teknikleri ile bu araştırmanın konusu olan CPM ve PERT teknikleri detaylı olarak açıklanmış, ayrıca PERT tekniği uygulamalarına dair alanyazın araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, hedef programlama tekniği hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde ise elde edilen veriler çerçevesinde mini İHA yapım sürecinin PERT tekniği ile planlanması yapılmış, hızlandırılabilir faaliyet süreleri belirlenerek projeye hızlandırma işlemi uygulanmış ve hızlandırma sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonrasında problem hedef programlama tekniği ile yeniden çözülmüş ve sonuçlar PERT tekniği ile bulunan sonuç-

larla karşılaştırılmıştır. Araştırmada PERT analizi ve hedef programlama çözümleri için WINQSB paket programı kullanılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** PERT, Kritik yol tekniği (CPM), Hedef programlama, şebeke analizi

## **ABSTRACT**

### **PLANNING OF UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) WITH PROGRAM EVALUATION AND REVIEW TECHNIQUE (PERT)**

Fahrettin KIZIL

Department of Business Administration

Numerical Methods

Anadolu University, Graduate School of Social Sciences, January 2020

Advisor: Asst. Prof.Dr. Mahmut ATLAS

In this research, recently, unmanned aerial vehicles (UAVs) have been chosen in our country and in the world, both in military and civil fields, and their importance has been rapidly increasing. With this aspect, it differs from the work done to date.

In the research, the Critical Path Technique (CPM), which is one of the network analysis techniques, and the Program Evaluation and Review Technique (PERT-Program Evaluation and Review Technique) techniques, and Goal Programming (GP) techniques are explained. First, a mini unmanned aerial vehicle (UAV) construction process consisting of 22 activities was planned with PERT technique, time and cost analysis were made, then the problem was solved again with the goal programming technique and compared with the results found with both techniques.

In the first part of the research, general information about network analysis is given and network analysis concepts are explained. In the second part, network analysis techniques and CPM and PERT techniques, which are the subject of this research, are explained in detail, and a literature research on PERT technique applications is included. In the third part, information about the goal programming technique is given. Within the framework of the data obtained in the fourth section, the planning of the mini-UAV was made by PERT technique, and the acceleration process was applied to the project by determining the activity times that could be accelerated and the acceleration results were compared. Afterwards, the problem was solved again with the goal programming technique and the results were compared with the results found with the PERT tech-

nique. In the research, WINQSB package program was used for PERT analysis and goal programming solutions.

**Keywords:** PERT, Critical path method (CPM), Goal programming, Network analysis

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamda bana cesaret veren, ders içinde ve dıőında yardımını ve desteğini esirgemeyen, hocadan daha çok arkadaő gibi yaklaőımıyla motivasyonumu artıran baőta çok değerli hocam **Dr.Öğr.Üyesi Mahmut ATLAS**'a,

Kıymetli vakitlerini ayırarak tezime katkı sağlayan ve tez savunmama katılan jürideki değerli hocalarım **Prof.Dr.Gülnur KEÇEK** ve **Doç.Dr.Ali ÖZDEMİR**'e,

Çalışma verilerinin toplanmasında yardımcı olan, mini İHA proje ekibinde yer alan doktora öğrencisi sevgili dostum **Halil SAğLAMLAR**'a,

Yüksek lisans dersini aldığım hocalarım ile ders arkadaşlarıma,

Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü yönetimine, öğrenci işlerine ve emeği geçen çalıőanlarına,

Tez alıőma süresince bana gösterdikleri sabırlarından dolayı eőim **Arife**, kızlarım **Rana Cemre** ve **Berna**'ya ve benim üzerimde emeği olan büyüklerime teşekkürü bir borç bilirim.

3.1. Ocak 2020

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Fahrettin KIZIL

31.. Ocak 2020

## **STATEMENT OF COMPLIANCE WITH ETHICAL PRINCIPLES AND RULES**

I hereby truthfully declare that this thesis is an original work prepared by me; that I have behaved in accordance with the scientific ethical principles and rules throughout the stages of preparation, data collection, analysis and presentation of my work; that I have cited the sources of all the data and information that could be obtained within the scope of this study, and included these sources in the references section; and that this study has been scanned for plagiarism with “scientific plagiarism detection program” used by Anadolu University, and that “it does not have any plagiarism” whatsoever. I also declare that, if a case contrary to my declaration is detected in my work at any time, I hereby express my consent to all the ethical and legal consequences that are involved.

Fahrettin KIZIL

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
GÖRSELLER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. ŞEBEKE ANALİZİ .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Şebeke Analizi ile İlgili Kavramlar .....	4
1.3. Şebeke Analizinde Faaliyetlerin ve Olayların Zaman Tespiti.....	10
1.4. Hızlandırma (Crashing) Süreleri ve Maliyet Analizi .....	13
2. ŞEBEKE ANALİZİ TEKNİKLERİ .....	18
2.1. Giriş.....	18
2.2. Kritik Yol Tekniği (CPM).....	19
2.3. Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) .....	20
2.3.1. PERT’de kullanılan faaliyet süreleri .....	23
2.3.2. Beta dağılımı.....	24
2.4. CPM ve PERT Tekniklerinin Karşılaştırılması .....	26
2.5. Alanyazın Araştırması (CPM / PERT ile Proje Planlama) .....	27
3. HEDEF PROGRAMLAMA .....	32
3.1. Giriş.....	32

3.2. Hedef Programlama Türleri.....	34
3.3. Alanyazın Araştırması (Hedef Programlama ile Proje Planlama) .....	36
4. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) YAPIMININ PERT VE HEDEF PROGRAMLAMA İLE PLANLANMASI .....	39
4.1. Uygulama Alanının Tanıtımı.....	39
4.2. İnsansız Hava Aracı (İHA) Yapımının PERT ile Planlanması .....	40
4.2.1. Verilerin toplanması ve şebeke diyagramının oluşturulması .....	41
4.2.2. İHA yapımının PERT ile analizi .....	44
4.2.3. Hızlandırma ve hızlandırma maliyeti hesabı .....	47
4.3. Problemin Hedef Programlama ile Çözümü.....	52
4.3.1. Normal faaliyet süreleri kullanılarak çözüm .....	54
4.3.2. Hızlandırılmış faaliyet süreleri kullanılarak çözüm.....	57
5. SONUÇ .....	60
KAYNAKÇA.....	62
EKLER .....	67
ÖZGEÇMİŞ	

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 4.1</b> Faaliyetler ve Faaliyetlerin Öncelik İlişkileri .....	41
<b>Tablo 4.2.</b> Faaliyetlerin Üç Tahmini Süreleri .....	43
<b>Tablo 4.3.</b> Üçlü Tahmini Süreler ve Hesaplanan Ortalama Süreler.....	44
<b>Tablo 4.4.</b> Kritik Faaliyetler.....	46
<b>Tablo 4.5.</b> Faaliyetlerde Kullanılan İşgücü ve Tahmini Maliyetleri .....	48
<b>Tablo 4.6.</b> Hızlandırılabilir Süreler ve Maliyetleri.....	49
<b>Tablo 4.7.</b> Hızlandırma İşlemi Yapılabilir Faaliyetlerin Hızlandırma Sıralaması ....	50
<b>Tablo 4.8.</b> Hızlandırma Sonrasındaki Yeni Proje Süreleri ve Maliyetleri .....	52
<b>Tablo 4.9.</b> Faaliyet Karar Değişkeni Dönüşümü Tablosu.....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. AOA ve AON Diyagramları Gösterimi.....	5
Şekil 1.2. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-1 .....	7
Şekil 1.3. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-2 .....	8
Şekil 1.4. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-3 .....	8
Şekil 1.5. Üç Faaliyet Arasındaki İlişkiye Örnek (Hatalı Gösterim).....	9
Şekil 1.6. Üç Faaliyet Arasındaki İlişkinin Kukla Faaliyet İle Doğru Gösterimi .....	9
Şekil 1.7. Dört Faaliyet Arasındaki İlişkiye Örnek (Hatalı Gösterim).....	9
Şekil 1.8. Dört Faaliyet Arasındaki İlişkinin Kukla Faaliyet İle Doğru Gösterimi.....	10
Şekil 1.9. Doğrusal Zaman - Maliyet Eğrisi .....	16
Şekil 1.10. Projenin Optimal Tamamlanma Süresi .....	17
Şekil 2.1. CPM ve PERT Tekniklerinin Aşamaları.....	18
Şekil 2.2. Basit Bir PERT Diyagramı.....	21
Şekil 2.3. PERT Diyagramı Geliştirme ve Yineleme Sürecinin Akış Diyagramı .....	23
Şekil 2.4. Beta Dağılım Eğrisi .....	25
Şekil 4.1. Faaliyetlerin Öncelik İlişkilerinin Şebeke Diyagramında Gösterimi .....	42
Şekil 4.2. Faaliyet ve Ortalama Sürelerin Şebeke Diyagramında Gösterimi .....	45
Şekil 4.3. Kritik Yolun Şebeke Diyagramı Üzerinde Gösterimi .....	47

## GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Görsel 4.1.</b> Sınıflarına Göre İHA Çeşitleri.....	39
<b>Görsel 4.2.</b> Yapım Aşaması Tamamlanmış İHA .....	40

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: En iyimser süre
AOA	: Bağlantı şeması (Activity on Arc)
AON	: Blok şeması (Activity on Node)
b	: En kötümser süre
CPM	: Kritik yol tekniği (Critical Path Method)
D	: Faaliyet süresi
EB	: Bir faaliyetin başlayabileceği en erken zaman
ET	: Bir faaliyetin tamamlanabileceği en erken zaman
GB	: Bir faaliyetin başlayabileceği en geç zaman
GT	: Bir faaliyetin tamamlanabileceği en geç zaman
$\sigma^2$	: Projenin varyansı
İHA	: İnsansız hava aracı
m	: En yüksek olasılıklı süre
PERT	: Program Evaluation and Review Technique
R.H.S.	: Right Hand Side
S	: Standart sapma
$S^2$	: Faaliyet süresinin varyansı
WINQSB	: Analizde kullanılan paket program
$\bar{x}$	: Ortalama süre
$\mu$	: Kritik yoldaki ortalama sürelerin toplamı

# 1. ŞEBEKE ANALİZİ

## 1.1. Giriş

Üretim endüstrisi; anlaşılması, düşünülmesi, planlaması kolay olmayan gittikçe daha karmaşık yapıları bir sisteme dönüşmektedir (Karayağın, 1986, s. 201). Günümüz yönetim anlayışı, rekabet gücü yüksek endüstrilerin karakteristik özellikleri olan karmaşıklıklarla, veri yığınlarıyla ve teslim tarihleriyle başa çıkabilmek için sürekli olarak yeni ve daha iyi planlama ve kontrol teknikleri arayışındadır. Bu amaçla kullanılan teknikler şunlardır (Kerzner, 2009, s. 493):

- Gantt veya çubuk grafikler (Gantt or bar charts),
- Kilometre taşı çizelgeleri (Milestone charts),
- Denge çizgisi (Line of balance),
- Şebekeler (Networks),
- Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (Program Evaluation and Review Technique-PERT),
- Kritik Yol Tekniği (Critical Path Method-CPM, Ok diyagramı olarak da adlandırılır),
- Öncelik Şeması Tekniği (Precedence Diagram Method-PDM),
- Grafikselleştirme ve Gözden Geçirme Tekniği (Graphical Evaluation and Review Technique-GERT).

Çok sayıda faaliyetten oluşan projelerin çözümü ve kritik yolun bulunmasında doğrusal programlama kullanmak etkin olmadığı için şebeke analizi kullanılmaktadır (Cinemre, 2011, s. 203). Bu araştırmada, şebeke analizi, PERT ve CPM teknikleri incelenerek açıklanmaya çalışılacaktır.

Şebeke, olaylar ve faaliyetlerden oluşan bir programın, projenin ya da problemin olay ve faaliyetlerinin birbirleriyle olan bağlantı ve ilişkilerini ok şeklinde çizilen şekiller veya diyagramlar yardımıyla gösteren şemalardır (Öztürk, 2009, s. 525). Analiz, araştırma problemlerini çözmek amacıyla verilerin; sıralanması, sınıflandırılması, matematiksel ve istatistiksel işlemler yapılması ve sonucunda özetlenmesi olarak tanımlanabilir (Atlas, 2003, s. 39). Şebeke analizi ise, bir projenin en kısa sürede ve en az maliyetle gerçekleştirilmesi için yapılması gereken faaliyetler ve olayların sıra ve mantık ilişkilerini gösteren bir proje programlama tekniğidir (Barutçugil, 2008, s. 174). Bir

projenin planlama, programlama ve kontrol aşamaları aşağıda açıklanmıştır (Gaither, 1980, 297).

**a. Planlama aşaması:** Proje yönetiminin en önemli aşaması olan planlama aşaması, projeyi çeşitli ana ve alt faaliyetlere bölmekle başlar. Daha sonra faaliyetlerin süreleri tahmin edilerek projenin faaliyetleri arasındaki mantıksal ilişkileri gösteren iş akış şeması çizilir. Çizilen bu iş akış seması farklı faaliyetlerin ilişkilerinin rahatlıkla görülebilmesini ve bu sayede proje uygulamaya konulmadan önce gereken düzeltme ve geliştirmelerin yapılmasına yardımcı olur. Planlama aşaması, proje programının geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

**b. Programlama aşaması:** Bu aşamada, her bir faaliyet için başlama ve tamamlanma zamanını gösteren bir zaman diyagramı hazırlanır. Bu diyagram projedeki faaliyetlerin birbiriyle olan ilişkisini gösterir. Program kritik faaliyetleri göstermesinin yanı sıra, kritik olmayan faaliyetlerin bolluk süresini de göstermelidir.

**c. Kontrol aşaması:** Bu aşamada, iş akış ve zaman diyagramı kullanılarak düzenli aralıklarla proje ilerleme raporları hazırlanır. Kontrol aşamasında proje analiz edilir, projede gereken güncelleştirmeler yapılır ve gerekirse projenin geri kalan kısmına yönelik karar seçenekleri belirlenir.

Projeleri, şebeke diyagramı ile göstermek modelin sistematik bir şekilde ortaya konmasını sağlar ve projenin; planlaması, izlenmesi ve kontrolünü kolaylaştırır. Şebeke analizi ile;

- Projenin gerçekleşmesi için yapılacak faaliyetlerin birbirleriyle olan ilişkileri gösterilir,
- Projenin beklenen tamamlanma süresi belirlenir,
- Kritik ve kritik olmayan faaliyetler ortaya çıkarılır, kritik olmayan faaliyetlerin ne ölçüde ertelenebileceği ve kaynakların başka hangi faaliyetlere kaydırılabileceği belirlenir,
- Görevlerin kolay koordine edilmesiyle kaynak/zaman çakışmasının önüne geçilebilir,
- İşlemler oldukça basit olduğundan bilgisayarda kolaylıkla planlanabilir (Cinemre, 2011, s. 193).

- Zaman içerisinde farklı noktalarda ve alternatif programlarda nakit ihtiyacı şebeke yardımıyla incelenebileceğinden, projenin finansal planlamasına da yardımcı olur.
- Dinamik bir yapıda olduğundan, projedeki değişiklikler bu diyagrama kolaylıkla yansıtılabilir.
- Projenin hazırlanmasında, değerlendirilmesinde ve yürütülmesinde yöneticilere yardımcı olacak bilgileri sağlar (Barutçugil, 2008, s. 178).

Bunlara ek olarak, CPM ve PERT tekniklerine de temel teşkil eden şebeke analizi ile;

- Projeye ilgili bilgiler bir bütün olarak proje yöneticisine sunulabilir,
- Sadece basit faaliyetlerin değil, çok daha karmaşık projelerin yönetimi yapılabilir,
- Proje, çeşitli faaliyetler olarak değil de bir bütün içinde çeşitli aşamalar olarak ele alınabilir,
- Genel zaman değeri yerine, şebekenin her faaliyeti için ayrı ayrı belirlenmiş olan zaman değerlerinin kullanılmasıyla, projenin yönetilebilirliği artırılır (Kerzner, 2009, s. 450; Punmia ve Khandelwal, 2002, s. 27).

Temelde çoğu aynı yaklaşıma sahip olan şebeke analizi tekniklerinin uygulanmasında aşağıda belirtilen dört aşamalı bir süreç takip edilir. Bunlar;

1. Aşama: Projedeki her bir faaliyetin mantıksal bir şebeke diyagramı üzerindeki yerinin belirlenmesi.
2. Aşama: Kritik olan faaliyetlerin belirlenmesi.
3. Aşama: İşgücü, makine, malzeme v.b. kaynakların maliyetler ve süre açısından en uygun şekilde planlanması.
4. Aşama: Projedeki gelişmelerin takip edilerek, belirlenen amaçlara ulaşmak için gerekiyorsa kaynak dağılımının yeniden yapılmasıdır.

Şebeke analizinde (özellikle de karmaşık projelerde), tüm faaliyetler birbirinden bağımsız olarak ele alınır. Her faaliyet başlamadan önce hangi faaliyetin tamamlanmış olması gerektiği, ilgili faaliyet tamamlandığında hangi faaliyetlere hemen başlanabileceği ve faaliyet devam ederken hangi faaliyetlerin paralel/eş zamanlı olarak yürütülebileceği belirlenir. Buradan hareketle, faaliyetler arasındaki ilişkileri gösteren bir diyagram hazırlanır (Barutçugil, 2008, s. 175).

Şebeke analizinin uygulama alanlarına bakılacak olursa (Taha, 2000, s. 211);

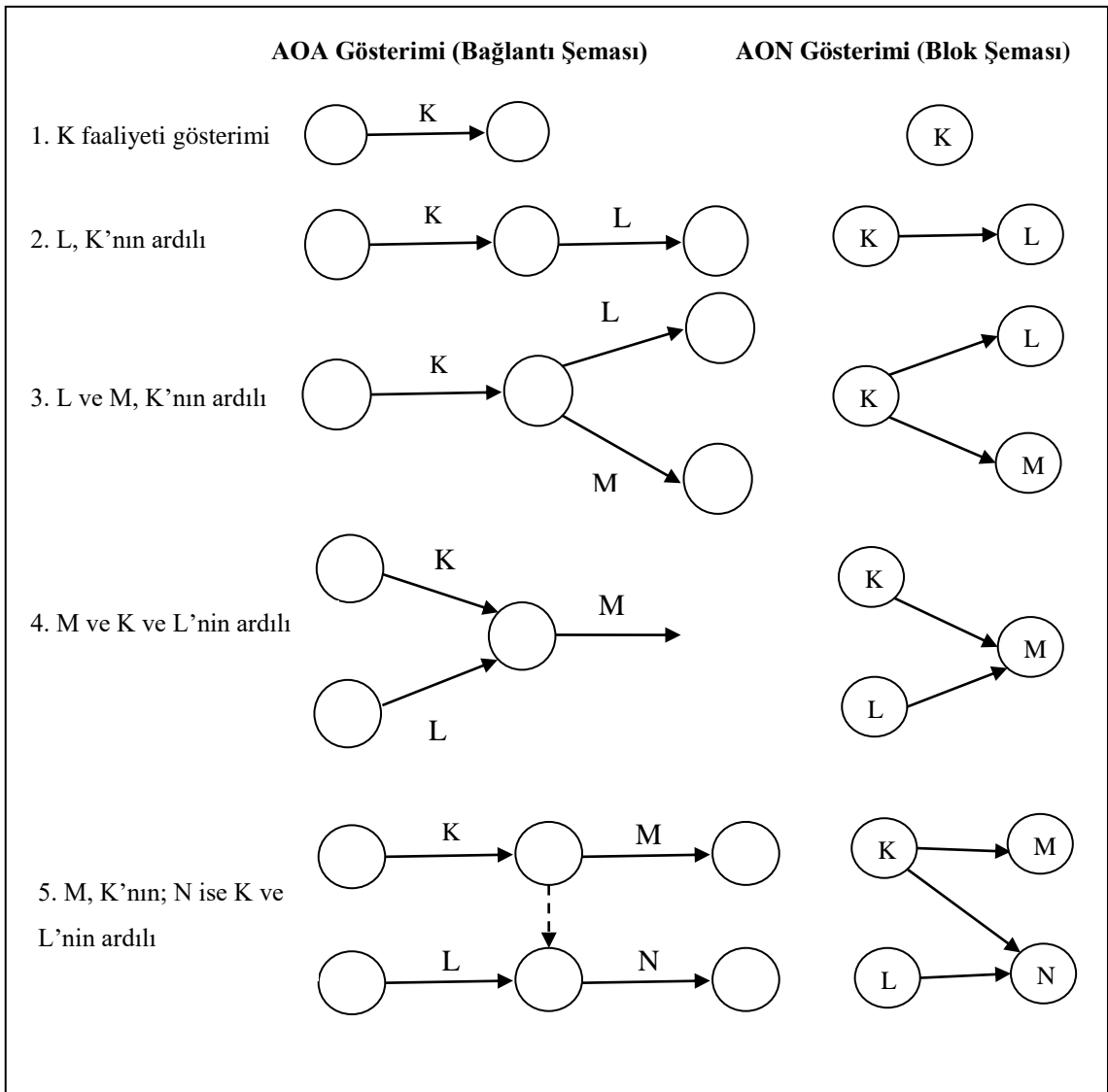
- Petrol ve doğalgaz üretim noktalarını teslim noktalarına bağlayan doğalgaz boru hattı projesinin, yapım maliyetleri minimum olacak şekilde tasarımı (Minimum kapsayan ağaç algoritması),
- Varolan yol şebekesinde iki şehir arasındaki en kısa rotanın belirlenmesi (En kısa yol algoritması),
- Kömür madenini enerji santraline bağlayan, kömürü su içerisinde taşıyarak nakleden boru hattı ağının, maksimum kapasitesinin belirlenmesi (Maksimum akış algoritması),
- Petrol yataklarından rafinerilere boru hattıyla bağlanmış şebeke için minimum maliyet akış çizelgesinin belirlenmesi (Minimum maliyet kapasiteli şebeke algoritması),
- İnşaat projesindeki faaliyetler için, başlangıç ve tamamlanma tarihlerini gösteren zaman çizelgesinin belirlenmesi (Kritik yol algoritması).

Araştırmalar, şebeke analizi ile planlanan projelerin tamamlanma süresinin en az %10 kısaldığını, kaynak kullanımındaki faydanın ise en az %5 artabileceğini göstermektedir (Cinemre, 2011, s. 193). Bu nedenle ilk başlarda elektrik mühendisliği alanında uzun bir süre önemli ölçüde kullanılmış olan şebeke analizi; genellikle büyük ölçekli projelerin planlanması, en kısa yolun bulunması, pazarlanacak yeni ürünün programlanması, maksimum akışın bulunması, büyük çaplı ihale veya organizasyonların planlanması vb. alanlarda günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztürk, 2009, s. 525). Şebeke analizinin bu kullanım alanlarına ek olarak; bilgisayar bilimleri, siber, iletişim ve ulaşım sistemleri, AR-GE projelerinin planlanması ve kontrolü, üretim çizelgeleme, sosyal grup yapıları, kimyasal bağlar, dil yapıları vb. alanlardaki kullanımları da sayılabilir (Hillier ve Lieberman, 2001, 405).

Şebeke diyagramı çizilerek uygulanan şebeke analiz tekniğinin hedeflenen başarıya ulaşabilmesi, tekniğin doğru kullanılmasına bağlıdır. Şebeke çizimi sırasında yapılacak en ufak bir hata tüm projeyi olumsuz şekilde etkileyecektir. Bu nedenle şebeke kurulumu için gerekli olan; faaliyetler, faaliyet öncelikleri, süreleri vb. gibi bilgiler çok tecrübeli ve bilgili kişiler tarafından belirlenmelidir. Gerçekleştirilmesi planlanan tüm faaliyetlerin süreleri, maliyetleri ve eğer hızlandırma mümkün ise her bir faaliyetin birim hızlandırma maliyetlerinin bilinmesi gerekmektedir (Kargül, 1996, s. 211).

## 1.2. Şebeke Analizi ile İlgili Kavramlar

Modern bir yönetim aracı olan şebeke diyagramları, proje süresince gerçekleştirilecek faaliyetlerin belirlenmesini, belirlenen faaliyetler arasındaki mantıksal ilişkilerin kurulmasını ve bu ilişkilerin bir diyagram üzerinde gösterilmesini içermektedir (Barutçugil, 2008, s. 180). Şebeke diyagramları; temel olarak olay (düğüm) ve faaliyetlerden oluşur ve iki tür gösterim şekli vardır. Bunlar, bağlantı şemaları (Activity on Arc – AOA) ve blok şemalarıdır (Activity on Node – AON). Bağlantı şemaları ve blok şemalarının özellikleri Şekil 1.1’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Sharma, 2016, s. 422; Taylor, 2007, s. 330).



Şekil 1.1. AOA ve AON Diyagramları Gösterimi

**Bağlantı şemaları (Activity on Arc – AOA):** Bağlantılar faaliyetleri, olaylar (düğümler) faaliyetlerin başlama ve bitişini gösterir.

**Blok şemaları (Activity on Node – AON):** Noktalar / daireler faaliyetleri, bağlantılar faaliyetler arasındaki öncelik ilişkilerini gösterir.

PERT ve CPM tekniklerinde bu gösterimlerden bağlantı şemaları (AOA) gösterimi kullanılmaktadır. Bu gösterimi kullanmanın avantajları şunlardır (Hillier ve Lieberman, 2001, s. 471; Sharma, 2016, s. 422):

1. Birçok bilgisayar programı AOA şebeke ağlarına uyumludur ve AOA şebeke ağlarının oluşturulması, AON şebeke ağlarının oluşturmaktan daha kolaydır.
2. AOA şebeke ağlarının anlaşılması, birçok yönetici dâhil deneyimsiz kullanıcılar için AON şebeke ağlarının anlaşılmasından daha kolaydır.
3. Projede güncelleme olduğunda AOA şebeke ağlarında değişiklik yapmak, AON proje ağlarında değişiklik yapmaktan daha kolaydır.

Bahsedilen bu avantajlardan dolayı da bu araştırmada bağlantı şemaları (AOA) gösterimi kullanılmıştır.

Şebeke düğümleri (olaylar) ile projenin farklı faaliyetleri arasında öncelik ilişkisi kurulur. Şebeke diyagramı oluşturulurken dikkat edilmesi gereken üç temel kural vardır (Taha, 2000, s. 259):

1. Kural: Şebeke içindeki her faaliyet yalnızca bir ok ile gösterilir. Ancak bir faaliyetin kısımlara ayrılması halinde her bir kısım ayrı bir ok ile gösterilmelidir.
2. Kural: Herhangi iki faaliyet aynı baş ve kuyruk olayları ile tanımlanamaz. Böyle bir durumda kukla faaliyetler kullanılmalıdır.
3. Kural: Şebeke diyagramına yeni bir faaliyet ekleneceği zaman, öncelik ilişkilerinin doğruluğundan emin olmak aşağıdaki sorular cevaplandırılmalıdır:

- Eklenecek yeni faaliyetin başlaması için yeni faaliyetten hemen önce hangi faaliyetlerin tamamlanması zorunludur?
- Bu faaliyetten hemen sonra hangi faaliyet / faaliyetler gelmelidir?
- Eklenen yeni faaliyetle eşzamanlı olarak planlanan faaliyetler hangileridir?

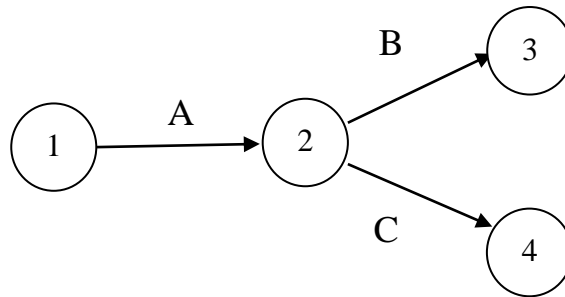
Şebeke diyagramında kullanılan oklar zaman ölçekli olmadığından uzunluk ya da kısıklıklarının bir önemi yoktur. Birbirini izleyen oklar, birbirine bağlı faaliyetleri ifade eder ve bu okların tamamı mantıksal olarak projenin akışını tanımlar. Şebeke diyagramı,

tüm faaliyetlerin mantıksal bir sıraya dizilmesi ile çizilir. Buna göre; hiçbir faaliyet kendinden öncekiler tamamlanmadan başlatılamaz. Aynı yol üzerindeki faaliyetler, birbirini izler ve birbirlerine bağımlıdır, ancak paralel faaliyetler farklı yollar üzerindedirler ve aralarında bağımlılık yoktur. Alışıl gelmiş şebeke diyagramı çizimi, soldan sağa doğru akış şeklindedir. Olay numaraları, soldan başlayarak önceki olaylar sonrakilerden küçük numara alacak şekilde verilir (Barutçugil, 2008, s. 180). Şebeke diyagramında yalnızca bir ilk olay ve bir son olay olmalıdır. Diğer olaylar, 1, 2, ..., n tamsayısı ile ardışık olarak numaralandırılır. “i” ile başlayan ve “j” ile tamamlanan herhangi iki olay bir faaliyet ile birbirine bağlanır ve her iki olay arasında  $i < j$  bağıntısı vardır (Sharma, 2016, s. 428).

Şebeke analizinde kullanılan; olaylar (düğüm noktaları), faaliyetler ve kukla faaliyet kavramları aşağıda açıklanmıştır.

**a. Olaylar (Düğüm noktaları)**

Olay, bir faaliyetin tamamlanıp diğer bir faaliyetin başlamaya hazır olduğu zamandaki bir anı ifade eder. Şebeke analizinde oklar faaliyetleri, daire veya noktalar hem olayları göstermek için kullanılır hem de faaliyetlerin tamamlanmasını veya başlamasını belirtirler. Şebekede bir olay bir düğüme karşılık gelir (Taha, 2000, s. 266). Şekil 1.2’de rakamlarla gösterilen daireler olayları, harflerle gösterilen oklar ise faaliyetleri belirtmektedirler. Burada “B” ve “C” faaliyetlerinin “A” faaliyetinin tamamlanması sonrasında başlayabileceği gösterilmektedir (Öztürk, 2009, s. 540).



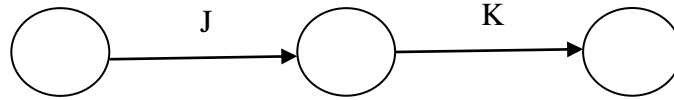
Şekil 1.2. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-1

**b. Faaliyetler**

Faaliyet, bir işin tamamlanmasında zaman ve kaynak harcanmasını gerektiren harekettir. Her faaliyetin bir süresi vardır. Bir faaliyetin başlayabilmesi kendisinden önce-

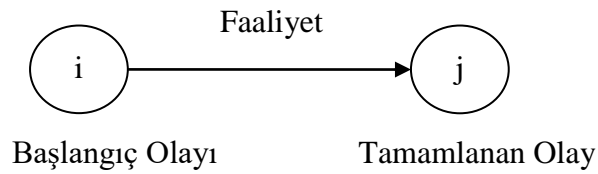
ki faaliyetlerin tamamlanması şartına bağlıdır. Projedeki faaliyetler oklarla gösterilir (Cinemre, 2011, s. 190).

Şekil 1.3’de “J” ve “K” faaliyeti gösterilmiş olup bu gösterim K faaliyetinin başlaması için “J” faaliyetinin tamamlanması gerektiğini belirtmektedir (Öztürk, 2009, s. 526; Taylor, 2007, s. 331).



Şekil 1.3. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-2

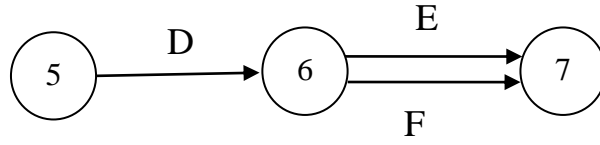
Şekil 1.4’deki gibi faaliyetler, başlangıç (kuyruk) ve tamamlanan (baş ya da terminal) olay numaraları ile gösterilir. Örneğin iki olay arasında yer alan ok (i, j) üzerinde gösterilen kuyruk olayı “i” faaliyetin başlangıcını, baş olayı “j” ise faaliyetin tamamlanmasını temsil eder (Cinemre, 2011, s. 190).



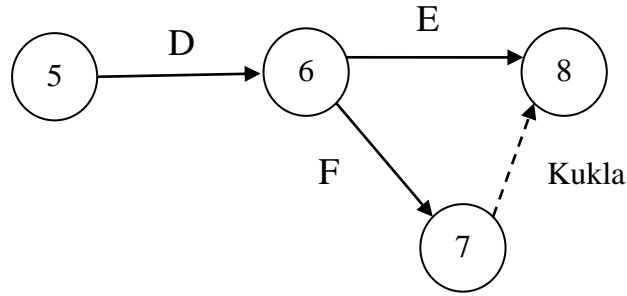
Şekil 1.4. Olay Faaliyet İlişkisine Örnek-3

### c. Kukla (Dummy) faaliyet

Faaliyet zamanı ve/veya kaynak gerektirmeyen iki veya daha fazla faaliyetin ilişkisini göstermek kullanılan faaliyete kukla faaliyet adı verilir. Ancak belirli bir süresi olmakla birlikte kaynak kullanımı gerektirmeyen faaliyetler de (Sulanan veya boyanan bir yerin kurumasının beklenmesi gibi) kukla faaliyet (sürelilik kukla) olarak değerlendirilir (Cinemre, 2011, s. 191). Şebeke diyagramı oluşturulurken kukla faaliyetlerin farklı şekillerde kullanımı söz konusudur. Örneğin, önce ve sonra gelen olayları aynı olan “E” ve “F” faaliyetlerinin şebeke gösterimi Şekil 1.5’deki gibidir.

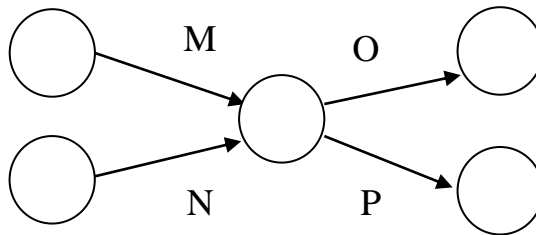


Ancak he **Şekil 1.5. Üç Faaliyet Arasındaki İlişkiye Örnek (Hatalı Gösterim)** den, bu gösterim şebeke çizim diyagramı kurallarına uymaz. Diğer bir ifade ile aynı iki olay dairesi ayrı ayrı iki faaliyeti bağlayamaz. Bu sorun, Şekil 1.6'daki gibi kukla faaliyet kullanılarak çözülür. 7 ile 8 olayları arasındaki faaliyet kukla faaliyettir ve faaliyetin süresi yoktur. Kukla faaliyetler, süresi kısa olan faaliyetten sonra gelir. Bunun nedeni, kukla faaliyetin kritik yol üzerinde bulunma olasılığını azaltmaktır (Öztürk, 2009, s. 540-541).



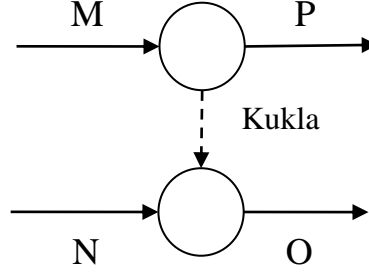
**Şekil 1.6. Üç Faaliyet Arasındaki İlişkinin Kukla Faaliyet İle Doğru Gösterimi**

Faaliyetlerin öncelik ilişkileri dikkate alınarak yani, "O" faaliyeti "M" ve "N" faaliyetlerinin bitimine bağlı fakat "P" faaliyeti yalnızca "M" faaliyetinin tamamlanmasına bağlı ise çizim Şekil 1.7'deki gibi olur. Ancak çizim incelendiğinde faaliyetlerin gösteriminin yanlış olduğu görülecektir. Çünkü sadece "M" faaliyetinin tamamlanmasına bağlı olan "P" faaliyeti, bu çizimde "M" ve "N" faaliyetlerinin tamamlanmasına bağlı gibi görünmektedir.



**Şekil 1.7. Dört Faaliyet Arasındaki İlişkiye Örnek (Hatalı Gösterim)**

Doğru çizim için Şekil 1.8'deki gibi kukla faaliyet kullanılır (Cinemre, 2011, s. 196; Taha, 2000, s. 260).



Şekil 1.8. Dört Faaliyet Arasındaki İlişkinin Kukla Faaliyet İle Doğru Gösterimi

Faaliyetler ayrıca aşağıdaki üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar (Sharma, 2016, s. 421);

**Önceki/Öncelikli faaliyet:** Bir veya daha fazla başka faaliyet başlamadan önce tamamlanması gereken bir faaliyet, önceki faaliyet olarak tanımlanır.

**Sonraki/Ardıl faaliyet:** Bir veya daha fazla faaliyetin tamamlanmasından hemen sonra başlayan faaliyet, sonraki faaliyet olarak tanımlanır.

**Kukla/Dummy faaliyet:** Herhangi bir kaynak ve/veya zaman tüketmeyen bir faaliyet, kukla faaliyet olarak ifade edilir. Kukla faaliyet, şebekede faaliyetlerin öncelik ilişkisini göstermeye yarar.

### 1.3. Şebeke Analizinde Faaliyetlerin ve Olayların Zaman Tespiti

Şebeke diyagramı oluşturulduktan sonra faaliyetlerin zaman tahminleri yapılır. Zaman tahminleri yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır (Erişken'den aktaran Sarıca, 2006, s. 35):

1. Zaman tahminleri en iyi kaynaktan temin edilmelidir (Geçmiş yıllarda gerçekleştirilmiş aynı veya benzer projelere ait veriler, faaliyeti gerçekleştirecek olan personel, tecrübeli kişiler vb.).

2. Projeyi oluşturan tüm faaliyetler birbirinden bağımsızdır. Bu nedenle her faaliyetin zaman tahminleri, faaliyetler tek tek ve birbirinden ayrı bir şekilde ele alınarak yapılmalıdır.

3. Her faaliyetin zaman tahmini, kaynakların (işçi, makine ve malzeme) aynı anda kullanılabilen miktarı öngörülerek yapılır. Örneğin, uçak kokpiti tamiri için 4 işçi var ve kokpitte aynı anda en fazla 2 işçi çalışabiliyorsa, işçi sayısı 2 olarak kabul edilmeli ve zaman tahmini buna göre yapılmalıdır. Uygulamada kullanılan miktarda belirsizlik olduğunda, normal değere yakın bir zaman tahmini kabul edilir ve programlama gerçekleştirildikten sonra düzeltmeler yapılabilir.

4. Bütün zaman tahminlerinin aynı zaman ölçü biriminde (saat, gün, hafta vs.) yapılması gereklidir.

PERT / CPM'in özelliklerinden tam anlamıyla faydalanmak için proje faaliyetlerine ilişkin olarak dört değer tanımlanması gerekir. Bunlar;

- Bir faaliyetin en erken başlama zamanı (EB),
- Bir faaliyetin en erken tamamlanma zamanı (ET),
- Bir faaliyetin en geç başlama zamanı (GB),
- Bir faaliyetin en geç tamamlanma zamanı (GT) (Kerzner, 2009, s. 504).

$D_{ij}$  faaliyet süresini göstermek üzere; EB, ET, GB ve GT değerleri ile şebekenin bolluk (boşluk) değerleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır

#### **a. En Erken Başlama (EB) Zamanı (Early Starting Time-ES)**

Bir faaliyetin en erken başlama zamanı, projede yer alan bir faaliyetin başlayabileceği en erken zamanıdır. Faaliyetlerin en erken başlama zamanları, kendisinden sonra gelen faaliyetlerin en erken başlama zamanlarından küçük veya bu zamanlara eşit olmak zorundadır (Kargül, 1996, s. 225). Süresi hesaplanmakta olan faaliyete birden fazla faaliyet bağlı olabilir. Bir faaliyetin başlayabilmesi için kendisinden önce yer alan tüm faaliyetlerin tamamlanmış olması gerektiğinden hareketle, her bir faaliyet için ayrı ayrı hesaplama yapılması ve sonucu en yüksek olan değer seçilmesi gerekir. Bu şekilde faaliyet zamanı en yüksek olan değerde ancak bütün faaliyetler tamamlanmış olmaktadır. Bir faaliyetin en erken başlama zamanı aşağıda yer alan denklem ile hesaplanır (Heizer ve Render, 2017; Monks, 1996, s. 358-359).

$$EB_j = \max ( EB_i + D_{ij} ) \quad (1.1)$$

#### **b. En Erken Tamamlama (ET) Zamanı (Early Finishing Time-EF)**

Bir faaliyetin en erken tamamlanma zamanı, en erken başlama zamanına faaliyet süresinin eklenmesiyle bulunmaktadır. Bir faaliyetin proje programını aksatmadan ta-

mamlanabileceği zamanı göstermektedir. Bir faaliyetin en erken tamamlanma zamanı şu şekilde hesaplanır (Heizer ve Render, 2017, s. 74; Ulucan, 2007, s. 289).

$$ET_{ij}=EB_i+ D_{ij} \quad (1.2)$$

**c. En Geç Başlama (GB) Zamanı (Late Starting Time-LS)**

Bir faaliyetin en geç başlama zamanı, bir faaliyetin tüm projeyi geciktirmeden başlayabileceği en geç zamandır. Her faaliyetin en geç tamamlanma süresinden bu faaliyetin tamamlanma süresinin çıkarılmasıyla bulunmaktadır. En geç başlama zamanı aşağıdaki denklemle hesaplanır (Monks, 1996, s. 358-359; Heizer ve Render, 2017, s. 73; Ulucan, 2007, s. 289).

$$GB_{ij}=GT_j- D_{ij} \quad (1.3)$$

**d. En Geç Tamamlama (GT) Zamanı (Late Finishing Time-LF)**

En geç tamamlanma zamanı, bir faaliyetin tüm projeyi geciktirmeden tamamlanabileceği en geç zamandır ve aşağıdaki denklemle hesaplanır (Monks, 1996, s. 358-359; Ulucan, 2007, s. 289).

$$GT_j = \max (GT_j - D_{ij}) \quad (1.4)$$

**e. Şebekenin Bolluk (boşluk) Değerleri**

Şebekedeki bolluk değerleri; kritik faaliyetlerin belirlenmesi ve faaliyetlerde yaşanacak olası gecikmelerin, projede nasıl bir etki yapacağını görmek amacıyla hesaplanmaktadır. Faaliyetlerdeki bolluk değerleriyle, faaliyetler arasında kaynak dengelemesi yapmak ve proje süresini kısaltmak mümkündür. Bolluk değerlerinin proje süresince sürekli ve düzenli olarak hesaplanması ve analizi, projenin gerçekleştirilmesine büyük fayda sağlamaktadır (Claude ve Leon, 1980, s. 344). Bolluklar, kritik olmayan bir faaliyetin aralığı içerisindeki gevşek zamanlar olarak tanımlanabilir. En çok bilinen toplam bolluk ve serbest bolluk kavramları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır (Taha, 2000, s. 270; Winston, 2004, s. 438).

**Toplam bolluk (TB):** Bir faaliyetin en erken başlangıç zamanında başlayıp, faaliyetin belirtilen sürede gerçekleşip tamamlandığı zaman ile en geç tamamlanma zamanı arasındaki süredir. Bir başka ifade ile toplam bolluk, faaliyetin projenin tamamlanma süresini değiştirmeden geciktirilebileceği maksimum süredir. Kritik faaliyetlerde toplam

bolluk değeri sıfırdır. Bir faaliyette toplam bolluk varsa; bu faaliyetin süresinin toplam bolluk süresi kadar uzatılması, faaliyete bu süre kadar geç başlanması, ya da faaliyete toplam bolluk süresi kadar ara verilmesi, programın tamamlanma zamanını değiştirmez. Toplam bolluk değeri; bir faaliyetin en geç tamamlanma zamanından, en erken başlama zamanının ve faaliyet süresinin çıkartılması ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Toplam Bolluk (TB)} = \text{GT} - (\text{EB} + \text{D}_{ij}) \quad (1.5)$$

**Serbest bolluk (SB):** Bir faaliyetin, kendisinden sonra gelen (ardıl) faaliyet/faaliyetlerin başlama sürelerini etkilemeden geciktirilebileceği maksimum süredir. Bu bolluk değeri her faaliyet için ayrı ayrı hesaplanır ve başka faaliyetler için kullanılamaz. Bir faaliyetin başlayabileceği en erken zamanda başlayıp, belirtilen faaliyet süresi içinde bitirilmesi durumunda, bu faaliyetin tamamlanma zamanı ile en erken tamamlanma zamanı arasındaki fark serbest bolluk değerini verir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\text{Serbest Bolluk (SB)} = \text{ET} - (\text{EB} + \text{D}_{ij}) \quad (1.6)$$

#### 1.4. Hızlandırma (Crashing) Süreleri ve Maliyet Analizi

Projelerin planlanmasından sonra proje yöneticileri projenin tamamlanma zamanını kısaltmak isteyebilir veya zorunda kalabilir. Böyle durumlarda projeyi istenilen teslim tarihinde tamamlayabilmek için projenin, dolayısıyla da projedeki faaliyetlerin hızlandırılması, yani tamamlanma sürelerinin normal sürelerinin altına düşürülmesi gerekir. PERT tekniği ile hızlandırma için gereken ek kaynakların (işgücü, ekipman, malzeme vb.) hangi faaliyetlere tahsis edilmesi gerektiği belirlenebilir (Taylor, 2007, s. 352). Proje süresini kısaltmak için kritik proje faaliyetlerinden birinin veya daha fazlasının süresini normal süresinin altına düşürerek uygulanan tekniğe hızlandırma (Crashing) denir. Hızlandırma işlemi, hızlandırılacak faaliyetlere daha fazla kaynak tahsis edilerek yapılabilir (Roy, 2005, s. 196; Sharma, 2016, s. 446).

Genel olarak projelerdeki gecikmenin olası nedenleri olarak şunlar söylenebilir (Roy, 2005, s. 213-214):

- Elektrik kesintisi/sorunu,
- Sınırlı kaynaklar (para, işgücü, makine ve yönetim eksikliği),

- Yüklenci ile işçiler, yüklenci ile proje sahibi arasındaki zayıf / olumsuz ilişki,
- Altyapı eksikliği (özellikle kırsal alanlarda),
- Yolsuzluk,
- Yatırımla ilgili devlet politikası,
- Güvenlik sorunları,
- Doğal iklim sorunu.

Bunun yanı sıra ihtiyaç duyulduğunda proje süresini kısaltmak için aşağıdaki seçeneklerden biri veya birkaçı uygulanabilir (Kerzner, 2009, s. 510):

- Projenin bazı kısımlarının iptal edilmesi.
- Daha az zaman alan faaliyetlerin tamamlanması.
- Faaliyetlerin eş zamanlı hale getirilmesi.
- En erken faaliyetlerin kısaltılması.
- En uzun faaliyetlerin kısaltılması.
- En kolay faaliyetlerin kısaltılması.
- Hızlandırılması en az maliyetli olan faaliyetlerin hızlandırılması.
- Daha fazla kaynağı olan faaliyetlerin kısaltılması.
- Günlük çalışma saatlerinin artırılması.

Proje süresi, daha fazla işgücü (genellikle fazla mesai ile) veya proje faaliyetlerine daha fazla kaynak (malzeme, teçhizat, vb.) tahsis edilmesiyle azaltılabilir. Ancak, ek işgücü ve kaynaklar ek maliyetler getirmekte, dolayısıyla toplam proje maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle, bir projenin süresini kısaltma kararı verilirken zaman ve maliyet arasındaki denge gözetilmelidir (Roy, 2005, s. 196). Kritik olup olmadığına bakılmaksızın hızlandırılacak bütün faaliyetler hızlandırılırsa proje süresi sadece kritik yol üzerindeki faaliyetlerin hızlandırılması kadar kısalmayacak ancak bu şekilde yapılan bir hızlandırma işlemi gereksiz maliyet artışına neden olacaktır (Acar, 1998, s. 116). Bu nedenle şebekenin toplam süresi kritik yol üzerindeki faaliyet sürelerinin toplamına eşit olmasından hareketle, proje süresinin kısaltılması için hızlandırma işlemi yalnızca kritik faaliyetlerin sürelerinde yapılmalıdır. Hedeflenen proje süresine ulaşıncaya kadar tüm kritik faaliyetlere hızlandırma işlemi uygulanır. Hızlandırma işlemi yapılırken dikkat edilecek bazı kurallar vardır. Bunlar:

- Süresi kısaltılacak kritik faaliyetler, süreleri kısaltılabilen cinsten faaliyetlerden (işgücü ve makine kapasiteleri artırılarak) olmalıdır.

- Kritik yol üzerindeki faaliyetlerin hızlandırılması sonucunda yeni kritik yol / yollar oluşabilir. Bu durumda yeni kritik yol / yollara göre de toplam süre tekrar kontrol edilmeli, gerekiyorsa yeni kritik yol / yollar üzerindeki faaliyetlerin süreleri de kısaltılmalıdır.

Kritik yol üzerindeki hangi faaliyetlerin sürelerinin ne kadar kısaltılacağı kararı ise aşağıdaki iki durum göz önüne alınarak verilmelidir:

- Sürelerin kısaltılmasında proje maliyetindeki artış dikkate alınmayacaksa, tamamlanma hızı çok iyi kontrol edilebilen faaliyetlere (tek cins ekipmana bağlı işler vb.) hızlandırma yapılmalıdır. Yani süresi kısaltıldığı zaman bu faaliyetin yeni süre içinde tamamlanacağından emin olunan faaliyetler hızlandırılmalıdır.
- Sürelerin kısaltılmasında proje maliyetindeki artışın da minimum olması isteniyorsa, birim maliyet artışı en az olan faaliyetlerde hızlandırma işlemi yapılmalıdır (Çetmeli, 1982, s. 5).

Bir projenin hızlandırılması ve maliyet analizi, ancak CPM tekniğinde gerçekleştirilen analizlerdir ve bu durum CPM tekniğinin en belirgin özelliğini oluşturmaktadır (Kargül, 1996, 221). Şebekede her faaliyet için normal süre ve maliyet ile hızlandırma süresi ve maliyeti olmak üzere iki süre ve iki maliyet tahmini vardır. Normal süreden kasit ortalama süre, normal maliyet ise projenin normal sürede tamamlanması durumundaki maliyet iken, hızlandırma süresi projenin kısaltıldığı süre, hızlandırma maliyeti ise hızlandırma işlemi sonucunda oluşan maliyeti ifade etmektedir. Projenin istenilen zamanda tamamlanabilmesi için hangi faaliyetlerde hızlandırma yapılabileceği belirlenmelidir. Hızlandırma sonucunda oluşacak ek maliyet ( $C_{ij}$ ) aşağıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$C_{ij} = \frac{C_{di} - C_{Dij}}{D_{ij} - d_{ij}} \quad (1.7)$$

Bu denklemde;

$C_{ij}$  ; faaliyetin birim hızlandırma maliyetini (i, j),

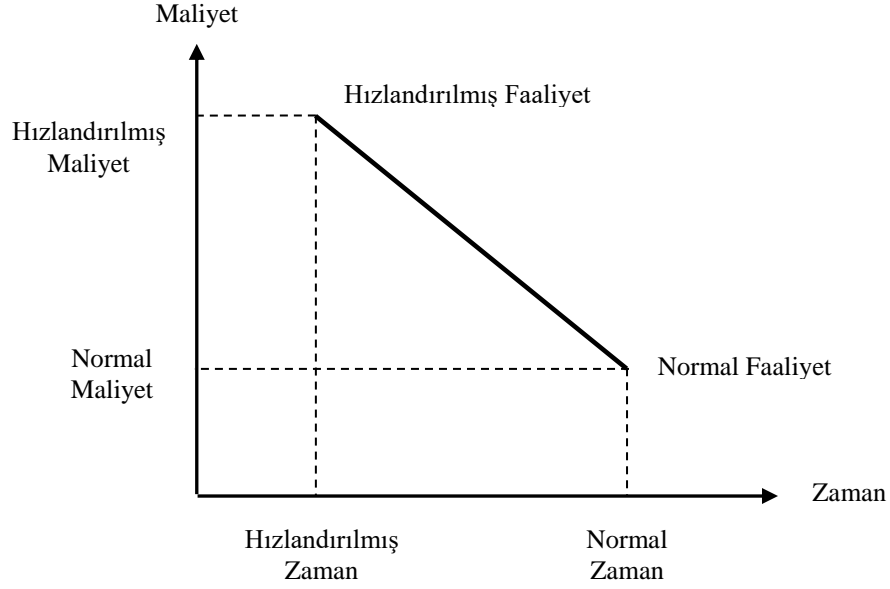
$C_{di}$  ; faaliyetin hızlandırılmış (direkt) maliyetini,

$C_{Dij}$  ; faaliyetin normal (direkt) maliyetini,

$D_{ij}$  ; faaliyetin normal süresini (i, j),

$d_{ij}$  ; hızlandırma sonrasındaki faaliyet süresini (i, j) ifade etmektedir (Hillier ve Lieberman, 2001, s. 493).

Zaman maliyet ilişkisi doğrusal olduğundan her birim zaman kısalması maliyette eşit artışa neden olur. Bir faaliyetin tamamlanma zamanı ile maliyeti arasındaki ilişkiyi ifade eden “doğrusal zaman - maliyet eğrisi” Şekil 1.9’da gösterilmiştir (Öztürk, 2016, s. 557; Cinemre, 2011, s. 211).



Şekil 1.9. Doğrusal Zaman - Maliyet Eğrisi

Şekil 1.9’deki hızlandırılmış nokta, faaliyetin tamamlanma zamanının maliyet ne olursa olsun minimum değere indirildiği durumu ifade eder. Hızlandırılmış noktadan sonra tahsis edilecek kaynaklar ve ek yatırımlar, faaliyet süresinin kısalmasına herhangi bir etkisi olmayacaktır (Hillier ve Lieberman, 1995, s. 400; Taylor, 2007, s. 353-355). Projede yer alan faaliyetlerin belirlenmesinin ardından maliyet-zaman optimizasyonu açısından etkin bir hızlandırma işlemi için aşağıdaki aşamalar sırasıyla izlenir (Sharma, 2016, s. 446).

1. Projenin tamamlanma süresi ve kritik yolu belirlenir.
2. Kritik faaliyetler tanımlanır ve bu faaliyetlerden hızlandırılabilir durumda olanların maliyet eğimi (birim hızlandırma maliyeti) 1.7 numaralı denklem ile hesaplanır. Hesaplanan bu eğim, kritik yol üzerinde bulunan hızlandırılabilir her bir faaliyetin birim hızlandırma maliyetini gösterir.
3. Toplam proje tamamlama süresini azaltmak için, kritik yoldaki birim hızlandırma maliyeti en küçük olan faaliyet belirlenerek, bu faaliyetin süresinde şebeke

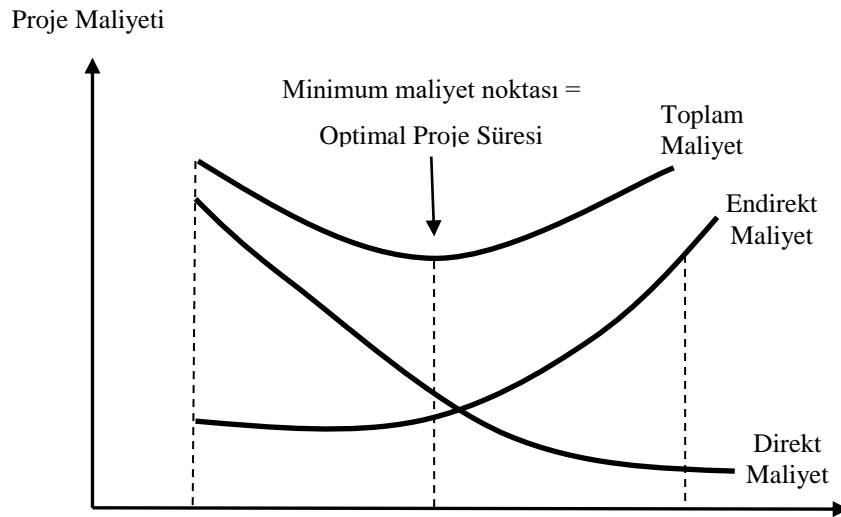
diyagramındaki başka bir yol kritik hale geldiği noktaya kadar ya da faaliyetin tüm hızlandırılabilir süresi tamamlanana kadar hızlandırma işlemi yapılır.

4. Hızlandırma yapılan kritik yol hala kritikse, 3. adıma geri dönülür ve işlem tekrarlanır. Ancak, 3. adımdaki hızlandırma sonucunda şebeke diyagramındaki diğer yollar da kritik hale gelirse, kritik yollardaki en küçük maliyet eğimine sahip faaliyet belirlenir ve hızlandırma işlemi yapılır.

5. Her kritik faaliyet için mümkün olan tüm hızlandırma işlemleri tamamlandıkça hızlandırma işlemi sonlandırılır. Sonrasında farklı proje sürelerine karşılık gelen toplam proje maliyetleri belirlenir.

Projenin tamamlanma süresi hızlı noktaya yaklaştıkça çok sayıda kritik yol oluşmaya başlar. Bu durumda en düşük maliyetli en kısa proje süresini belirleyebilmek için birçok seçeneği karşılaştırmak gerekir. Bu noktada zaman ve maliyet hesaplamalarında insan hatasını ortadan kaldırmak için bilgisayar programları kullanmak gerekecektir (Acar, 1998, s. 116-117).

Bunun yanı sıra direkt ve endirekt maliyetler projenin tamamlanma süresine göre azalan ve artan fonksiyonlardır. Şekil 1.10'da görüldüğü üzere normal ve hızlandırma süreleri arasında toplam maliyetin en küçük olduğu nokta projenin optimal süresidir. (Hillier ve Lieberman, 1995, s. 401; Taylor, 2007, s. 353-355).

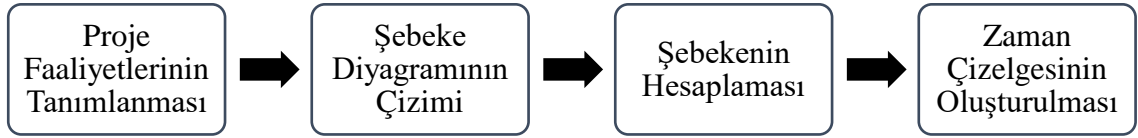


Şekil 1.10. Projenin Optimal Tamamlanma Süresi

## 2. ŞEBEKE ANALİZİ TEKNİKLERİ

### 2.1. Giriş

Şebeke analizi teknikleri arasında en yaygın bilinen ve kullanılan teknikler CPM ve PERT teknikleridir (Barutçugil, 2008, s. 175). CPM ve PERT teknikleri projelerin planlanması, çizelgelenmesi ve kontrolüne yardımcı olmak üzere tasarlanmış şebeke esaslı modellerdir. Bu tekniklerin amacı çizelgeleme faaliyetlerine analitik anlamlar kazandırmaktır. Şekil 2.1’de CPM ve PERT tekniklerinin aşamaları genel olarak özetlenmiştir. Buna göre; önce projenin faaliyetleri, öncelik ilişkileri ve zaman gereksinimleri tanımlanır, sonra bu faaliyetler bir şebeke diyagramına dönüştürülür. Üçüncü aşamada ise projenin zaman çizelgesinin geliştirilmesi amacıyla şebeke hesaplamaları yapılır. Son aşamada ise zaman çizelgesi oluşturulur (Taha, 2000, s. 258).



Şekil 2.1. CPM ve PERT Tekniklerinin Aşamaları

CPM ve PERT tekniği ile aşağıdaki sorulara cevap bulunabilir (Albayrak, 2016, s. 574):

- Projenin tamamlanma süresi.
- Her bir faaliyetin başlama ve tamamlanma zamanları.
- Kritik olan ve olmayan faaliyetler.
- Kritik olmayan faaliyetlerin bolluk süreleri.
- Projenin zaman ve maliyet açısından hesaplanandan daha iyi veya daha kötü olup olmadığı.
- Proje kaynaklarının yeterli olup olmadığı.
- Hızlandırılmak istenmesi durumunda projenin ne kadar erken tamamlanabileceği ve hızlandırma işleminin ek maliyetinin ne olacağı.
- Projenin belirlenen tarihte tamamlanma olasılığının ne olduğu.

Günümüzde projelerin planlanması, kontrolü ve denetiminde yaygın olarak kullanılmakta olan şebeke analizi tekniklerinden CPM ve PERT (Cinemre, 2011, s. 189), aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

## 2.2. Kritik Yol Tekniği (CPM)

Kritik yol analizi olarak da adlandırılan Kritik Yol Tekniği, satıştan üretime geri dönüş zamanlarının planlanması ve kontrolünü iyileştirmek için bir yönetim aracı olarak 1957’de Remington Rand Univac tarafından geliştirilmiştir. CPM, “Critical Path Method” kelimelerinin baş harflerinden oluşan “Kritik Yol Tekniği” anlamına gelen bir terim kısaltmasıdır. CPM, faaliyet sürelerinin kesin olarak bilindiğinin varsayıldığı proje planlama tekniğidir (Burke, 2003, s. 18). Kritik yol, şebekenin başlangıç ve bitiş olaylarını birleştiren, tamamlanma zamanı en büyük ve toplam bolluk değerisi sıfır olan faaliyetler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Winston, 2004, s. 437). Kritik yol, projenin tamamlama süresini belirlediğinden ve kritik yolu oluşturan faaliyetlerde yaşanacak gecikmeler projenin tamamlanma süresini de geciktirecek olmasından dolayı önemlidir. Bundan dolayı bu yola “kritik yol”, bu yolu oluşturan faaliyetlere de “kritik faaliyet” denmektedir (Cinemre, 2011, s. 200-201). Deterministik bir teknik olan CPM tekniği kullanılarak projeye ilgili aşağıdaki sorulara cevap bulunabilir:

- Projenin tamamlanması için gerekli olan en kısa zaman.
- Her bir faaliyetin başlayabileceği en erken zaman.
- Projenin kritik faaliyetleri.
- Eğer proje en kısa zamanda tamamlanacaksa her faaliyetin en geç ne zaman tamamlanması gerektiği.
- Projeyi geciktirmeden kritik olmayan faaliyetlere sağlanacak en çok gecikme süresi (ztrk, 2009, s. 539).

Kritik yol hesaplamaları, ileri doğru ve geriye doğru olmak üzere iki şekilde yapılır. İleri doğru hesaplama; faaliyetlerin en erken tamamlanma zamanlarını, geriye doğru hesaplama ise; faaliyetlerin en geç tamamlanma zamanlarını belirler (Taha, 2000, s. 266-267).

**İleri doğru hesaplama:** Hesaplamalar ilk olaydan başlayarak son olaya kadar yapılır. Bu hesaplama şeklinde her bir olayın en erken başlama zamanını belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılır (z ve Alp, 2010, s. 169; Roy, 2005, s. 193). Burada projenin başlangıç zamanı  $EB_i$  önceliği olmayan faaliyet olup genellikle değerisi sıfır olarak alınır (Ulucan, 2007, s. 294).

$$ET_j = \max (EB_i + D_{ij}) \quad (2.1)$$

**Geriye doğru hesaplama:** Hesaplamalar son olaydan başlayarak ilk olaya doğru yapılır. Faaliyetin en geç başlama zamanı, en geç tamamlanma zamanından faaliyet süresinin çıkarılmasıyla bulunur. Geriye doğru hesaplama aşağıdaki denklem ile yapılır (Öz ve Alp, 2010, s. 169; Roy, 2005, s. 193).

$$GT_i = \min (GT_j - D_{ij}) \quad (2.2)$$

Kritik yolun belirlenebilmesi için her bir faaliyet için dört sürenin (EB, ET, GB ve GT) hesaplanması (Öztürk, 2016, s. 538) ve projedeki bir (i, j) faaliyetinin kritik faaliyet olabilmesi için aşağıdaki üç şartı aynı anda sağlaması gerekmektedir (Acar, 1998, s.114).

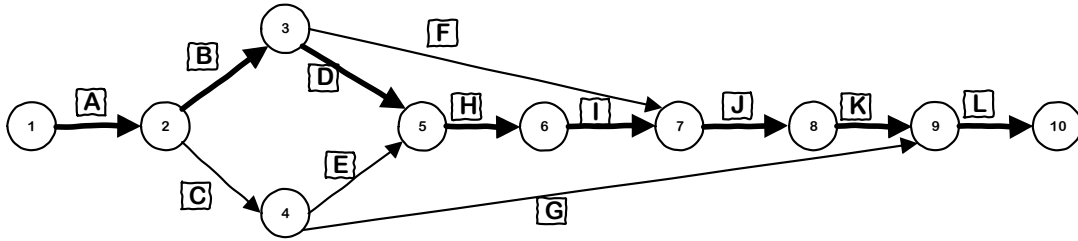
$$\begin{aligned} ET_i &= GT_i \\ ET_j &= GT_j \\ ET_j - ET_i &= GT_j - GT_i = D_{ij} \end{aligned} \quad (2.3)$$

### 2.3. Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT)

İlk olarak 1957 yılında ABD Donanması'ndaki "Polaris Missiles" projesini iki yıl erken bitirmek amacıyla kullanılan "Program Evaluation and Review Technique" kelimelerinin baş harflerinden oluşan PERT tekniği, temel olarak bir proje planlama ve kontrol aracıdır. Zaman ve kaynakları planlamak için çok yararlı bir araç olan PERT tekniği, bir projenin değerlendirmesini yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. PERT tekniği, faaliyet sürelerinin ve kaynakların kesin olarak tahmin edilemediği projelerde kullanılır (Roy, 2005, s. 192). PERT, tüm ana öğelerin / olayların tanımlandığı belirli bir program veya proje için bir yol haritası olarak düşünülebilir. PERT tekniğini kullanmanın amaçlarından biri de projeyi tamamlamak için ne kadar zamana ihtiyaç duyulduğunun belirlenmesidir. Bu nedenle PERT, projenin başarısını doğrudan etkileyen unsurlardan olan; zamanı, maliyeti ve performansı doğrudan analiz etmek için zamanı ortak bir payda olarak kullanır. PERT tekniği kullanılarak, bir olayın en erken zamanı veya bir faaliyetin başlama veya tamamlanma zamanları belirlenebilir. PERT tekniğinde şebeke diyagramının oluşturulması için, faaliyetlerin sıralaması, başlangıç ve tamamlanma zamanları ile her faaliyetin öncelik ilişkisinin bilinmesi gerekmektedir.

- Hangi faaliyet hangi faaliyetten önce geliyor?
- Hangi faaliyeti hangi faaliyet takip ediyor?
- Hangi faaliyetler aynı anda yapılabilir?

soruları cevaplandıktan sonra büyük projeler kolayca PERT tekniği için şebeke diyagramlarına dönüştürülebilir. Şekil 2.2’de PERT tekniği için oluşturulan basit bir şebeke diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.2. Basit Bir PERT Diyagramı

Şekil 2.2’deki kalın çizgi, [(Kritik yol; kalın çizgi, farklı bir çizgi türü veya kırmızı çizgi ile gösterilir (Burke, 2003, s.152).] en uzun zamanı veren kritik yolu temsil etmektedir. Kritik yol A-B-D-H-I-J-K-L faaliyetlerinden geçmektedir. Kritik yol, projenin başarılı bir şekilde kontrol edilmesi için oldukça önemli bir yere sahiptir. Çünkü yönetime iki şey söyler:

1. Kritik yoldaki faaliyetlerin hiçbirinde bolluk (aylak zaman) olmadığından, bu faaliyetlerdeki herhangi bir gecikme, programın tamamlanma tarihini geciktirecektir.

2. Proje zaman ve maliyet bakımından iyileştirilmek isteniyorsa, kritik yoldaki faaliyetlerin iyileştirilmesi gerekecektir. Bu nedenle kritik yol üzerindeki faaliyetlerin takip edilmesi ve kontrol altında tutulması oldukça önemlidir (Kerzner, 2009, s. 498-500).

Üretimdeki darboğazları en küçükleyen, proje bileşenlerinin eş zamanlı olarak yürütülmesini sağlayan ve projeleri hızlandıran bir teknik olan PERT’de, öncelikle her faaliyetin başlama ve tamamlanma zamanları belirlenir. Şebeke diyagramının hazırlanması bu amaca ulaşmak için ilk adımdır. Değişik faaliyetler arasındaki ilişkilerden dolayı, faaliyetlerin başlama ve tamamlanma zamanlarının belirlenmesi özel hesaplamalar gerektirir. Bu hesaplamalar, basit aritmetik işlemler kullanılarak doğrudan şebeke üzerinde yapılabilir (Winston, 2004, s. 433). Sonrasında ise PERT tekniklerinde şu işlemler takip edilir (Roy, 2005, s. 192):

- Projenin tüm faaliyetleri belirlenir.
- Faaliyetler arasındaki ilişki ve öncelikler tanımlanır.

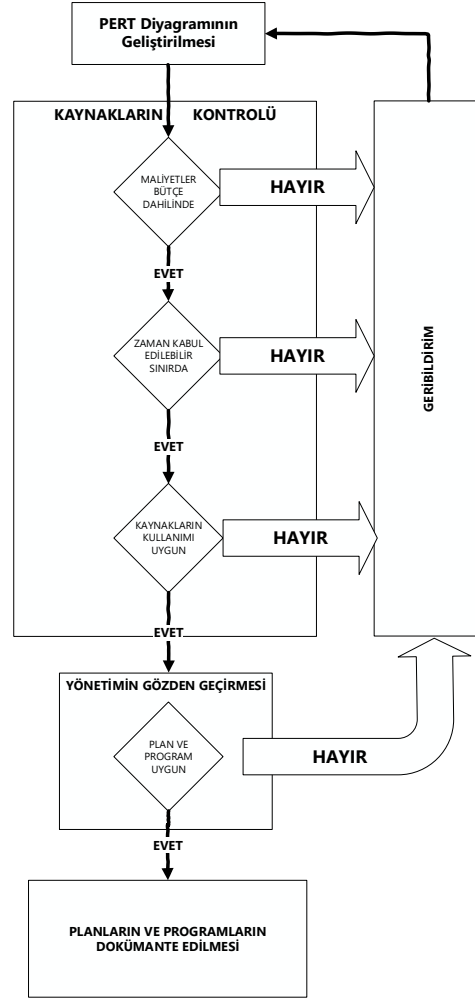
- Faaliyetler ve olaylar isimlendirilerek / numaralandırılarak projenin şebeke diyagramı çizilir.
- Her bir faaliyet için en iyimser-a, en yüksek olasılıklı-m ve en kötümser-b olmak üzere üç tahmini süre belirlenir ve bu süreler kullanılarak ortalama süreler hesaplanır.
- Her bir faaliyet için standart sapma ve varyans değerleri hesaplanır.
- Şebekedeki her bir yol üzerinde bulunan faaliyetlerin en erken ve en geç başlama ve tamamlama zamanları ile bolluk süreleri tespit edilir.
- Kritik ve kritik olmayan faaliyetlerden hareketle projenin kritik yolu / yolları belirlenir ve kalın, kırmızı veya farklı çizgi ile işaretlenir
- Projenin veya kritik yolun toplam tamamlanma süresi belirlenir.
- İhtiyaç duyuluyorsa hızlandırılacak faaliyet / faaliyetler için hızlandırma süresi ve birim hızlandırma maliyeti hesaplanır.
- Gerekli olduğu durumlarda projenin teslim tarihinde veya istenilen bir tarihte tamamlanma olasılığı hesaplanır.

Ayrıca PERT tekniğiyle;

- Projenin ve faaliyetlerin tamamlanma süresinin hangi olasılıkla gerçekleşeceği,
- İstenen farklı bir tarih içinde tamamlanma olasılığı,
- Projenin belirlenen / istenen bir olasılık değeri için ne kadar süre içinde tamamlanabileceği hesaplanabilir.

Bu özellikleriyle PERT projelerin planlama ve kontrolü açısından faydalı bir tekniktir (Hajek, 1977, s. 135).

Planlama detaylarının bilinmesini, maliyetlerin kontrolünü ve projenin izlenebilmesini sağlayan PERT tekniği, projelerin değişkenliğine bağlı olarak kendi içerisinde dinamik bir yapıya sahiptir. Pek çok yineleme (iterasyon), PERT diyagramı tamamlanmadan planlama aşamasında yapılır. Şekil 2.3’de PERT diyagramının geliştirilmesi sürecindeki bu yineleme işlemi gösterilmektedir. Bu aşamada işlemler; zaman, maliyet, kaynaklar ve programa uygunluk açısından kontrol edilerek tekrarlanır. Yinelemelerin veya diyagramın yeniden oluşturulmasının temel nedeni bolluk süreleridir. Yineleme işlemi, kritik yolun uzunluğunu azaltmak için veya programın konseptinde veya program sırasında beklenmeyen bir durum meydana gelirse de gerçekleştirilir (Kerzner, 2009, s. 509).



Şekil 2.3. PERT Diyagramı Geliştirme ve Yineleme Sürecinin Akış Diyagramı

### 2.3.1. PERT’de kullanılan faaliyet süreleri

Şebeke diyagramında yapılan hesaplamaların temel amacı, projenin zamanında bitirilebilmesi için gerekli değişikliklerin neler olabileceğini belirlemek ve bu sayede projenin tamamlanma süresini belirleyerek müşteriye kesin bir teslim tarihi verebilmektir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için, öncelikle projeyi oluşturan faaliyetler ağının belirlenmesi ve bu ağdaki tüm faaliyetlerin sürelerinin bilinmesi gerekir. Şebeke diyagramının etkin sonuç verebilmesi; şebekeyi oluşturan verilerin doğruluğuna, şebeke diyagramının doğru bir şekilde oluşturulmasına ve şebeke çıktılarının uygun bir şekilde kullanılmasına bağlıdır. Dolayısıyla, şebeke analizinde faaliyet sürelerinin doğru tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır (Barutçugil, 2008, 181).

Daha önceden de değinildiği üzere faaliyet sürelerinin kesin olarak bilinemediği ve bir olasılık dağılımına göre oluştukları durumlarda CPM yerine PERT kullanılmaktadır. Faaliyetlerin ortalama süresinin ( $\bar{x}$ ) belirlenebilmesi için her bir faaliyetin; en

iyimser (a), en yüksek olasılıklı (m) ve en kötümser (b) sürelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir (Cinemre, 2011, s. 220). PERT için gerekli olan söz konusu süre tahminlerinin neler olduğu aşağıda açıklanmıştır (Roy, 2005, s. 193; Sharma, 2016, s. 437):

**En iyimser süre / Optimistic time (a veya  $t_o$ ):** Bir faaliyet gerçekleştirilirken herhangi bir aksilik olmadığında faaliyetin en erken tamamlanacağı süreyi gösterir ve “a veya  $t_o$ ” simgesi ile gösterilir.

**En yüksek olasılıklı süre / Most likely time (m veya  $t_m$ ):** Tecrübelerle göre faaliyetin beklenen tamamlanma süresini ifade eder ve “m veya  $t_m$ ” simgesi ile gösterilir.

**En kötümser süre / Pessimistic time (b veya  $t_p$ ):** En kötü durumlarda faaliyetin tamamlanma süresini ifade eder ve “b veya  $t_p$ ” simgesi ile gösterilir.

**Ortalama süre / Expected time ( $\bar{x}$ ):** En iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser sürenin beta dağılımına göre alınan ortalaması, faaliyetin ortalama süresini vermektedir.

En iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser süreyi belirlemek her zaman kolay olmamakla birlikte bir faaliyetin beklenen belirsizlikleri hakkında faydalı bilgiler verir. Standart faaliyetler için bu üç sürenin tahmini birbirinden çok farklı olmamalıdır. Ancak bir faaliyetin belirsizliği arttıkça, belirlenen sürelerin tahmin aralığı da daha geniş olacaktır. Süre tahminlerinin, iyimser (a) ve kötümser (b) tahmin aralığında olması gerekmektedir. En yüksek olasılıklı süre (m), dağılımın orta değeri olan  $(a+b)/2$  değerine eşit ya da ortalamanın sağında veya solunda olabilir (Cinemre, 2011, s. 223; Halaç, 1992, s. 202). Bu özellikler nedeniyle her faaliyet için belirlenen bu üç sürenin (en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser) beta dağılımına uygun olduğu tespit edilmiştir (Öz ve Alp, 2010, s. 169).

### 2.3.2. Beta dağılımı

PERT tekniğinde kullanılan faaliyet süreleri belirsiz olduğundan, olasılıklı sürelerin dağılımının beta dağılımına uygun olduğu görülmüştür. PERT tekniğinde faaliyet süreleri hesaplanırken beta dağılımının kullanılması artık bir kural haline gelmiştir. Beta dağılımının özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Taylor, 2007, s. 338):

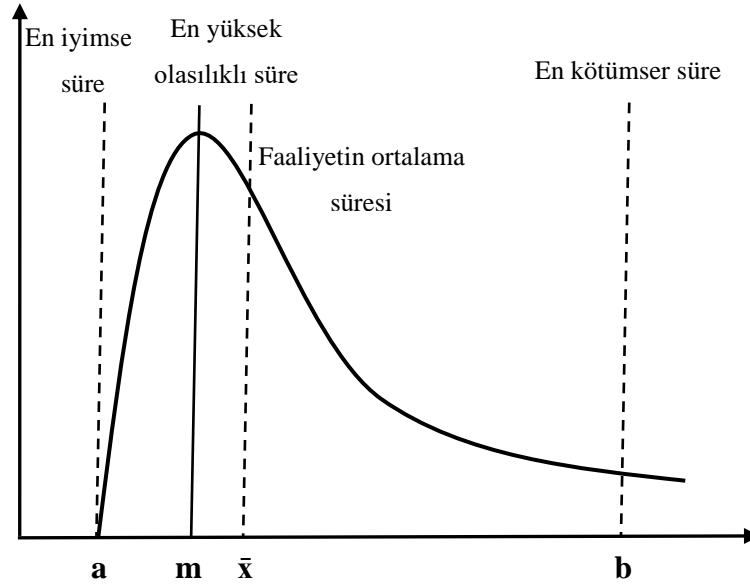
- Beta dağılımı; en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser süreler ile ortalama ve varyans değerlerini hesaplamaya olanak veren bir dağılımdır. PERT tekniğinde faaliyet süresi olarak üç tahmini sürenin (en iyimser-a, en yüksek olasılıklı-m ve en kötümser-b) ortalaması ( $\bar{x}$ ) kullanılır. Beta dağılı-

mının ortalaması olan bu süre aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Cinemre, 2011, s. 221; Öztürk, 2016, s. 546).

$$\text{Faaliyetlerin ortalama süresi: } \bar{x} = \frac{a+4m+b}{6} \quad (2.4)$$

- Beta dağılımı sürekli bir dağılımdır fakat daha önceden belirlenen özel bir şekli yoktur. Yani verilen değerlere göre dağılıma ait eğri sağa veya sola yatkın olabilmektedir.
- Diğer dağılımlar da göz önüne alındığında, bu verilerin hesaplanmasında en uygun dağılımın beta dağılımı olduğu görülür (Taylor, 2007, s. 338).

Örnek bir beta dağılımı eğrisi Şekil 2.4’de gösterilmiştir (Cinemre, 2011, s. 221; Öztürk, 2016, s. 545).



Şekil 2.4. Beta Dağılım Eğrisi

Bir seriyi oluşturan terimlerin birbirlerine olan yakınlığı standart sapma ile ifade edilir. Değişkenlik ölçüleri içerisinde en etkin ve en yaygın kullanımı olan standart sapma, seriyi oluşturan terimler ile bu terimlerin aritmetik ortalamasının farklarının kareli ortalamasıdır. Standart sapma örnek kütle için genellikle küçük “s” ile, ana kütle için ise “σ” ile gösterilir. Standart sapmanın karesine varyans denir ve örnek kütle için “S<sup>2</sup>”, ana kütle için “σ<sup>2</sup>” sembolü ile gösterilir (Atlas, 2016, s. 154). Hesaplanan ortalama süreler kesin olmadığından bir sapma ve varyans söz konusudur. Varyans değeri ne kadar büyük olursa belirsizlik derecesi de o denli büyük olur. Sürelerin standart sapması

ve varyans değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur (Heizer ve Render, 2007, s. 75).

$$\text{Faaliyet sürelerinin standart sapması: } s = \frac{b-a}{6} \quad (2.5)$$

$$\text{Faaliyet sürelerinin varyansı: } S^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2 \quad (2.6)$$

PERT tekniğinde, her faaliyet için beklenen ortalama süre ( $\bar{x}$ ) belirlenerek projenin kritik yolu bulunabilir. Projenin başlangıcından bitimine kadar giden yollar içerisinde en yüksek beklenen ortalama süre toplamı ( $\mu$ ) ve varyansı ( $\sigma^2$ ) veren yol kritik yoldur. Projenin tamamlanma süresi, kritik yol üzerindeki faaliyetlerin ortalama sürelerinin toplamıdır. Projenin tamamlanma süresi ve varyansı aşağıda verilen denklemler ile hesaplanır. Buradaki " $\bar{x}$ " ve " $S^2$ " değerleri, sadece kritik yol üzerindeki faaliyetlerin değerlerini ifade etmektedir (Hillier ve Lieberman, 1995, s. 395-397).

$$\mu = \sum \bar{x} \quad (2.7)$$

$$\text{Projenin Varyansı: } \sigma^2 = \sum S^2 \quad (2.8)$$

#### 2.4. CPM ve PERT Tekniklerinin Karşılaştırılması

Faaliyet sürelerinin belirlenmesi hariç; proje şebekesinin çizilmesi, faaliyetlerin başlama ve tamamlanma sürelerinin hesaplanması her iki teknikte de aynı şekilde yapılmaktadır (Burke, 2003, s. 18; Taha, 2000, s. 258). CPM ve PERT teknikleri genel olarak benzerlik gösterse de her iki teknik arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Her iki teknik arasındaki temel farklılıklar şu şekilde sıralanabilir:

- CPM ve PERT tekniklerinin arasındaki en önemli fark, projeyi oluşturan faaliyetlerin tamamlanma süreleridir. PERT'te en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser olmak üzere üç süre tahmini yapılırken, CPM'de bir süre kullanılmakta ve bu süre kesin olarak bilinmektedir (Burke, 2003, s. 18; Taha, 2000, s. 258).
- PERT, faaliyet sürelerinin değişkenlik gösterdiği AR-GE projeleri için kullanılır (Burke, 2003, s. 18, Sharma, 2016, s. 418).
- CPM daha çok, kaynağa bağımlı olan ve doğru süre bilgilerine dayanan inşaat projeleri için kullanılır (Kerzner, 2009, s. 500).

- PERT tekniği, daha önce yapılmamış projeler ve işler için kullanıldığından, faaliyetlerin maliyeti hakkında sağlıklı bilgiye ulaşılması kolay değildir. CPM tekniğinde, daha önceden denenmiş ve süreleri kesin projelerde uygulandığı için hızlandırma ve maliyet hesaplanması yapılabilmektedir (Kargül, 1996, s. 222; Sharma, 2016, s. 418).

## **2.5. Alanyazın Araştırması (CPM / PERT ile Proje Planlama)**

1900'lü yıllarda Frederick Taylor (1865-1915) tarafından yönetimsel tekniklerin bilimsel olarak analiz edilebileceğinin keşfedilmesiyle birlikte, iş süreçlerinin en basit parçaları analiz edilerek verimlilik artırılmış ve böylece süreç analizi çalışmalarının temelleri atılmıştır. Sonrasında ise Henry Gantt (1816-1919) proje takvimini oluşturmada büyük kolaylıklar sağlayan ve kendi adıyla bilinen Gantt diyagramlarını geliştirmiştir. Proje yönetimi alanındaki çalışmalar ve konunun ayrı bir alan olarak değerlendirilmesi ilk olarak İkinci Dünya Savaşı sonrasında başlamıştır. Sonraki dönemlerde ise özellikle silah sistemleriyle ilgili projelerin en iyi şekilde yönetilmesi gerekliliğinden dolayı, teknolojinin ilerlemesiyle ve mühendislikteki önemli gelişmelerle birlikte farklı bilim adamları tarafından CPM ve PERT teknikleri geliştirilmiştir (Davis, 1983). Bugün kullanılan proje planlama ve kontrol tekniklerinin birçoğu ise ABD savunma ve havacılık projeleri için 1950'lerde ve 1960'larda geliştirilmiştir (Burke, 2003, s. 26). Geliştirildiği ilk yıllarda askeri alanda silah geliştirilmesi amacıyla kullanılan bu teknikler sonrasında endüstriyel projelerde de kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşması ve yazılımların gelişmesiyle birlikte karmaşık ve büyük işler için proje yönetimi tekniklerinin işletmelerde kullanılması kolaylaşmış ve yaygınlaşmıştır (Albayrak, 2016, s. 15).

Kelley (1961, s. 296-320), karmaşık mühendislik projelerin planlanması, programlanması ve koordine edilmesi için bir araç olan "Kritik Yol Tekniği"nin matematiksel temelini oluşturan bir çalışma yapmıştır. Çalışmada; CPM tekniğinin temel bileşenlerinin faaliyetler ile bu faaliyetlerin sırası, süreleri ve maliyet bilgilerinden oluştuğu belirtilmiştir. CPM tekniği ile; proje için gerekli olan iş gücü ve bütçe ihtiyacının, projedeki tedarik ve tasarım kısıtlamaları ile projedeki gecikmelerin etkilerinin belirlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Dunne ve Klementowski (1982, s. 77) yaptıkları çalışmada, havacılık ve araştırma alanındaki AR-GE yönetiminde temel PERT/CPM ağı, maliyet süresi analizi ve kritik

kaynak analizi tekniklerinden hangisinin kullanıldığını araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, incelenen organizasyonların yaklaşık yarısında AR-GE planlama aracı olarak PERT/CPM tekniklerinin geniş bir şekilde kullanıldığı görülmüştür.

Sarıca (2006), “CPM ve PERT teknikleriyle proje planlama ve bir işletmede uygulanması” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, büyük ölçekli projelerin, belirlenmiş bir zaman periyodu içerisinde, mevcut kaynakları kullanarak, optimum maliyetlerle tamamlanması ve proje için belirlenen hedeflerin gerçekleştirilebilmesi açısından planlama, programlama ve kontrol safhalarının analizini ele almıştır. Proje yönetiminin en önemli üç aşaması CPM ve PERT teknikleri ile incelenmiş ve PERT tekniği kullanılarak “Olimpik Buz Pateni Pisti” inşaat projesinin analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, projede oluşacak muhtemel gecikme senaryoları ve ceza maliyetleri ile alternatif hızlandırma senaryoları ve maliyetlerin karşılaştırmasının yapabileceği bir kıyaslama yöntemi geliştirilmiştir.

Duran (2007), “CPM - PERT modeller ve uygulaması” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, CPM/PERT tekniğini matbaa üretim aşamalarına uygulamıştır. Çalışmada 10.000 adet ajanda siparişi işinin tamamlanma süresi PERT tekniği ile analiz edilmiştir. PERT tekniği ile; normalde tamamlanma süresi 22,5 gün ve proje maliyeti 47.625 TL olan işin süresi 19,5 güne indirilmiştir. Tamamlanma süresinin 3 gün kısaltılması sonucunda genel maliyetlerde 1.650 TL’lik artış olmuş, ancak bu maliyet artışı işletmeye 19 saatlik zaman tasarrufu sağlamıştır.

Karadeniz (2007), “PERT-CPM ile proje planlama, değerlendirme ve bir işletme uygulaması” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, proje planlama teknikleri incelenmiştir. Çalışmada CPM tekniği ile; Halkalı-Gebze arasındaki mevcut demiryolu hattının iyileştirilmesi ve kapasitesinin artırılması amacıyla başlatılan inşaat projesinin iş programı oluşturulmuştur. İnşaat projesindeki kazı ve beton işlerinin takip ve kontrolü, ilerleme tabloları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, projenin başlangıcındaki planlanan tamamlanma süresi ile proje başladıktan sonraki yeni tamamlanma süresi mevcut iş programı üzerinden hesaplanmıştır.

Yalkı (2009), “Proje yönetimi ve CPM-PERT teknikleri üzerine bir uygulama” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, çelikhane tesislerinin kapasite artırımı ve güçlendirilmesi için yapılan projenin (Bina ve içinde yer alan ekipmanların ve eski parçaların değiştirilmesi, yeni elektrik hatlarının çekilmesi, mevcut su ve buhar sistemlerinin yenilenmesi) ne kadar sürede tamamlanacağını CPM tekniği ile hesaplamıştır. Çalışma so-

nucunda, projenin tamamlanma süresinin yanı sıra projenin tamamlanma süresine etki eden faaliyetler belirlenmiştir.

Kocabıyık (2010), “Gemi inşa sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede PERT ve bulanık PERT uygulaması” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, kimyasal tanker gemisi güverte projesini proje yönetimi çerçevesinde incelemiştir. Çalışmada projenin tamamlanma süresi ve proje maliyetinin hesaplanmasında PERT ve bulanık PERT teknikleri kullanılmıştır. Bu tekniklerle işletme açısından en olası proje gerçekleşme süresi ile proje maliyeti tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda her iki teknikle de aynı kritik yol bulunmuştur. Ayrıca beklenen proje tamamlanma zamanı PERT tekniğinde bulanık PERT tekniğine kıyasla daha büyük çıkmış olsa da, proje tamamlanma süresi ve proje maliyetlerinde iki teknik arasında büyük farklar olmadığı görülmüştür.

Rençber (2013), “Şebeke analizinde CPM tekniği ve bir uygulama” adlı çalışmasında, Kayaş – Kayseri arasında bulunan demiryolu hattına kurulması planlanan “Merkezi Trafik Kontrol” projesini incelemiştir. Çalışmada, projedeki kritik ve kritik olmayan faaliyetler ile projenin kritik yolu belirlenmiştir. Normal süresi 108 hafta olarak bulunan projeye hızlandırma işlemi uygulanmıştır. Hızlandırma işlemi sonrasında projenin tamamlanma süresi 10 hafta kısaltılarak 98 haftaya düşürülmüş ve 18.980.000 \$ olan proje maliyetinin 19.920.000 \$’a yükseldiği görülmüştür.

Karahan ve Ezin (2014), “PERT-CPM tekniğiyle bir inşaatın yapım süresi ve maliyetlerinin optimizasyonu” konulu çalışmasında, inşaat sektörü üzerinde yapılan bir projeyi ele almış, PERT ve CPM tekniği kullanılarak projenin normalde 52 hafta olan tamamlanma süresi için 15 faaliyet belirlemiştir. Çalışmada, PERT ve CPM teknikleriyle proje süresini kısaltmak ve maliyetlerini minimize etmek için proje yeniden programlanmıştır. Maliyeti daha az olan hafriyat ve çevre düzenleme işleri öncelikli olmak üzere, yalıtım, duvar sıvası ve çatı işlerinde ek maliyetlere katlanılarak proje tamamlanma süresi kısaltılmıştır.

Mazlum ve Güneri (2015) “CPM, PERT and project management with fuzzy logic technique and implementation on a business” konulu çalışmada, online internet şube projesinin planlanmasında klasik PERT ve CPM ile bulanık proje yönetiminde kullanılan bulanık PERT (FPERT) ve bulanık CPM (FCPM) tekniklerini kullanmıştır. Çalışmada üç farklı firmadan alınan kesin ve bulanık faaliyet süreleri kullanılarak klasik CPM ve PERT, bulanık veriler için de üçgensel bulanık sayılar kullanılarak FCPM ve FPERT optimizasyonu incelenmiştir. Ayrıca kazanılmış değer yöntemine göre projenin

ilerleme maliyetleri incelenmiş ve projenin kontrol altında olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda incelenen teknikler arasında genel olarak çok büyük farklılıkların olmadığı görülmüştür. Ancak bulanık PERT tekniğinde klasik PERT tekniğine göre işlem kargaşası olduğu, belirsizliklerin fazla olduğu ortamlarda klasik PERT tekniğinin klasik CPM tekniğine göre daha uygun çözümler verdiği belirtilmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında online internet şube projesinde klasik PERT tekniğini kullanmanın en uygun seçim olacağı sonucuna varılmıştır.

Agwei (2015) “Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: case study” adlı çalışmada, Gana'daki bir inşaat şirketinin yapım işini, kritik yol tekniği (CPM) ve proje değerlendirme ve inceleme tekniği (PERT) kullanarak analiz etmiştir. Ayrıca çalışmada lineer programlama ile projeye hızlandırma işlemi yapılmıştır. Hızlandırma sonucunda 57.000 \$'dan 59.000 \$'a yükselen proje maliyetine karşılık, faaliyetlerin etkin bir şekilde planlanması ile 79 gün olan proje süresi 39 gün kısaltılarak 40 güne indirilmiştir.

Yıldız (2015), “Farklı coğrafi bölgelerde petrol kuyusu açma maliyetlerinin PERT-CPM proje planlama teknikleri ile karşılaştırmalı analizi” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, bir petrol şirketi tarafından farklı coğrafi bölgelerde açılması planlanan biri dikey diğeri yatay sondaj ile açılacak olan iki farklı petrol kuyusu projesinin maliyeti ve proje süresini PERT-CPM teknikleri ile incelemiştir. Çalışmada maliyet analizleri yapılmış ve net beklenen kâr analizine göre optimum proje planları elde edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, bir faaliyete ilişkin maliyet tahminleri önceden hazırlanan kuyu raporlarındaki fizikî maliyetlerden faydalanılarak elde edilmiştir. İkinci aşamada, petrol ve doğalgaz mühendislerinin görüşleri doğrultusunda PERT tekniği için gereken üçlü süre (en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser) tahminleri yapılmıştır. Belirlenen süreler WINQSB programına girilmiş ve analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, dikey sondaj ile açılması planlanan kuyunun, yatay yönlü sondaj ile açılması planlanan kuyuya kıyasla daha kısa sürede ve daha az maliyette tamamlanacağı öngörülmüştür. Benzer derinlikteki iki kuyunun maliyetleri ve tamamlanma süresi arasındaki farklılık, yatay sondajın özel ekipman (esnek muhafaza boruları vb.) gerektirmesi ve daha fazla faaliyet içermesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Temiz ve Dursun (2016), “PERT tekniğinin liman deniz hizmetleri otomasyonu projesine uygulanması” adlı araştırma çalışmasında, 19 faaliyetten oluşan liman deniz hizmetleri otomasyonu projesini PERT tekniği ile planlamıştır. Çalışma sonucunda,

projenin ortalama tamamlanma süresi ve varyansı bulunmuş ve projenin farklı sürelerde tamamlanma olasılıkları hesaplanmıştır. Çalışmada düğümler ve faaliyetlerin yer aldığı şebeke diyagramı çizilmiştir. Proje ekibinin yardımıyla faaliyetlere için en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser süreler tahmin edilmiştir. TORA paket programı yardımıyla projenin kritik faaliyetleri, kritik yolu ve kritik yolun standart sapması belirlenmiştir. Ayrıca faaliyetlerin beklenen tamamlanma süreleri (ortalamaları) ve faaliyet sürelerinin varyansları hesaplanarak çalışmaya eklenmiştir.

Bakışkan (2019), “CPM-PERT proje yönetim tekniklerinin Karadeniz tipi balıkçı gemileri inşa sürecine uygulanması” adlı yüksek lisans tezi çalışmasında, CPM ve PERT tekniklerini Karadeniz tipi bir balıkçı gemisinin inşa sürecinde uygulamıştır. Gemi inşa süreci yaklaşık olarak 500 alt faaliyete ayrılarak incelenmiş ve her bir faaliyet için 3 farklı süre tahmini yapılmıştır. Faaliyetlerin şebeke diyagramı oluşturularak kritik yollar belirlenmiş ve projenin farklı durumlarda tamamlanma süreleri ve olasılıkları hesaplanmıştır. Bu sayede proje yöneticisinin dar boğaza neden olan faaliyetleri ve nasıl önlemler alabileceği görmesi sağlanmıştır. Faaliyetlerin bolluk değerleri de hesaplanarak hızlandırma işlemi için faaliyetler arası kaynak ve işgücü aktarımı yapılabileceği görülmüştür.

### 3. HEDEF PROGRAMLAMA

#### 3.1. Giriş

Doğrusal programlama problemlerinde amaç fonksiyonu; kâr, verimlilik, maliyet vb. açılardan (TL, gün vb.) sadece tek bir ölçüyle tanımlanabilir. Çok birimle ifade edilen çok amaçlı bir problemi, doğrusal programlama ile modellemek mümkün değildir (Halaç, 1992, s. 503). Bu nedenle çok amaçlı problemi tek amaçlı bir probleme dönüştürerek çözmek için hedef programlama tekniği kullanılmaktadır. Hedef programlamada birbiriyle çelişen tüm amaçlar için uygun çözüm bulunamayacağından buluna sonuca etkin çözüm olarak adlandırılır (Taha, 2000, s. 343). Hedef programlama matematik programlama türlerine göre; doğrusal (linear) programlama, tam sayılı (integer) programlama ve doğrusal olmayan (nonlinear) programlama olarak sınıflandırılabilir (Hillier ve Liberman, 2001, s. 333). Çok amaçlı birbiriyle çelişen hedefleri olan bir model ağırlık yöntemi ve önleyici yöntemle optimize edilebilir. Bu yöntemlerin her ikisi de, çoklu hedeflerin tek bir amaç fonksiyona dönüştürülmesine dayanır (Taha, 2017, s. 343). Çok amaçlı problemlerin çözümü için geliştirilen hedef programlama tekniğinde sırasıyla; her bir amaç için bir hedef değeri belirlenir, belirlenen bu hedefler modellenerek probleme dâhil edilir ve amaçlar (hedefler) genellikle önem sırasına göre sıralanır. Hedef programlamanın özellikleri genel olarak aşağıda açıklanmıştır.

1. Hedef programlamada amaç hedeflerden istenmeyen sapmaların en küçüklenmesidir.

2. Hedeflerin kısıtlayıcılara göre açıklanması: Bu yaklaşım doğrusal programlamada kullanılır. En önemli (birincil) amaç en iyi (en büyük veya en küçük) yapılırken, diğer bütün hedefler (ikincil) sistem kısıtlayıcıları olarak açıklanır.

3. Tek ölçüye dönüştürme: Bütün hedefler tek bir ölçüye (süre-gün, maliyet-TL vb.) göre açıklanması: Bu durumda bütün çıktılar, alternatiflerin maliyetleri de dâhil olmak üzere, aynı ölçü birimiyle açıklanmalıdır.

4. Hedeflerden birinin diğerleri cinsinden açıklanması (değiş- tokuş): Zaman zaman iki veya daha fazla sayıdaki hedeflerden bir tanesi diğerleri cinsinden açıklanabilir. Bu değiş tokuşla tüm hedefler aynı ölçüyle açıklanmış ve tek ölçüye dönüştürme gerçekleştirilmiş olur (Cinemre, 2011, s. 326).

Hedef programlama tekniğinin en önemli avantajı, çoklu amaçların birlikte ele alınabilmesi ve aynı öncelik düzeyleri haricinde standart bir ölçü birimine gerek duyul-

mamasıdır (Camm, 1996'dan aktaran Atlas, 2008, s. 55). Bahsedilen bu avantajlarının yanı sıra hedef programlama tekniğinin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Karar vericilerin yeterli bilgisi olmadığı durumlarda hedefleri sıralamak zorunda kalması,
- Hedeflerin öncelik düzeylerinin işletmedeki farklı karar vericilere göre farklılık göstermesi.
- Karar vericinin yüksek öncelikli bir hedeften çok az sapmaya izin vererek, düşük öncelikli bir hedefe daha fazla yaklaşmak istemesidir (Sharma, 2008, s. 88; Taha, 2000, s. 311).

Hedef programlamada; bir hedefin üzerinde gerçekleşmesi olan pozitif ( $d^+$ ) sapma ile hedefin altında kalınması olan negatif ( $d^-$ ) sapma değerleri toplamının en küçüklenmesi, bir tek amaç olarak belirlenir (Halaç, 1992, s. 503). Temelde hedef programlama ile amaçlanan, modelin hedeflerini doğrulayacak bir çözüm bulmaktır. Yani hedef programlama ile en iyi çözüm bulunur. Bu nedenle de hedef programla ile bulunan çözümler optimum çözüm olmayabilir (Taha, 2000, s. 313). Hedef programlama modelinin en genel gösterimi aşağıdaki şekilde verilebilir (Render, ve Stair 1987'den aktaran Doğan, Doğan ve Akcan, 2000, s, 236).

$$\text{Min } Z = [p_1 h_1 (d_1^-, d_1^+), p_2 h_2 (d_2^-, d_2^+), \dots, p_k h_k (d_k^-, d_k^+)] \quad (3.1)$$

$$f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, q \quad (3.2)$$

$$g_j(x) + d_j^- - d_j^+ = b_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.3)$$

$$d_i^-, d_i^+, d_j^-, d_j^+ \geq 0 \quad (3.4)$$

Bu modelde,

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  : Karar değişkenlerini,

$p_i$ : i. hedef için karar verici tarafından belirlenmiş önceliği,

$h_i (d_i^-, d_i^+)$  : i. hedef için doğrusal erişim fonksiyonunu,

$d_i^-$ : i. hedeften negatif sapma değerini,

$d_i^+$ : i. hedeften pozitif sapma değerini,

$d_j^-$ : j. kaynaktan negatif sapma değerini,

$d_j^+$ : j. kaynaktan pozitif sapma değerini,

k: Hedef sayısını,

$f_i$ : i. amaç fonksiyonunu,

$b_i$ : i. amaç fonksiyonu için karar verici tarafından belirlenmiş hedefi,

$g_j$ : j. kaynak kısıtını,

$b_j$ : j. kısıtın sağ taraf değerini,

q: Amaç fonksiyonlarının sayısını,

n: Kaynak kısıt sayısını, ifade etmektedir.

Hedef programlama doğrusal programlama ile aynı şekilde kullanılabilir, ancak hedef programlama belirlenen hedeflerden sapmaları içerir. Hedeflerin optimizasyonu, verilen kısıtlara ve önem/önceliklere göre hedeflerdeki sapmaların en aza indirilmesiyle yapılır. Sapmalar pozitif veya negatif olabileceğinden, problemin matematiksel modeli kurulurken her iki durumun da modelde yer alması gerekir. Bu sapmalar ağırlıklandırılarak belirlenecek farklı hedefler için model oluşturulabilir. Buna göre hedef programlama modelinin matematiksel diğer bir gösterimi ise aşağıda verilmiştir (Sharma, 2008, s. 88-89):

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n w_i (d_i^+ + d_i^-) \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j (d_i^- - d_i^+) = b_i \quad (3.6)$$

i: 1,2,3,.....,n

j: 1,2,3,.....,m

$x_j, d_i^+, d_i^- \geq 0$ , (Pozitif olma şartı)

$d_i^+ \times d_i^- = 0$  (Sapma değerlerinden en az birinin sıfır olma şartı)

Bu modelde;

$d_i^-$ : i. hedeften negatif sapma değerini,

$d_i^+$ : i. hedeften pozitif sapma değerini,

$b_i$ : i. amaç fonksiyonu için karar verici tarafından belirlenmiş hedefi,

$w_i$ : Hedefler için belirlenen ağırlık katsayısını,

$x_j$  ve  $a_{ij}$  = Karar değişkenlerinin katsayılarını ifade etmektedir.

Hedeflerin aynı seviyede gerçekleştirilmeyecek olması durumunda modele sapma değerleri  $d_i^+$  ve  $d_i^-$  için öncelik p ( $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$ ) faktörü eklenir.

### 3.2. Hedef Programlama Türleri

Hedef programlama, geliştirilen amaç fonksiyonunun yapısına göre;

- Tek hedefli programlama,
- Eşit ağırlıklı çok hedefli programlama,

- Ağırlıklı çok hedefli programlama,
- Öncelikli çok hedefli programlama,
- Ağırlıklı-öncelikli çok hedefli programlama,

olarak beş grupta sınıflandırılabilir. Hedef programlama türlerinin matematiksel modellerle gösterimi aşağıda açıklanmıştır. (Öztürk, 2016, s. 266-285).

**a. Tek hedefli programlama:** Karar vericinin tarafından ele alınan problemin tek hedefli olduğu, en basit hedef programlama problemidir.

$$\text{Min } Z = d^+ \text{ veya } d^- \quad (3.7)$$

**b. Eşit ağırlıklı çok hedefli programlama:** Probleme ilişkin hedeflerin eşit önemli (ağırlıklı) olduğu hedef programlama problemidir. Burada amaç, sapma değişkenlerinin toplamı biçiminde ifade edilen amaç fonksiyonunun minimum yapan çözüme ulaşılmasıdır. Amaç fonksiyonunun anlamlı olabilmesi için sapma değişkenlerinin aynı birimde (gün, TL vs.) olması gerekmektedir.

$$\text{Min } Z = d_1^+ + d_2^- + d_3^+ + \dots \quad (3.8)$$

**c. Ağırlıklı çok hedefli programlama:** Eşit ağırlıklı çok hedefli problemlerin sapma değişkenlerinin farklı ölçü birimlerinde olduğu durumlarda amaç fonksiyonundaki sapma değişkenlerine ağırlık değeri verilmesi ile oluşturulan hedef programlama problemidir. Amaç hedeflerden sapmaların ağırlıklı toplamının en küçüklenmesidir.

$$\text{Min } Z = 2d_1^+ + 5d_2^- + d_3^+ + \dots \quad (3.9)$$

**d. Öncelikli çok hedefli programlama:** Matematiksel optimizasyon modelleri kullanırken amaç fonksiyonunu en iyileyen birçok seçenekten birinin seçimi durumu ile karşılaşıldığında bu tür problemler öncelikli çok hedef programlama ile çözülür. Hedefler arasındaki önceliklerin sayısal veya sözel olarak sıralanması mantığına dayanır. Birinci öncelik hedef tam olarak gerçekleşmeden ikinci hedefe, ikinci hedef gerçekleşmeden sonrakine geçilmez. Hangi hedefin önce gerçekleştirileceği  $p_i$  ile gösterilir.

$$P_1 \geq P_2 \geq P_3 \geq P_4 \geq P_5 \dots \geq P_n$$

$$\text{Min } Z = p_1 d_1^+ + p_2 d_2^- + p_3 d_3^+ + \dots \quad (3.10)$$

*e. Ağırlıklı-öncelikli çok hedefli programlama:* Önceliklerin aynı olduğu sapma değişkenlerinden hangi sapmanın daha önemli olduğunun belirtilmesi için kullanılır. Yani, sapma değişkenlerini önceliği (p) ise, bu sapma değişkenlerde ağırlıklar kullanılarak hangi sapmanın daha önemli olduğu belirlenir.

$$P_1 \geq P_2 \geq P_3 \geq P_4 \geq P_5 \dots \geq P_n$$
$$\text{Min } Z = p_1 3d_1^+ + p_2 5d_2^- + p_3 d_3^+ + \dots \quad (3.11)$$

Bu araştırmada belirlenen hedeflere ağırlık ve öncelik verilmediğinden “eşit ağırlıklı çok hedefli programlama” türü kullanılmıştır.

### **3.3. Alanyazın Araştırması (Hedef Programlama ile Proje Planlama)**

Hedef programlama, doğrusal programın çok amaçlı ve esnek kısıtlı problemlerin çözümünde yetersiz kalması sonucunda 1950’li yıllarda Charnes ve Cooper tarafından geliştirilmiştir. Ijiri (1965), modeli çeşitli hedefler için uygun önceliklere ve aynı öncelikli hedefler için ağırlıklarına göre geliştirmiştir. Daha sonra Lee (1972) ve Ignizio (1976) tarafından yapılan çalışmalarda, hedef programlamanın geniş kapsamlı uygulamalarıyla ilgilenmiştir (Sharma, 2008, s. 87). Sonraki yıllarda Ignizio, Tamiz, Romero ve diğerleri tarafından tamsayı ve doğrusal olmayan hedef programlama modelleri geliştirilmiş ve hedef programlamaya dualite kavramı dâhil edilmiştir. Hedef programlama modelinde yer alan kesin parametrelerdeki belirsiz bilgileri göstermek amacıyla 1980’lerin başında bulanık kümeler kullanılmış, sonraları karar vericinin tercihinin göre doyum derecesini göstermek için bulanık hedef programlama modelleri geliştirilmiştir (Öztürk, 2009, s. 275).

Atlas ve Keçek (2000) tarafından bir seramik işletmesinde yapılan “Hedef programlama ve bir seramik işletmesinde uygulama denemesi” konulu çalışmasında, çoklu ve birbiriyle çelişen 8 adet öncelikli hedef ve kısıtlayıcılar belirlenerek bir doğrusal hedef programı modeli kurulmuştur. Modelin çözümü sonucunda tüm hedeflere ulaşıldığı görülmüştür. Modelde yöneticilere, hedeflerin farklı önceliklerine yönelik farklı seçenekler sunulmuş ve bu seçeneklere göre yeni sonuçlar elde edilmiştir. Karar vericilerin, üretilmesi gereken miktarlar, değişen talepler ve hedeflere ait verileri modele ekleyip çıkartarak yeni çözümler elde edebileceği gösterilmiştir.

Vatansever (2008), “Proje planlamasında bulanık hedef programlama yaklaşımı” konulu yüksek lisans çalışmasında, kritik yol ve bulanık hedef programlama teknikleri, ayakkabı üretimi yapan bir firmanın üreteceği yeni bir ayakkabı modeli üretim projesinde uygulanmıştır. Bulanık hedef programlama tekniğinde zaman ve maliyet hedefleri belirlenerek sonuçlar mevcut proje planlama tekniğinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre; hedef programlama (HP) modeli ile bulanık hedef programlama (BHP) modeli arasında ilk bakışta pek bir fark görülmemiştir. Ancak BHP modelinin hedefleri en yüksek başarı düzeyiyle sağlamayı amaçlaması, karar vericinin hedefin ne kadar uzağında kaldığını görebilmesi ve karar vericilere iyileştirme olanağı sunması bakımından, BHP modelinin HP modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

Çetin (2008), “PERT modellerinin hedef programlama ile hızlandırılması ve inşaat sektörüne bir uygulama” konulu yüksek lisans tezi çalışmasında normal süresi 57 gün, sözleşme bedeli 107.749,30 YTL olan bir inşaat projesi ele alınarak zaman ve maliyet açısından en uygun çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmada ilk önce CPM-PERT proje yönetim tekniği ile sonrasında ise doğrusal hedef programlama tekniği uygulanarak LINDO paket programı ile proje süresi hesaplanmış ve hızlandırma işlemi yapılmıştır. PERT tekniği ile proje süresi 20,5 gün olarak belirlenmiş, iki kere yapılan sonucunda süre 19,6 güne düşürülmüş ancak proje maliyetinin 110.999,30 YTL’ye yükseldiği belirlenmiştir. Sonrasında proje firma kârının en büyüklenmesi, proje maliyetinin ve süresinin en küçüklenmesi şeklindeki üç amacın gerçekleştirilmesine yönelik doğrusal hedef programlama modeli oluşturularak LINDO paket programı ile analiz yapılmıştır. Çalışma sonucunda, PERT modelinin hedef programlama ile hızlandırılması amacıyla 1. hızlandırma ve 2. hızlandırma şeklinde modeli ve projenin gerçekleştirme süresi ile maliyeti arasındaki ilişkiyi belirlemeye yönelik bir doğrusal hedef programlama modeli geliştirilmiştir.

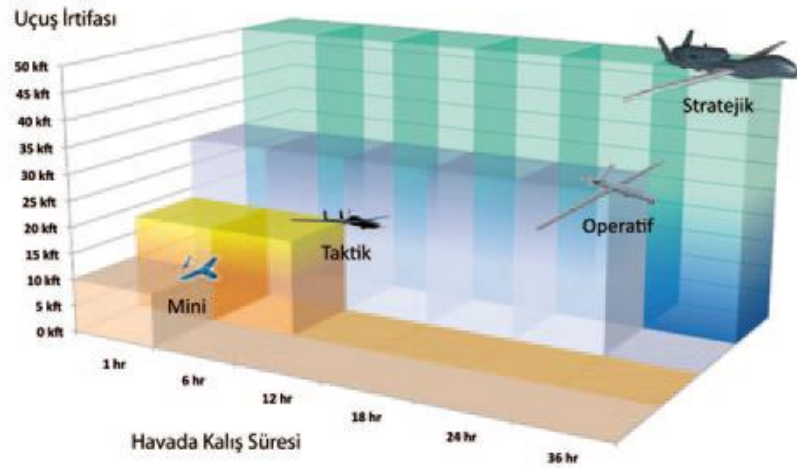
Öztürk (2019), “PERT tabanlı proje planlamasında hedef programlama: Sağlık sektöründe bir uygulama” konulu yüksek lisans çalışmasında Ankara Halk Sağlığı Müdürlüğü’ne bağlı Toplum Sağlığı Merkezi Entegre Devlet Hastanesinin bilgi işlem altyapısının oluşturulması projesi PERT ve hedef programlama teknikleri kullanılarak yönetilmiştir. 26 faaliyetten oluşan sağlık tesisinin internet altyapısının gereksinimlerine uygun şekilde hazırlanması projesi önce PERT ile yönetilmiştir. Sonrasında hedef programlama yöntemi kullanılarak problem tekrar çözülmüştür. Problem WINQSB programı

kullanılarak PERT ile çözülmüş, kritik yol bulunmuş ve projenin toplam tamamlanma süresi 251,83 saat olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, belirlenen kısıtlar altında proje hedef programlama yöntemi kullanılarak tekrar ele alınmıştır. Hedef programlamada, kritik yolun ve kritik faaliyetlerin sürelerinin aynı kalması ve projenin tamamlanma süresinin PERT ile hesaplanan süreyi aşmaması hedefleri belirlenerek bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan hedef programlama modelinin WINQSB programı ile yapılan analizi sonucunda belirlenen hedeflere ulaşıldığı, sonuçların PERT ile hesaplanan sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür.

## 4. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) YAPIMININ PERT VE HEDEF PROGRAMLAMA İLE PLANLANMASI

### 4.1. Uygulama Alanının Tanıtımı

Geçtiğimiz yüzyılda malzeme, aerodinamik, yakıt teknolojileri gibi bilimsel ve teknik gelişmeler kendini gösterdiği alan otomotiv sektörüydü. Günümüzde ise otomotivin yerini geçtiğimiz yüzyılda ivmelenen İHA çalışmaları almıştır. Malzeme, elektronik, aerodinamik, kontrol yazılımları, ergonomi alanlarındaki en son gelişmeler bir İHA sisteminin geliştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Birbirinden oldukça farklı teknoloji bileşenlerinin İHA sistemlerinde buluşmasının temel nedeni, görevi gerçekleştiren en az bir hava aracı, hava aracının kontrol edildiği komuta / kontrol birimi ve bu iki birim arasında haberleşmeyi sağlayan veri bağına birlikte “sistemler sistemi” oluşturmasıdır. Farklı amaçlara hizmet için tasarlanan ve üretilen İHA sistemleri ağırlığı, havada kalış süresi ile uçuş irtifasına göre Görsel 4.1’de görüleceği üzere; mini, taktik, operatif ve stratejik olarak sınıflandırılırlar. Bu araştırmanın konusu olan mini İHA sistemleri; suçluların takibinin yapılmasından, geleneksel kayıt / yayın araçlarının giremediği kalabalıkların görüntülenmesine, kimyasal, biyolojik, radyoaktif ve nükleer tehlike bulunan bölgelerden veri alınmasından, insanlı araçların ulaşamadığı bölgelere yardım kargolarının iletilmesine kadar geniş kullanım alanı vardır (Haser, 2010, s. 33-34).



Görsel 4.1. Sınıflarına Göre İHA Çeşitleri

Bu çalışmada son zamanlarda ülkemizde ve dünyada askeri ve sivil alanda kullanımını ve önemi hızla artan İnsansız Hava Araçları (İHA) uygulama alanı olarak seçil-

miş ve Görsel 4.2’de gösterilen mini İHA yapımının planlanma süreci incelenmiştir. Mini İHA yapımında; 3 mühendis, 2 teknisyen ve 1 pilot görev almıştır. Yapım işi için; 2 kamera, 1 GPU (Graphics Processing Unit) donanımlı sunucu bilgisayar, telemetri sistemi, görüntü aktarma sistemi, kumanda sistemi, 2 İHA gövdesi, servo motorlar, 1 İHA motoru, batarya, uçuş kontrol kartı, kablolar ile 2 dizüstü bilgisayar, takım avadanlık, uçuş alanı, bilgisayar laboratuvarı ile montaj atölyesi kullanılmıştır.



**Görsel 4.2.** Yapım Aşaması Tamamlanmış İHA

#### **4.2. İnsansız Hava Aracı (İHA) Yapımının PERT ile Planlanması**

Çok sayıda faaliyetten oluşan bir projenin en kısa sürede ve en az maliyetle gerçekleştirilmesi için yapılması gerekli olan faaliyetlerin; süresini, başlangıcını, tamamlanmasını, sırasını, birbiriyle olan mantıksal ilişkisini kolaylıkla gösterebilmek amacıyla şebeke analiz teknikleri kullanılmaktadır. Bu nedenle mini insansız hava aracı (İHA) yapım süreci şebeke analizi ile incelenmiştir. Yapım sürecindeki faaliyet süreleri tahmini olarak bilindiğinden araştırmada, şebeke analizi tekniklerinden biri olan PERT tekniği kullanılmıştır.

Araştırmanın ilk aşamasında yapım sürecinde gerçekleştirilecek faaliyetler ve bu faaliyetlerin öncelik ilişkileri belirlenmiştir. İkinci aşamada proje ekibinden alınan bilgilerle her bir faaliyet için en iyimser, en kötümser ve en yüksek olasılıklı süre tahminleri yapılmıştır. Sonrasında beta dağılımına uygun olan bu üç süreden yola çıkarak her bir faaliyetin ortalama süreleri hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada; faaliyetler, faaliyetlerin öncelik ilişkileri, faaliyetlerin en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser sürelerinden oluşan veriler WINQSB programına girilerek analiz yapılmıştır. Programa girilen verilerin analizi sonucunda projenin; toplam tamamlanma süresi, kritik faaliyetleri, kritik yolu, faaliyetlerin standart sapması, projenin varyansı ile maliyeti hesaplanmıştır. Dördüncü aşamada hızlandırma işlemi yapılmıştır. Bunun için öncelikle hızlandırılacak 8 adet faaliyet belirlenmiş, bunlardan kritik yol üzerinde yer alan 6 adet faaliyete hızlandırma işlemi yapılmıştır. 2 adet faaliyet kritik yol üzerinde yer olmadığından bu

iki faaliyete hızlandırma işlemi yapılmamıştır. Hızlandırma işleminde; en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser sürelerden faydalanılarak hesaplanan faaliyetlerin ortalama süreleri kullanılmıştır.

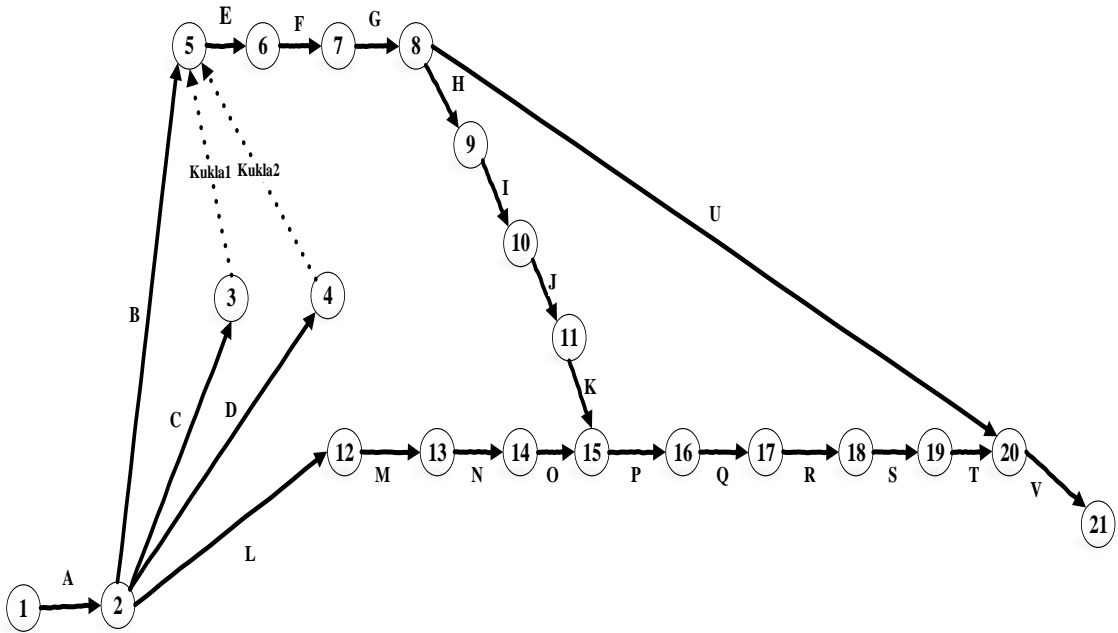
#### 4.2.1. Verilerin toplanması ve şebeke diyagramının oluşturulması

Mini İHA yapımında gerçekleştirilmesi planlanan faaliyetler ve faaliyet öncelikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Buna göre yapım sürecinde A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-L-M-N-O-P-Q-R-S-U-V olarak adlandırılan 22 faaliyetin gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

**Tablo 4.1** Faaliyetler ve Faaliyetlerin Öncelik İlişkileri

<b>Faaliyet Adı</b>	<b>Faaliyetler</b>	<b>Faaliyet Önceliği</b>
<b>A</b>	İHA'nın kullanım amacının belirlenmesi (Keşif, gözetleme, fotoğraf, imha vs.)	-
<b>B</b>	Uçuş kontrol kartının belirlenmesi	<b>A</b>
<b>C</b>	Kameranın ve görüntü aktarma sistemi gibi yan donanımların belirlenmesi	<b>A</b>
<b>D</b>	Kumanda ve telemetri sisteminin belirlenmesi	<b>A</b>
<b>E</b>	Güç ihtiyacına göre batarya kapasitesinin belirlenmesi ve batarya seçimi	<b>B, C, D</b>
<b>F</b>	Toplam ağırlığa ve amaca göre İHA platformunun ve motorunun belirlenmesi	<b>E</b>
<b>G</b>	İhtiyaç duyulan malzemelerin tedariki	<b>F</b>
<b>H</b>	İHA'nın gövde montajı (kamera ve görüntü aktarma sistemi olmadan)	<b>G</b>
<b>I</b>	Uçuş öncesi yer kontrolleri (kamera ve görüntü aktarma sistemi olmadan)	<b>H</b>
<b>J</b>	İlk uçuş denemesinin yapılması ve uçuş parametrelerinin ayarlanması	<b>I</b>
<b>K</b>	Otonom ve diğer uçuş modlarının denenmesi	<b>J</b>
<b>L</b>	Görüntü işleme yazılımının hazırlanması	<b>A</b>
<b>M</b>	Yer istasyon kontrol yazılımının hazırlanması	<b>L</b>
<b>N</b>	Yan donanımların (kamera ve görüntü aktarım) montajı ve yazılım entegrasyonu	<b>M</b>
<b>O</b>	Tam donanımlı olarak yerde yazılım denemelerinin yapılması	<b>N</b>
<b>P</b>	Tam donanımlı olarak ikinci test uçuşunun yapılması	<b>K, O</b>
<b>Q</b>	İHA sistemiyle verilerin toplanması (İHA'nın amacına yönelik kullanımı)	<b>P</b>
<b>R</b>	Yeni verilerle görüntü ve yer kontrol yazılımlarının iyileştirilmesi	<b>Q</b>
<b>S</b>	İHA donanımlarının kullanıcının kolay kullanımı için düzenlenmesi, iyileştirilmesi	<b>R</b>
<b>T</b>	Kullanıcı el kitabının hazırlanması	<b>S</b>
<b>U</b>	İHA ve yan donanımlarının koruma ve taşıma amaçlı çantaların hazırlanması	<b>G</b>
<b>V</b>	İHA'nın teslimi	<b>T,U</b>

Yapım süreci için planlanan 22 faaliyet ile bu faaliyetlerin birbiriyle olan mantıksal ilişkileri için şebeke diyagramı oluşturulmuştur. Şebeke diyagramı oluşturulurken, önceki bölümlerde bahsedilen avantajlardan dolayı bağlantı şemaları (AOA) gösterimi kullanılmıştır. Oluşturulan şebeke diyagramı Şekil 4.1’de görülmektedir. Şekilde de görüleceği üzere şebeke diyagramı çiziminde oklarla gösterilen 22 adet faaliyetin yanı sıra, iki adet kukla faaliyet ve 21 adet olay (düğüm) kullanılmıştır. İlk olarak araştırmacı tarafından derlenen ve araştırmanın bir parçası olan, anket veya görüşme şeklinde toplanan veriler birincil veriler, başka kişi veya kurumlarca toplanan veriler ise ikincil veriler olarak sınıflandırılmaktadır (Atlas, 2003, s. 35). Bu çalışmada kullanılan süreler ve diğer veriler birincil veriler olarak, mini İHA yapımında görev alan bu konuda uzman proje ekibinin görüşleri doğrultusunda derlenmiştir.



Şekil 4.1. Faaliyetlerin Öncelik İlişkilerinin Şebeke Diyagramında Gösterimi

22 adet faaliyet için belirlenen üç tahmini süre (En iyimser-a, en yüksek olasılıklı-m ve en kötümser süre-b) Tablo 4.2’de verilmiştir. Faaliyet süreleri tahmini olarak belirlendiği için yapım işinin toplam tamamlanma süresi kesin olarak bilinmemektedir.

Tablo 4.2'deki veriler kullanılarak ikinci bölümde anlatılan aşağıdaki denklem ile faaliyetlerin ortalama süreleri hesaplanmıştır. Örneğin "A" faaliyeti için ortalama süre  $(3+ 4 \times 4+ 7)/6= 4,333$  şeklinde hesaplanmıştır.

$$\text{Faaliyetlerin ortalama süresi: } \bar{x} = \frac{a+4m+b}{6}$$

**Tablo 4.2.** Faaliyetlerin Üç Tahmini Süreleri

Faaliyet Adı	En İyimser Süre- a (gün)	En Yüksek olasılıklı Süre –m (gün)	En Kötümser Süre –b (gün)
A	3	4	7
B	1	2	3
C	2	4	5
D	2	3	4
E	1	2	3
F	2	4	6
G	21	30	50
H	3	4	5
I	1	2	3
J	2	4	5
K	1	3	4
L	20	30	40
M	20	30	40
N	5	8	11
O	5	8	11
P	4	7	13
Q	10	12	16
R	10	13	19
S	2	3	4
T	15	18	20
U	3	5	7
V	2	3	5

Aynı şekilde hesaplanan tüm faaliyetlerin ortalama süreleri Tablo 4.3’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.3.** Üçlü Tahmini Süreler ve Hesaplanan Ortalama Süreler

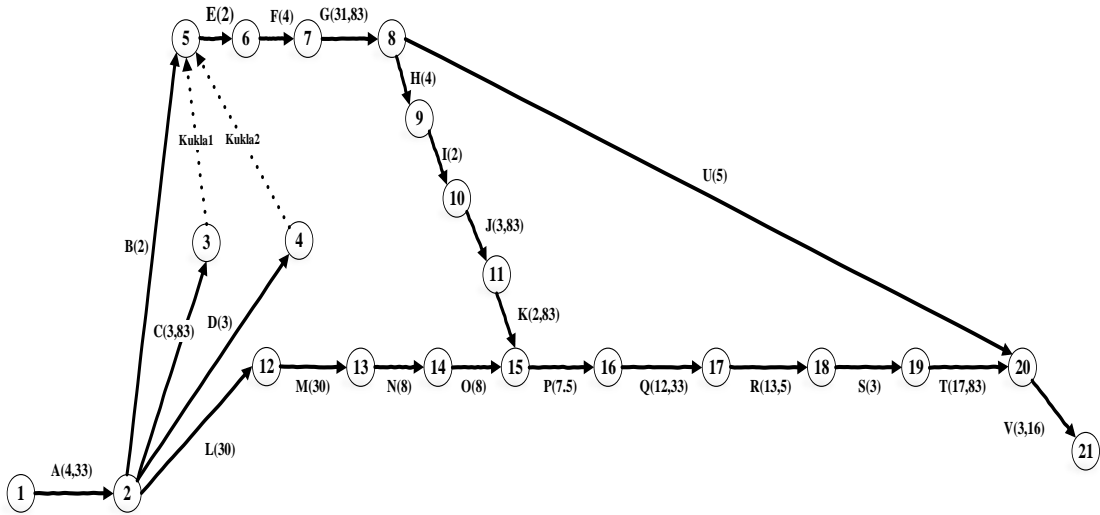
Faaliyet Adı	En İyimser Süre- a (gün)	En Yüksek Olasılıklı Süre -m (gün)	En Kötümser Süre -b (gün)	Ortalama süre $\bar{x}=(a+4m+b)/6$
A	3	4	7	4,333
B	1	2	3	2,000
C	2	4	5	3,833
D	2	3	4	3,000
E	1	2	3	2,000
F	2	4	6	4,000
G	21	30	50	31,833
H	3	4	5	4,000
I	1	2	3	2,000
J	2	4	5	3,833
K	1	3	4	2,833
L	20	30	40	30,000
M	20	30	40	30,000
N	5	8	11	8,000
O	5	8	11	8,000
P	4	7	13	7,500
Q	10	12	16	12,333
R	10	13	19	13,500
S	2	3	4	3,000
T	15	18	20	17,833
U	3	5	7	5,000
V	2	3	5	3,167

#### 4.2.2. İHA yapımının PERT ile analizi

Önceki bölümlerde açıklandığı üzere daha önce tecrübe edilmiş, tekrarlanan ve faaliyet sürelerinin kesin olarak bilinebildiği projelerde CPM tekniği, daha önce tekrarlanmamış, ilk defa yapılacak olan ve faaliyet sürelerinin bilinemediği projelerde PERT

tekniki kullanılmaktadır. Mini İHA yapım planlaması da daha önce tekrarlanan bir proje olmadığından faaliyet süreleri kesin olarak bilinmemektedir. Bu nedenle de araştırmanın analiz aşamasında sürelerin tahmini olarak bilinebildiği durumlar için başvuru olan PERT tekniği kullanılmıştır. Tablo 4.1 ve 4.2’de verilen; faaliyetlerin süreleri, faaliyetler arası mantıksal ilişkiler ile en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser süreler WINQSB programına EK-1 gösterildiği şekilde girilmiş ve PERT tekniği ile analiz başlatılmıştır. Tablodaki birinci sütun (Activity Name) faaliyetin adını, ikinci sütun (Immediate Predecessor) ilgili faaliyetten önce gerçekleşmesi gereken faaliyeti (öncelikli faaliyet), üçüncü sütun en iyimser süreyi (Optimistik time-a), dördüncü sütun en yüksek olasılıklı süreyi (Most likely time-m) ve son sütun ise en kötümser süreyi (Pessimistic time-b) göstermektedir.

PERT’de kullanılan üç sürenin beta dağılımına göre hesaplanan ortalama süreleri ( $\bar{x}$ ) ve faaliyetlerin birbirleriyle olan mantıksal ilişkileri Şekil 4.2’deki (EK-2) şebeke diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.2’de görüleceği üzere kukla faaliyetler için herhangi bir zaman ve kaynak kullanımı söz konusu olmadığından ortalama süreleri de bulunmamaktadır.



Şekil 4.2. Faaliyet ve Ortalama Sürelerin Şebeke Diyagramında Gösterimi

WINQSB programı ile analizi yapılmış ve EK-3’deki sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre EK-3’de verilen tabloda; tüm faaliyetlerin ortalama tamamlanma süreleri (Activity Mean Time), En Erken Başlama-EB (Earliest Start-ES), En Geç Başlama-GB (Latest Start-LS), En Erken Tamamlama-ET (Earliest Finish-EF) ve En Geç Tamamla-

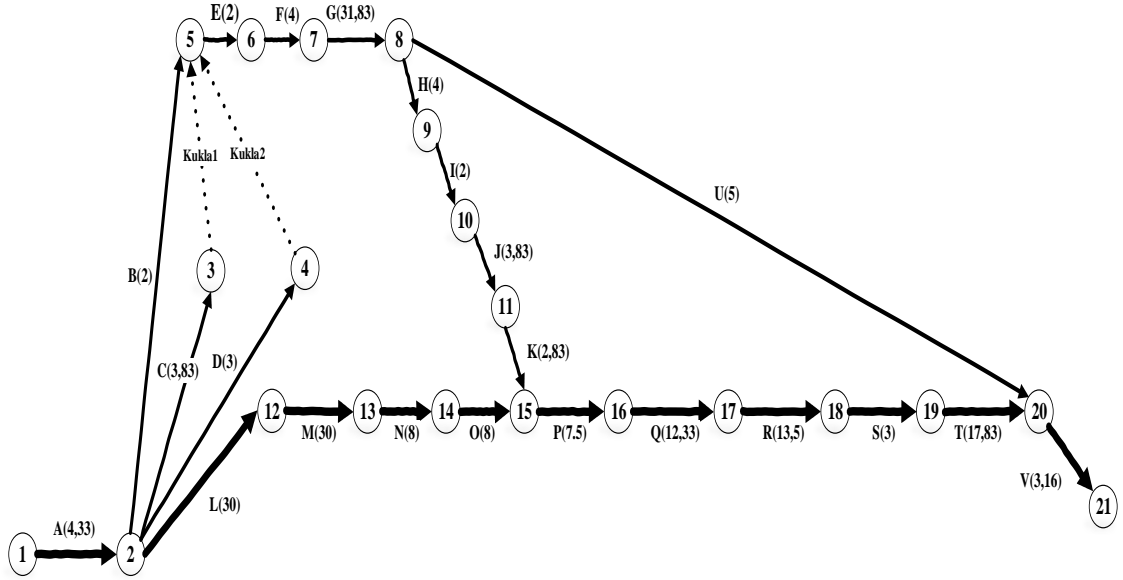
ma-GT (Lastest Finish-LF) zamanları, faaliyetlerin boşluk / bolluk değerleri (Slack/LS-ES), standart sapmaları (Standart Deviation), projenin beklenen tamamlanma süresi (Project Completion Time) ve projenin kritik yol sayısı (Number of Critical Paths) gösterilmektedir. Bununla birlikte hangi faaliyetlerin kritik yol üzerinde bulunduğu da (On Critical Path) “Yes-no” şeklinde tabloda belirtilmiştir. Tablonun ikinci sütunu (On Critical Path) ile kesişen satırlardaki “Yes” ifadesi, ilgili faaliyetin kritik yol üzerinde bulunduğunu, “no” ise kritik yol üzerinde bulunmadığını ifade etmektedir. Ayrıca tabloda, “Yes” ile belirtilen kritik faaliyetlerin boşluk değerinin (Slack ; LS - ES) sıfır (0), kritik olmayan faaliyetlerin ise 21,667 ile 83,5 gün arasında olduğu da görülmektedir. EK-3’deki tabloda; En Erken Başlama (EB): Earliest Start-ES, En Geç Başlama (GB): Latest Start-LS, En Erken Tamamlama (ET): Earliest Finish-EF, En Geç Tamamlama (GT): Lastest Finish-LF olarak ifade edilmektedir.

Bu hesaplamalara ek olarak WINQSB programı ile yapım sürecinin tamamlanma süresi ve standart sapması hesaplanmıştır. Buna göre; projenin tamamlanma süresi 137,67 gün, standart sapması ise 5,59 olarak hesaplanmış ve kritik yol Tablo 4.4’de gösterilen A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V faaliyetleri olarak belirlenmiştir.

**Tablo 4.4. Kritik Faaliyetler**

<b>Faaliyet Adı</b>	<b>Faaliyetler</b>
<b>A</b>	İHA'nın kullanım amacının belirlenmesi (Keşif, gözetleme, fotoğraf, imha vs.)
<b>L</b>	Görüntü işleme yazılımının hazırlanması
<b>M</b>	Yer istasyon kontrol yazılımının hazırlanması
<b>N</b>	Yan donanımların (kamera ve görüntü aktarım) montajı ve yazılım entegrasyonu
<b>O</b>	Tam donanımlı olarak yerde yazılım denemelerinin yapılması
<b>P</b>	Tam donanımlı olarak ikinci test uçuşunun yapılması
<b>Q</b>	İHA sistemiyle verilerin toplanması (İHA'nın amacına yönelik kullanımı)
<b>R</b>	Yeni verilerle görüntü ve yer kontrol yazılımlarının iyileştirilmesi
<b>S</b>	İHA donanımlarının kullanıcının kolay kullanımı için düzenlenmesi, iyileştirilmesi
<b>T</b>	Kullanıcı el kitabının hazırlanması
<b>V</b>	İHA'nın teslimi

Ayrıca yapım sürecinin A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V faaliyetlerinden oluşan kritik yolu şebeke diyagramı üzerinde kalın çizgilerle Şekil 4.3’de ve EK-4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kritik Yolun Şebeke Diyagramı Üzerinde Gösterimi

#### 4.2.3. Hızlandırma ve hızlandırma maliyeti hesabı

Projelerde öngörülemeyen nedenlerle zaman veya maliyet aşmaları yaşanabilir. Bu durumlarda projenin hızlandırılması gerekebilir. Projenin hızlandırılması, faaliyetlere daha fazla kaynak (işgücü, ekipman, malzeme vs.) tahsis edilerek yapılabilir. Projenin hızlandırılmasında kullanılan ek işgücü ve kaynaklar doğal olarak toplam proje maliyetini de artırmaktadır. Bu noktada bir projede yapılacak hızlandırma işleminde zaman ve maliyet arasındaki denge proje yöneticileri için önemli hale gelmektedir. Araştırmada mini İHA yapım süreci, normal zamanlar kullanıldığında 137,67 günde tamamlanmaktadır. Ancak katılması planlanan yarışma tarihine kadar projenin tamamlanmayabileceği riskine karşılık proje yöneticileri projeyi hızlandırmak istemektedir. Bu nedenle araştırmanın bu bölümünde ne kadarlık bir hızlandırmanın ne kadarlık maliyet getireceğinin tespit edilmesi amacıyla mini İHA yapım sürecine hızlandırma işlemi uygulanmış ve hızlandırma maliyeti hesabı yapılmıştır.

Hızlandırma işleminde kullanılan işgücü ve tahmini işgücü maliyet bilgileri Tablo 4.5’de görülmektedir. Bu tabloda; mühendis “M”, teknisyen “T”, İHA pilotu “P” harfi ile gösterilmiştir. 3 mühendis, 2 teknisyen ve 1 mini İHA pilotundan oluşan çalışma ekibi, günün tamamında değil belirli zamanlarında İHA yapım işinde çalışmaktadır. Bu

nedenle hesaplamalarda bir günlük işgücü maliyeti; mühendis için 40 \$, teknisyen için 20 \$, İHA pilotu için 30 \$ olarak alınmıştır. Her bir faaliyetin işgücü maliyeti, ilgili faaliyetin ortalama süresi ile günlük işgücü maliyeti çarpılarak hesaplanmıştır. “K” faaliyeti örnek verilecek olursa; faaliyetin ortalama süresi 2,833 gün, günlük işgücü maliyeti olan 130 \$ (2 mühendis, 1 teknisyen ve 1 İHA pilotunun günlük maliyeti  $2 \times 40 \$ + 1 \times 20 \$ + 1 \times 30 \$ = 130 \$$ ) ile çarpılması sonucunda “K” faaliyetinin işgücü maliyeti  $2,833 \times 130 \$ = 368 \$$  olarak hesaplanır. Benzer şekilde diğer faaliyetler için de hesaplanan tahmini işgücü maliyetleri Tablo 4.5’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.5.** Faaliyetlerde Kullanılan İşgücü ve Tahmini Maliyetleri

Faaliyet Adı	Faaliyetin Ortalama Süresi (gün)	Faaliyette Kullanılan İşgücü	Faaliyetin İşgücü Maliyeti (\$)
A	4,333	3M	520
B	2,000	3M	240
C	3,833	3M	460
D	3,000	3M	360
E	2,000	3M	240
F	4,000	3M	480
G	31,833	1M, 1T	550
H	4,000	1M, 2T	400
I	2,000	2M, 1T, 1P	260
J	3,833	2M, 1T, 1P	498
K	2,833	2M, 1T, 1P	368
L	30,000	3M	3.600
M	30,000	3M	3.600
N	8,000	1M, 2T	800
O	8,000	3M	960
P	7,500	2M, 1T, 1P	975
Q	12,333	2M, 1T, 1P	1.603
R	13,500	3M	540
S	3,000	2M, 2T	360
T	17,833	3M, 2T	2.853
U	5,000	1M, 2T	400
V	3,167	1M, 2T	253

Mini İHA yapım sürecindeki faaliyetlerin ortalama süreleri, normal işgücü maliyetleri, hızlandırma yapılabilecek faaliyetler, hızlandırılacak süreler ve hızlandırılma maliyetleri Tablo 4.6’da görülmektedir. Hızlandırma işleminde üç tahmini süre (en iyimser, en yüksek olasılıklı, en kötümser) yerine faaliyetlerin ortalama süreleri ( $\bar{x}$ ) kullanılmıştır. 22 faaliyet içerisinde G, H, L, M, N, Q, R ve T faaliyetlerine sırasıyla maksimum 5, 1, 5, 3, 2, 2, 3 ve 2 gün hızlandırma işlemi yapılabileceği belirlenmiştir. İşgücü, tesis vb. kısıtları nedeniyle faaliyetlerin tamamına hızlandırma yapılamamaktadır.

**Tablo 4.6.** Hızlandırılacak Süreler ve Maliyetleri

Faaliyet Adı	Ortalama Süre	Faaliyetin İşgücü Maliyeti (\$/gün)	Hızlandırılabilen Süre (gün)	Birim Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Hızlandırılmış Maliyet (\$/gün)
A	4,333	520	0	0	0	520
B	2,000	240	0	0	0	240
C	3,833	460	0	0	0	460
D	3,000	360	0	0	0	360
E	2,000	240	0	0	0	240
F	4,000	480	0	0	0	480
G	31,833	550	5	80	400	950
H	4,000	400	1	130	130	530
I	2,000	260	0	0	0	260
J	3,833	498	0	0	0	498
K	2,833	368	0	0	0	368
L	30,000	3.600	5	140	700	4.300
M	30,000	3.600	3	120	360	3.960
N	8,000	800	2	110	220	1.020
O	8,000	960	0	0	0	960
P	7,500	975	0	0	0	975
Q	12,333	1.603	2	90	180	1.783
R	13,500	540	3	60	180	720
S	3,000	360	0	0	0	360
T	17,833	2.853	2	160	320	3.173
U	5,000	400	0	0	0	400
V	3,167	253	0	0	0	253

Önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere hızlandırma işlemi sadece kritik yol üzerindeki faaliyet sürelerinde yapılmaktadır. Kritik olup olmadığına bakılmaksızın hızlandırılabilir bütün faaliyetler hızlandırılırsa bu şekilde yapılan bir hızlandırma işlemi gereksiz maliyet artışına neden olacaktır. Bu nedenle de hızlandırma yapılabilecek faaliyetler arasında yer alan ancak kritik yol üzerinde bulunmayan G ve H faaliyetlerine (kritik faaliyete dönüşmediği sürece) hızlandırma işlemi yapılmayacak, hızlandırma işlemi sadece kritik yol üzerinde bulunan faaliyetlere yapılacaktır.

Hızlandırma işlemi yapılabilecek olan faaliyetler Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Buna göre, kritik yol üzerinde bulunan 1, 3, 4, 5, 7 ve 8. sıradaki L, M, N, Q, R ve T faaliyetleri hızlandırılabilir faaliyetler olarak belirlenmiştir. Bu faaliyetlere sırasıyla 5, 3, 2, 2, 3 ve 2 gün hızlandırma işlemi yapılacaktır. Tabloda 5 gün hızlandırılabilir olan 2. sıradaki G faaliyeti ile 1 gün hızlandırılabilir olan 6. sıradaki H faaliyeti, kritik yol üzerinde olmadığından ve hızlandırma işlemi esnasında kritik faaliyete dönüşmediğinden, her iki faaliyete de hızlandırma işlemi uygulanmamıştır. Hızlandırma işlemi birim hızlandırma maliyeti en düşükten en yükseğe doğru (minimum maliyet koşulu çerçevesinde) sırasıyla R, Q, N, M, L ve T olacak şekilde yapılacaktır. Buradan hareketle hızlandırma işlemine minimum maliyet koşulu çerçevesinde 60 \$ ile en düşük birim hızlandırma maliyetine sahip olan R faaliyeti ile başlanmıştır.

**Tablo 4.7.** Hızlandırma İşlemi Yapılabilir Faaliyetlerin Hızlandırma Sıralaması

Hızlandırma Sırası	Faaliyet Adı	Hızlandırılabilen Süre (gün)	Birim Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Toplam Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Kritiklik Durumu
1	R	3	60	180	Kritik
2	G	5	80	400	Kritik değil
3	Q	2	90	180	Kritik
4	N	2	110	220	Kritik
5	M	3	120	360	Kritik
6	H	1	130	130	Kritik değil
7	L	5	140	700	Kritik
8	T	2	160	320	Kritik

Hızlandırma işlemi için Tablo 4.7'deki faaliyetler, faaliyetlerin öncelik ilişkileri, faaliyetlerin ortalama süreleri (Normal Time), faaliyetlerin hızlandırma sonucundaki süreleri (Crash Time), normal maliyet (Normal Cost) ve hızlandırılmış maliyeti (Crash Cost) verileri EK-5'de gösterildiği gibi WINQSB programında girilmiş ve hızlandırma işlemi sırasıyla R, Q, N, M, L ve T faaliyetleri için yapılmıştır. Burada hızlandırma maliyetini gösteren Crash cost; normal maliyete hızlandırma maliyetinin eklenmesiyle programa girilir. Örneğin "L" faaliyetinin normal süresi 30 gün, normal maliyeti 3600 \$'dır. Birim hızlandırma maliyeti 140 \$, 5 günlük (30 gün- 25 gün) hızlandırma maliyeti ise 700 \$'dır. Hızlandırma maliyeti (Crash Cost) 3600 \$ +700 \$ =4.300 \$, hızlandırılmış süresi ise 25 gün olarak programa girilmiştir. Diğer faaliyetlerin hızlandırma süreleri ve hızlandırma maliyetleri benzer şekilde programa girilmiştir. Önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde, PERT'de hızlandırma işlemi uygulanırken şebekenin olasılıklı yapısı deterministik bir yapıya dönüşmekte, hızlandırma işleminde üç tahmini süre (en iyimser, en yüksek olasılıklı, en kötümser) yerine bu sürelerin ortalaması olan tek bir süre [Faaliyetlerin ortalama süreleri (Normal Time)] kullanılmaktadır.

Hızlandırma işlemi sonucunda EK-6'da gösterilen veriler elde edilmiştir. Buna göre hızlandırma işlemi kritik yol üzerindeki maliyeti minimize eden R, Q, N, M, L ve T faaliyetlerine sırasıyla uygulanmıştır. Normal tamamlama süresi 137,67 gün ve normal tamamlanma süresindeki maliyeti 20.320 \$ olan yapım işinin kritik yol üzerinde yer alan hızlandırılabilir tüm faaliyetlerine hızlandırma işlemi yapıldıktan sonra projenin tamamlanma süresi 17 gün erkene çekilerek projenin yeni tamamlanma süresi 120,67 gün olmuştur. Ancak 17 gün hızlandırma sonucunda 1.960 \$ maliyet artışı ile projenin hızlandırılmış maliyeti toplamda 22.280 \$'a yükselmiştir.

Yapım işinin 17 gün (137,67 günden 120,67 güne kısaltılması) hızlandırılması sonucunda oluşan yeni faaliyet süreleri ve ek maliyetler EK-7'de verilmiştir. Burada önceki tablolardan farklı olarak hızlandırma sonucunda oluşan faaliyetlerin yeni süreleri (Suggested Time) ile ek maliyetlilerini gösteren (Additional Cost) sütunlar bulunmaktadır. Her iki sütundaki değerlerin Tablo 4.5'de verilen hızlandırılabilir süreler ve maliyetler ile örtüştüğü görülmektedir. Hızlandırılabilir tüm sürelerin hızlandırılması ile 1.960 \$ ek maliyet olduğu tabloda da görülmektedir.

Hızlandırma işlemi sonucunda A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V faaliyetlerinden oluşan kritik yol değişmemiştir.

Hızlandırma işlemi maliyet artışını da beraberinde getireceğinden, hızlandırma işleminin, hangi faaliyet hızlandırıldığında yeni proje maliyetinin ne olacağı Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.8.** Hızlandırma Sonrasındaki Yeni Proje Süreleri ve Maliyetleri

Hızlandırma Sırası	Faaliyet Adı	Hızlandırılabilen Süre (gün)	Birim Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Hızlandırma Maliyeti (\$/gün)	Yeni Proje Süresi (gün)	Yeni Proje Maliyeti (\$)
1	R	3	60	180	134,67	20.500
2	Q	2	90	180	132,67	20.680
3	N	2	110	220	130,67	20.900
4	M	3	120	360	127,67	21.260
5	L	5	140	700	122,67	21.960
6	T	2	160	320	120,67	22.280

Burada proje yöneticisi bütçe durumuna göre hızlandırma seçeneklerini kullanabilir. Örneğin proje süresinin 5 gün kısaltılmak istenmesi durumunda R ve Q faaliyetlerinin hızlandırılması yeterli olacak ve bu hızlandırma işlemi R faaliyeti için 180 \$ ve Q faaliyeti için 180 \$ olmak üzere toplamda 360 \$ ek maliyet artışına neden olacak ve yeni proje maliyeti  $20.320 \$ + 360 \$ = 20.680 \$$  olacaktır. Ya da hızlandırma için ek olarak 1.000 \$ bütçe olması durumunda toplam hızlandırma maliyeti 940 \$ olan R, Q, N ve M faaliyetlerine sırasıyla hızlandırma işlemi yapılabilir ve proje süresi 10 gün kısalarak proje 137,67 gün yerine 127,67 günde tamamlanabilecektir.

### 4.3. Problemin Hedef Programlama ile Çözümü

Araştırmanın bu bölümünde, mini İHA yapım sürecinin Hedef Programlama tekniği ile de yönetilebileceği incelenecektir. Bunun için Hedef Programlama modelinde kullanılmak üzere aşağıda belirtilen iki amaç belirlenmiştir.

**Birinci Amaç:** Projenin toplam tamamlanma süresinin PERT ile hesaplanan süreyi (normal süreler için 137,67 günü, hızlandırılmış süreler için 120,67 günü geçmemesi.

**İkinci Amaç:** Kritik yol üzerindeki faaliyetlerin süreleri içinde tamamlanması.

Hedef programlamada karar değişkeni olarak  $X_i$  gösterimi kullanılmaktadır. Bu nedenle de A, B, C, D,.....,V harfleriyle gösterilen faaliyetler hedef programı çözümünde  $X_i$  ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{24}$ ) şeklinde gösterilecektir. İHA yapım sürecindeki her faaliyetin hangi karar değişkenine karşılık geldiğine ilişkin bilgiler Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

**Tablo 4.9.** Faaliyet Karar Değişkeni Dönüşümü Tablosu

S/N	Değişkenin Tanımı	Karar Değişkeni	Faaliyetin Kritiklik Durumu
1	A faaliyetinin süresi	$X_1$	Kritik Faaliyet
2	B faaliyetinin süresi	$X_2$	Kritik Faaliyet Değil
3	C faaliyetinin süresi	$X_3$	Kritik Faaliyet Değil
4	D faaliyetinin süresi	$X_4$	Kritik Faaliyet Değil
5	E faaliyetinin süresi	$X_5$	Kritik Faaliyet Değil
6	F faaliyetinin süresi	$X_6$	Kritik Faaliyet Değil
7	G faaliyetinin süresi	$X_7$	Kritik Faaliyet Değil
8	H faaliyetinin süresi	$X_8$	Kritik Faaliyet Değil
9	I faaliyetinin süresi	$X_9$	Kritik Faaliyet Değil
10	J faaliyetinin süresi	$X_{10}$	Kritik Faaliyet Değil
11	K faaliyetinin süresi	$X_{11}$	Kritik Faaliyet Değil
12	L faaliyetinin süresi	$X_{1,2}$	Kritik Faaliyet
13	M faaliyetinin süresi	$X_{13}$	Kritik Faaliyet
14	N faaliyetinin süresi	$X_{14}$	Kritik Faaliyet
15	O faaliyetinin süresi	$X_{15}$	Kritik Faaliyet
16	P faaliyetinin süresi	$X_{16}$	Kritik Faaliyet
17	Q faaliyetinin süresi	$X_{17}$	Kritik Faaliyet
18	R faaliyetinin süresi	$X_{18}$	Kritik Faaliyet
19	S faaliyetinin süresi	$X_{19}$	Kritik Faaliyet
20	T faaliyetinin süresi	$X_{20}$	Kritik Faaliyet
21	U faaliyetinin süresi	$X_{21}$	Kritik Faaliyet Değil
22	V faaliyetinin süresi	$X_{22}$	Kritik Faaliyet
23	Birinci kukla faaliyetin süresi	$X_{23}$	Kritik Faaliyet Değil
24	İkinci kukla faaliyetin süresi	$X_{24}$	Kritik Faaliyet Değil

#### 4.3.1. Normal faaliyet süreleri kullanılarak çözüm

Birinci Amaç: Projenin toplam tamamlanma süresinin PERT ile hesaplanan süre olan 137,67 günü geçmemesine yönelik kısıt:

$$X_1 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{22} \leq 137,67$$

İkinci Amaç: Kritik yol üzerindeki faaliyetlerin (A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V) süreleri içinde tamamlanmasına yönelik kısıtlar:

$$X_1 = 4,333$$

$$X_{12} = 30,000$$

$$X_{13} = 30,000$$

$$X_{14} = 8,000$$

$$X_{15} = 8,000$$

$$X_{16} = 7,500$$

$$X_{17} = 12,333$$

$$X_{18} = 13,500$$

$$X_{19} = 3,000$$

$$X_{20} = 17,833$$

$$X_{22} = 3,167$$

Amaçların matematiksel gösterimi tamamlandıktan sonra projenin hedef programlama modelinin oluşturulabilmesi için amaç fonksiyonlarına aşağıda gösterildiği şekilde sapma değerleri eklenip birer kısıt haline getirilmiştir. Hedef değerinin aşılması durumu (pozitif sapma)  $d^+$  şeklinde, hedef değerinin altında olması durumu ise (negatif sapma)  $d^-$  şeklinde gösterilmiştir. Amaç değerleri birer kısıt olarak değerlendirilerek modele eklenmiş ve hedef programlama modeli aşağıdaki gibi kurulmuştur.

Modelde yer alan kritik faaliyetler eşitlik, projenin tamamlanma süresini gösteren birinci kısıt küçük eşit ( $\leq$ ), diğer kısıtlar ise büyük eşit ( $\geq$ ) şeklinde gösterilmiştir. Bu kısıtlara ait pozitif ve negatif sapma değerleri, hedef programlama modeline negatif ve pozitif sapma değerlerinin en küçüklenmesi için dâhil edilmiştir.

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = d_1^+ + d_2^+ + d_2^- + d_3^+ + d_3^- + d_4^+ + d_4^- + d_5^+ + d_5^- + d_6^+ + d_6^- + d_7^+ + d_7^- + d_8^+ + d_8^- + d_9^+ + d_9^- + d_{10}^+ + d_{10}^- + d_{11}^+ + d_{11}^- + d_{12}^+ + d_{12}^-$$

Hedeflere Yönelik Kısıtlar:

1.  $X_1 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{22} - d_1^+ + d_1^- \leq 137,67$
2.  $X_1 - d_2^+ + d_2^- = 4,333$  (Kritik Faaliyet)
3.  $X_{12} - d_3^+ + d_3^- = 30,000$  (Kritik Faaliyet)
4.  $X_{13} - d_4^+ + d_4^- = 30,000$  (Kritik Faaliyet)
5.  $X_{14} - d_5^+ + d_5^- = 8,000$  (Kritik Faaliyet)
6.  $X_{15} - d_6^+ + d_6^- = 8,000$  (Kritik Faaliyet)
7.  $X_{16} - d_7^+ + d_7^- = 7,500$  (Kritik Faaliyet)
8.  $X_{17} - d_8^+ + d_8^- = 12,333$  (Kritik Faaliyet)
9.  $X_{18} - d_9^+ + d_9^- = 13,500$  (Kritik Faaliyet)
10.  $X_{19} - d_{10}^+ + d_{10}^- = 3,000$  (Kritik Faaliyet)
11.  $X_{20} - d_{11}^+ + d_{11}^- = 17,833$  (Kritik Faaliyet)
12.  $X_{22} - d_{12}^+ + d_{12}^- = 3,167$  (Kritik Faaliyet)
13.  $X_2 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
14.  $X_3 \geq 3,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
15.  $X_4 \geq 3,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
16.  $X_5 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
17.  $X_6 \geq 4,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
18.  $X_7 \geq 31,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
19.  $X_8 \geq 4,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
20.  $X_9 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
21.  $X_{10} \geq 3,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
22.  $X_{11} \geq 2,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
23.  $X_{21} \geq 5,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
24.  $X_{23} \geq 0$  (Kukla Faaliyet)
25.  $X_{24} \geq 0$  (Kukla Faaliyet)

$$X_i \geq 0, i=1,2,3,\dots,25 \quad d_j^+, d_j^- \geq 0, j=1,2,3,\dots,12$$

Görüleceği üzere problemin çözümünde hedeflere herhangi bir ağırlık ve öncelik verilmemiştir. Problem için hedef programlama türlerinden biri olan “Eşit ağırlıklı çok

hedefli programlama” modeli oluşturulmuştur. İHA yapım planlamasının hedef programlama yöntemiyle çözümü için veriler WINQSB programına EK-8’deki tabloda gösterildiği şekilde girilmiştir. Tabloda; kritik faaliyetlere ait kısıtlar ve süreler C1 – C12 arasındaki satırlarda gösterilmiştir. C1 satırında projenin toplam tamamlanma süresi kısıtı (137,67 gün), diğer kısıtlar ise C13 – C33 arasındaki satırlarda gösterilmiştir. Sağ taraf kısıt değerleri ise en sondaki “R.H.S. (Right Hand Side)” sütununda gösterilmiştir. Problemin çözümüne 26 iterasyonda ulaşılmıştır. Yapılan analiz sonucu karar değişkenleri için hesaplanan değerler ve sonuçlar EK-9’daki tabloda, kısıt değerlerine ilişkin sonuçlar ise EK-10’daki tabloda gösterilmiştir. Sonuç tablosundan da görüleceği üzere ilk satırda, projenin toplam tamamlanma süresini ifade eden birinci hedef 137,67 gün olarak sıfır (0) sapma ile gerçekleşmiştir. Kritik faaliyetlerin almış olduğu değerler ise C2 – C12 satırları arasında görülmektedir. Ayrıca, C13 – C25 satırları arasındaki değerlerden proje kısıtlarının sağlandığı anlaşılmaktadır. Diğer bir ifade ile PERT tekniğinde 137,67 gün olarak hesaplanan proje tamamlama süresine hedef programlama yöntemiyle de ulaşılmıştır. Bununla birlikte modeldeki kısıt değerlerinin tamamı sağlanmış ve amaç fonksiyonunun değeri yani hedeften sapma değeri 0 (sıfır) olarak hesaplanmıştır.

WINQSB programı ile ulaşılan diğer sonuçlar EK-11’deki tablolarda gösterilmiştir. Buna göre tablonun ilk sütununda modelde yer alan değişkenler, ikinci sütunda ise her değişken için hesaplanan çözüm değeri gösterilmiş ve tüm değişkenlerin belirlenen hedef değerleri ile aynı olduğu görülmüştür. En alt satırdaki amaç fonksiyonu için hesaplanan 0 (sıfır) değeri, pozitif ve negatif sapmanın sıfır olduğunu yani hedeflenen sonuca ulaşıldığını göstermektedir.

Buna göre; kritik yoldaki faaliyetlerin toplam tamamlanma süresi, yani projenin tamamlanma süresinin daha önce PERT tekniği ile hesaplanmış olan 137,37 günü aşmaması hedefi ile her bir kritik faaliyetin belirlenen sürede tamamlanması şeklinde belirlenen hedef kısıtları hedef programlama yöntemi ile de sağlanmıştır. Bunun yanı sıra pozitif veya negatif sapmanın en küçüklenmesi olarak oluşturulan amaç fonksiyonu, yani hedeften sapma değeri de 0 (sıfır) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca hedef programlama çözümüne ait simplex çözüm tabloları da EK-12’de bilgi amaçlı olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde hızlandırma süreleri dikkate alınarak yapılan çalışma sonuçları ise aşağıda verilmiştir.

#### 4.3.2. Hızlandırılmış faaliyet süreleri kullanılarak çözüm

Burada hızlandırılmış süreler kullanılarak hedef programlama ile çözüm yapılmıştır. Buna göre PERT ile hesaplanan hızlandırılmış proje tamamlanma süresi 120,67 gün ve hızlandırılmış faaliyet süreleri hedef olarak alınacaktır.

Birinci Amaç: Projenin toplam tamamlanma süresinin hızlandırılmış süre olan 120,67 günü geçmemesine yönelik kısıt:

$$X_1 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{22} \leq 120,67$$

İkinci Amaç: Kritik yol üzerindeki faaliyetlerin (A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V) ve bu kritik faaliyetlerden hızlandırma yapılacak olanların (L, M, N, Q, R ve T) hızlandırılmış süreleri içinde tamamlanmasına yönelik kısıtlar:

$$X_1 = 4,333$$

$$X_{12} = 25,000 \text{ (L faaliyeti 5 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{13} = 27,000 \text{ (M faaliyeti 3 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{14} = 6,000 \text{ (N faaliyeti 2 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{15} = 8,000$$

$$X_{16} = 7,500$$

$$X_{17} = 10,333 \text{ (Q faaliyeti 2 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{18} = 10,500 \text{ (R faaliyeti 3 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{19} = 3,000$$

$$X_{20} = 15,833 \text{ (T faaliyeti 2 gün hızlandırılacak)}$$

$$X_{22} = 3,167$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = d_1^+ + d_2^+ + d_2^- + d_3^+ + d_3^- + d_4^+ + d_4^- + d_5^+ + d_5^- + d_6^+ + d_6^- + d_7^+ + d_7^- + d_8^+ + d_8^- + d_9^+ + d_9^- + d_{10}^+ + d_{10}^- + d_{11}^+ + d_{11}^- + d_{12}^+ + d_{12}^-$$

Hedeflere Yönelik Kısıtlar:

1.  $X_1 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{22} - d_1^+ + d_1^- \leq 137,67$
2.  $X_1 - d_2^+ + d_2^- = 4,333$  (Kritik Faaliyet)
3.  $X_{12} - d_3^+ + d_3^- = 25,000$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)

4.  $X_{13} - d_4^+ + d_4^- = 27,000$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)
5.  $X_{14} - d_5^+ + d_5^- = 6,000$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)
6.  $X_{15} - d_6^+ + d_6^- = 8,000$  (Kritik Faaliyet)
7.  $X_{16} - d_7^+ + d_7^- = 7,500$  (Kritik Faaliyet)
8.  $X_{17} - d_8^+ + d_8^- = 10,333$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)
9.  $X_{18} - d_9^+ + d_9^- = 10,500$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)
10.  $X_{19} - d_{10}^+ + d_{10}^- = 3,000$  (Kritik Faaliyet)
11.  $X_{20} - d_{11}^+ + d_{11}^- = 15,833$  (Hızlandırılacak Kritik Faaliyet)
12.  $X_{22} - d_{12}^+ + d_{12}^- = 3,167$  (Kritik Faaliyet)
13.  $X_2 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
14.  $X_3 \geq 3,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
15.  $X_4 \geq 3,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
16.  $X_5 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
17.  $X_6 \geq 4,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
18.  $X_7 \geq 31,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
19.  $X_8 \geq 4,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
20.  $X_9 \geq 2,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
21.  $X_{10} \geq 3,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
22.  $X_{11} \geq 2,833$  (Kritik Faaliyet Değil)
23.  $X_{21} \geq 5,000$  (Kritik Faaliyet Değil)
24.  $X_{23} \geq 0$  (Kukla Faaliyet)
25.  $X_{24} \geq 0$  (Kukla Faaliyet)

$$X_i \geq 0, i=1,2,3,\dots,24 \quad d_j^+, d_j^- \geq 0, j=1,2,3,\dots,12$$

Hızlandırılmış sürelerle çözüm için veriler WINQSB programına EK-13'deki tabloda gösterildiği gibi girilmiştir. Burada; kritik faaliyetlere ait kısıtlar ve süreler C1 – C12 arasındaki satırlarda gösterilmiştir. C1 satırında projenin toplam tamamlanma süresi kısıtı (120,67 gün), diğer kısıtlar ise C13 – C33 arasındaki satırlarda gösterilmiştir.

Sağ taraf kısıt değerleri ise en sondaki R.H.S. sütununda gösterilmiştir. 22 faaliyet içerisinden L, M, N, Q, R ve T faaliyetlerine sırasıyla maksimum 5, 1, 5, 3, 2, 2, 3 ve 2 gün hızlandırma işlemi yapılacaktır. Çözüme 24 iterasyonda ve 0,16 saniyede ulaşılmıştır. Yapılan analiz sonucu karar değişkenleri için hesaplanan değerler ve sonuçlar EK-14'deki tabloda, kısıtlar için bulunan değerler EK-15'deki tabloda gösterilmiştir. Sonuç tablosundan da görüleceği üzere ilk satırda, projenin toplam tamamlanma süresini ifade eden birinci hedef 120,67 gün olarak sıfır sapma ile gerçekleşmiştir. Kritik faaliyetlerin (A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V) almış olduğu değerler ise C2 – C12 satırlar arasında görülmektedir. Ayrıca, C13 – C25 satırları arasındaki değerlerden proje kısıtlarının sağlandığı anlaşılmaktadır.

Hızlandırma süreleri ile ulaşılan hedef programlama sonuçları EK-16'da verilmiştir. Kritik yoldaki faaliyetlerin toplam tamamlanma süresi, yani projenin tamamlanma süresinin daha önce PERT tekniği ile hesaplanmış olan 120,37 günü aşmaması/tamamlanması hedefi ile her bir kritik olmayan 16 faaliyetin (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, O, P, S, U, V) normal sürelerinde ve 6 faaliyetin (L, M, N, Q, R ve T) hızlandırılmış sürelerinde tamamlanması şeklinde belirlenen hedefler hedef programlama yöntemi ile de sağlanmıştır. Bunun yanı sıra pozitif veya negatif sapmanın en küçüklenmesi olarak oluşturulan amaç fonksiyonu, yani hedeften sapma değeri 0 (sıfır) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar; PERT tekniği ile belirlenen hızlandırılmış proje süresinin aşılması ve kritik faaliyetlerin süreleri içerisinde tamamlanması hedeflerinin her ikisinin de gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca hızlandırma süreleri ile bulunan hedef programlama çözümüne ait simplex çözüm tablosu da EK-17'de bilgi amaçlı olarak verilmiştir.

## 5. SONUÇ

Günümüzde büyük ölçekli projelerin planlanması, programlanması ve kontrolü proje başarısı için önemli ve gerekli hale gelmiştir. Projelerin karmaşık olması, gerekli işlemleri, programı ve kaynakların atanmasını da kapsayan uyumlu ve eşgüdümlü bir planı gerektirir. Bu amaçla proje için yapılması gerekli olan faaliyetlerin süresini, başlangıcını, bitişini, sırasını, birbiriyle olan mantıksal ilişkisini kolaylıkla gösterebilen şebeke analiz teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en yaygın olarak kullanılanları ise CPM ve PERT teknikleridir. Bunun birlikte çoklu ve birbirleriyle çelişen hedeflerin (zaman, maliyet vb.) olduğu durumlarda en uygun çözüm için kullanılan tekniklerden biri de hedef programlama tekniğidir.

Bu araştırmada son zamanlarda ülkemizde ve dünyada askeri ve sivil alanda kullanımını ve önemi hızla artan insansız hava araçları (İHA) uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bu yönüyle bugüne kadar yapılmış olan çalışmalardan ayrılmaktadır.

Araştırmada ilk olarak 22 faaliyetten oluşan bir mini insansız hava aracı (İHA) yapım süreci PERT tekniği ile planlanarak normal sürelerle zaman ve maliyet analizi yapılmış, sonrasında projeye hızlandırma işlemi yapılmıştır. Normal ve hızlandırılmış sürelerle yapılan PERT analizi sonucunda projenin; toplam tamamlanma süresi, kritik faaliyetleri, kritik yolu, faaliyetlerin standart sapması, projenin varyansı ile maliyeti hesaplanmıştır. Sonrasında, projenin hedef programlama tekniği ile yönetilebilirliği göstermek için hedef programlama tekniği kullanılmıştır. PERT tekniği ve hedef programlama tekniği ile bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında aynı değerlere ulaşıldığı görülmüştür.

Normal Sürelerle Yapılan PERT Analizi Aşaması: PERT tekniğinde sırasıyla, yapım sürecinde gerçekleştirilecek faaliyetler ve bu faaliyetlerin öncelik ilişkileri belirlenmiş, proje ekibinden alınan bilgilerle her bir faaliyet için en iyimser, en kötümser ve en yüksek olasılıklı süre tahminleri yapılmış, bu üç süreden yola çıkarak her bir faaliyetin ortalama süreleri hesaplanmıştır. Sonrasında ise faaliyetler, faaliyetlerin öncelik ilişkileri, faaliyetlerin en iyimser, en yüksek olasılıklı ve en kötümser sürelerinden oluşan veriler WINQSB programına girilerek analiz yapılmıştır. Buna göre, WINQSB programı ile normal faaliyet süreleri kullanılarak yapılan analiz sonucunda projenin tamamlanma süresi 137,67 gün, standart sapması ise 5,59 olarak hesaplanmış ve kritik yol A-

L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V faaliyetleri olarak belirlenmiştir. Projenin normal maliyeti ise 20.320 \$ olarak hesaplanmıştır.

Hızlandırılmış Sürelerle Yapılan PERT Analizi Aşaması: Projede 8 adet (G, H, L, M, N, Q, R ve T) hızlandırma işlemi yapılacak faaliyet belirlenmiştir. Ancak bu faaliyetlerden 2 tanesi (G ve H) kritik yol üzerinde olmadığından kritik yol üzerinde bulunan 6 adet faaliyete hızlandırma işlemi yapılmıştır. Hızlandırma işleminde üç tahmini süre (en iyimser, en yüksek olasılıklı, en kötümser) yerine faaliyetlerin ortalama süreleri ( $\bar{x}$ ) kullanılmıştır. L, M, N, Q, R ve T faaliyetlerine sırasıyla maksimum 5, 3, 2, 2, 3 ve 2 gün hızlandırma işlemi yapılabileceği belirlenmiştir. Birim hızlandırma maliyeti en düşükten en yükseğe doğru sırasıyla R, Q, N, M, L ve T (60 \$, 90 \$, 110 \$, 120 \$, 140 \$, 160 \$) olacak şekilde yapılan hızlandırma işlemi sonucunda A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V faaliyetlerinden oluşan kritik yol değişmemiş, proje süresi 17 gün kısaltılarak 137,67 günden 120,67 güne indirilmiş, ancak proje maliyeti 1.960 \$ artış ile 22.280 \$'a yükselmiştir. Böylece hızlandırma işlemi için, bolluk süresine sahip olan faaliyetlerinden, bolluk süresi sıfır olan yani kritik faaliyetlere, işgücü ve kaynak aktarımı yapılabileceği görülmüştür.

Hedef Programlama Tekniği İle Yapılan Analiz Aşaması: PERT tekniğinde kullanılan veriler kullanılarak problem hedef programlama tekniği ile tekrar çözülmüştür. Bunun için;

- Birinci Amaç: Projenin toplam tamamlanma süresinin PERT tekniğinde bulunan süreyi (Normal süre: 137,67 gün, hızlandırılmış süre: 120,67 gün) geçmemesi,
- İkinci Amaç: Kritik yol üzerindeki faaliyetlerin süreleri içinde tamamlanması,

şeklinde iki amaç belirlenerek, bu amaçlara yönelik hedef programlama modeli oluşturulmuştur. Modelde yer alan değişkenler ve kısıtlar WINQSB programına girilerek çözüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hedef programlama için belirlenen her iki hedefe de sıfır (0) sapma ile ulaşıldığı, normal ve hızlandırma süreleriyle yapılan analiz sonucunda, PERT ve hedef programlama teknikleri ile bulunan sonuçların örtüştüğü, dolayısıyla projenin hedef programlama tekniği ile de yönetilebileceği görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- Acar, N. (1998). *Üretim planlaması yöntem ve uygulamaları*. (Altıncı Baskı). Ankara: Millî Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- Agyei, W. (2015). Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: Case study. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4 (8), 222-227.
- Albayrak, B. (2016). *Proje yönetimi, analizi ve danışmanlık*. Ankara: Nobel.
- Atlas, M. (2003). Bilimsel bir araştırmanın adımları. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19 (1) , 25-41.
- Atlas, M. (2008). Çok amaçlı programlama çözüm tekniklerinin sınıflandırılması. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*.8 (1), 47-68.
- Atlas, M. (2016). *İstatistik I çözülmüş örnekler*.(Gözden Geçirilmiş 5. Baskı). Eskişehir: Sözkesen Matbaacılık Ltd. Şti.
- Atlas, M. ve Keçek, G. (2000). Hedef programlama ve bir seramik işletmesinde uygulama denemesi. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16 (1), 81-104.
- Bakışkan, E. (2019). *CPM-PERT proje yönetim tekniklerinin Karadeniz tipi balıkçı gemileri inşa sürecine uygulanması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barutçugil, İ. (2008). *Proje yönetimi*. (1. Basım). İstanbul: Kariyer Yayıncılık.
- Cinemre, N. (2011). *Yöneylem araştırması*. (2. Basım). İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Claude, W. B. and Leon W. E. (1980). *Modern Project Management: Foundations for Quality and Productivity, Tenaflı*. New Jersey: Burrill-Ellsworth Associates.
- Çetin, H. (2008). *PERT modellerinin hedef programlama ile hızlandırılması ve inşaat sektörüne bir uygulama*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Çetmeli, E. (1982). *Yatırım planlamasında kritik yörünge ve PERT metodları*. İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi.

- Davis, E. W. (1983). Project management: techniques, applications and managerial issues. *Industrial Engineering & Management Press*.
- Doğan, İ., Doğan, N. ve Akcan, A. (2000). Rasyonel ve ekonomik hayvan beslemede hedef programlamadan yararlanma. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 24, 233-238.
- Dunne, E. J. and Klementowski, L. J. (1982). An investigation of the use of network techniques in research and development management. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 29 (3), 74-78.
- Duran, C. (2007). *CPM - PERT modeller ve uygulaması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Gaither, N. (1980). *Production and Operation Management: A Problem Solving and Decision-Making Approach*. New York: The Dryden Press.
- Hajek, V. G. (1977). *Management of Engineering Projects*. (Second Edition). New York: McGraw - Hill Book Company.
- Halaç, O. (1992). *Kantitatif karar verme teknikleri*. İstanbul: İ.Ü. Yayınları.
- Haser, A. B. (2010). Bu insansız hava aracı'ndan daha önce yapmamış mıydık? *Bilim ve Teknik Dergisi*, Aralık Sayısı, 31-36.
- Heizer, J. and Render, B. (2007). *Üretim yönetimi*. (Çev: Tuzkaya U. R.) Ankara: Palme Yayıncılık.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (1995). *Introduction to operations research*. (International Editions). New York: McGraw-Hill.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2001). *Introduction to operations research*. (Seventh Edition). New York: McGraw-Hill.
- Karadeniz, C. Ö. (2007). *PERT-CPM ile proje planlama, değerlendirme ve bir işletme uygulaması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Karahan, M. ve Ezin Y. (2014). PERT-CPM tekniğiyle bir inşaatın yapım süresi ve maliyetlerinin optimizasyonu. *Bartın Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi* 5 (10), 73-89.

- Karayalçın, İ. (1986). *Endüstri mühendisliği ve üretim yönetimi el kitabı-1*. (Birinci Baskı). İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- Kargül, İ. D. (1996). *Yatırımlarda proje analizi*. İstanbul: İMKB.
- Kelley, J. E. (1961). Critical-path planning and scheduling: Mathematical basis. *Operations research*, 9 (3), 296-320.
- Kerzner, H. (2009). *Project management a system approach to planning, scheduling and controlling*. (Tenth Edition). New Jersey: John Wiley.
- Kocabıyık, E. (2010). *Gemi inşaat sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede PERT ve bulanık PERT uygulaması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mazlum, M. and Güneri, A. F. (2015). CPM, PERT and project management with fuzzy logic technique and implementation on a business. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 210, 348-357.
- Monks, J. G. (1996). *Schaum's outline of theory and problems of operation management*. (2nd Edition) New York: McGraw – Hill Inc.
- Öz, E. ve Alp, S. (2010). *Sistem analizi ve tasarımı: Sistem analizinde kullanılan sayısal yöntemler*. İstanbul: Türkmen Kitabevi.
- Öztürk, A. (2009). *Yöneylem araştırması*. (12. Basım). Bursa: Ekin Yayınevi.
- Öztürk, A. (2016). *Yöneylem araştırması*. (16. Basım). Bursa: Ekin Yayınevi.
- Öztürk, V. V. (2019). *PERT tabanlı proje planlamasında hedef programlama: Sağlık sektöründe bir uygulama*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Punmia, B. C. and Khandelwal, K. K. (2002). *Project planning and control with PERT & CPM*. (Fourth Edition). New Delhi: Firewall Media.
- Rençber, B. A. (2013). Şebeke analizinde CPM tekniği ve bir uygulama. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 8 (2), 16-25.
- Roy, R. N. (2005). *Modern approach to operations management*. New Delhi: New Age International Ltd.

- Sarıca, İ. (2006). *CPM ve PERT teknikleriyle proje planlama ve bir işletmede uygulanması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Bursa: Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Sharma, A. (2008). *Operations Research*. (Revised Edition) New Delhi: Global Media
- Sharma, J. K. (2016). *Operations research: theory and applications* (Sixth Edition). New Delhi: Laxmi Publications Pvt Ltd.
- Taha, H. A. (2000). *Yöneylem araştırması*. (6. Basımdan çeviri). (Çev: Ş.A. Baray ve Ş. Esnaf) İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Taha, H. A. (2017). *Operations research an introduction*. (Tenth-Global Edition). Malaysia: Pearson Education Limited.
- Taylor, B. W. (1990). *Introduction to management science*. (Third Edition). Boston: Allyn and Bacon.
- Taylor, B. W. (2007). *Introduction to management science*. (Ninth Edition). New Jersey Pearson Education
- Temiz, N. ve Dursun, E. (2016). PERT tekniğinin liman deniz hizmetleri otomasyonu projesine uygulanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*. 8 (1), 1-30.
- Ulucan, A. (2007). *Yöneylem araştırması*. (İkinci Baskı). Ankara: Siyasal Kitabevi.
- Vatansever, R. (2008). *Proje planlamasında bulanık hedef programlama yaklaşımı*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
- Winston, W. L. (2004). *Operation research, applications and algorithms*. Brooks /Cole: Thomson Learning Inc.
- Yalkı, İ. (2009). *Proje yönetimi ve CPM-PERT teknikleri üzerine bir uygulama*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Yamak, O. (1998). *Proje yönetim teknikleri*. İstanbul: Gençlik Kitapevi.

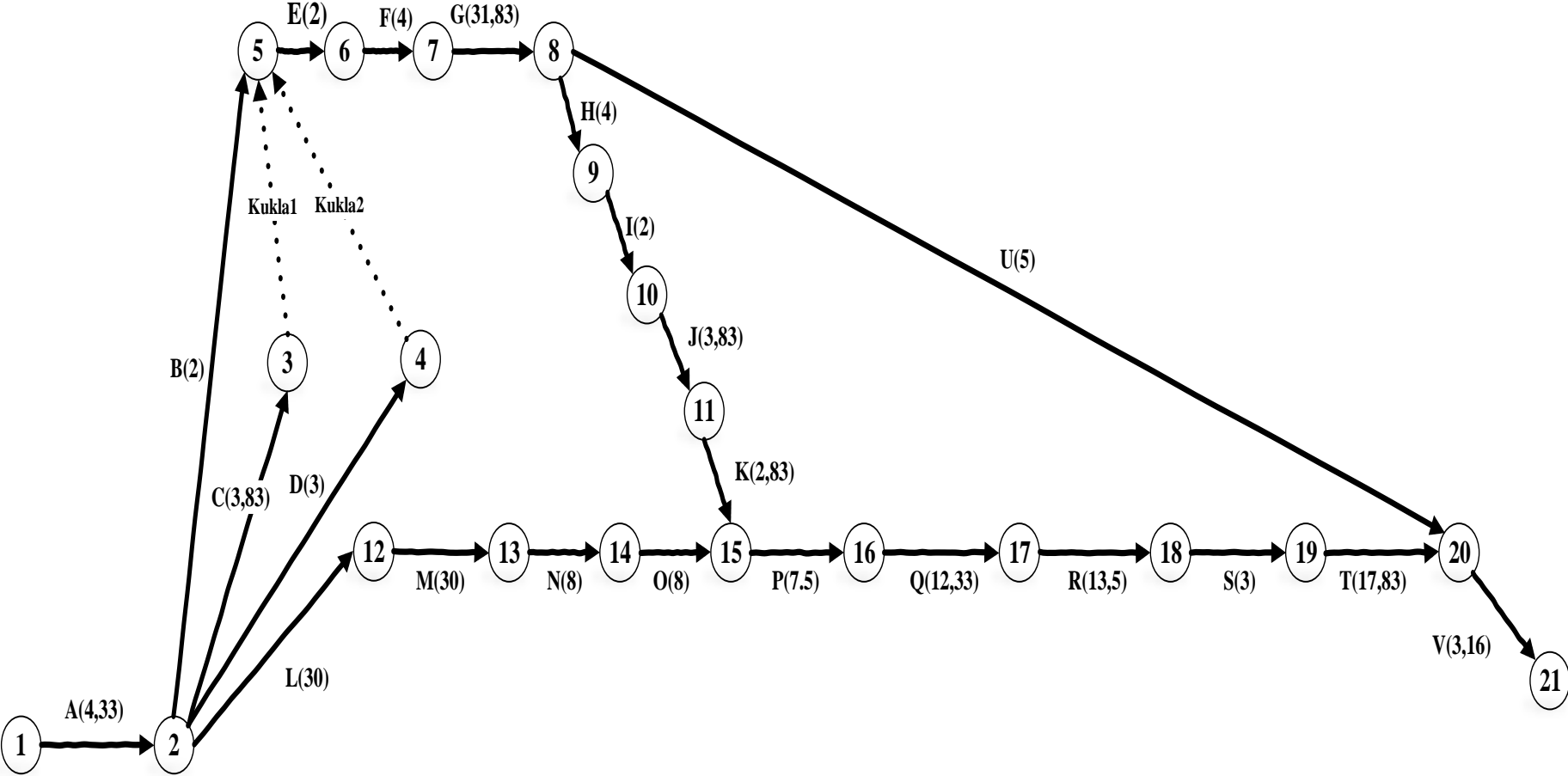
Yıldız, A. (2015). *Farklı coğrafi bölgelerde petrol kuyusu açma maliyetlerinin PERT-CPM proje planlama teknikleri ile karşılaştırmalı analizi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

## EKLER

EK-1. Faaliyetlerin ve Üçlü Sürelerin WINQSB Ekranındaki Gösterimi

Activity Number	Activity Name	Immediate Predecessor (list number/name, separated by ',')	Optimistic time (a)	Most likely time (m)	Pessimistic time (b)
1	A		3	4	7
2	B	A	1	2	3
3	C	A	2	4	5
4	D	A	2	3	4
5	E	B,C,D	1	2	3
6	F	E	2	4	6
7	G	F	21	30	50
8	H	G	3	4	5
9	I	H	1	2	3
10	J	I	2	4	5
11	K	J	1	3	4
12	L	A	20	30	40
13	M	L	20	30	40
14	N	M	5	8	11
15	O	N	5	8	11
16	P	K,O	4	7	13
17	Q	P	10	12	16
18	R	Q	10	13	19
19	S	R	2	3	4
20	T	S	15	18	20
21	U	G	3	5	7
22	V	T,U	2	3	5

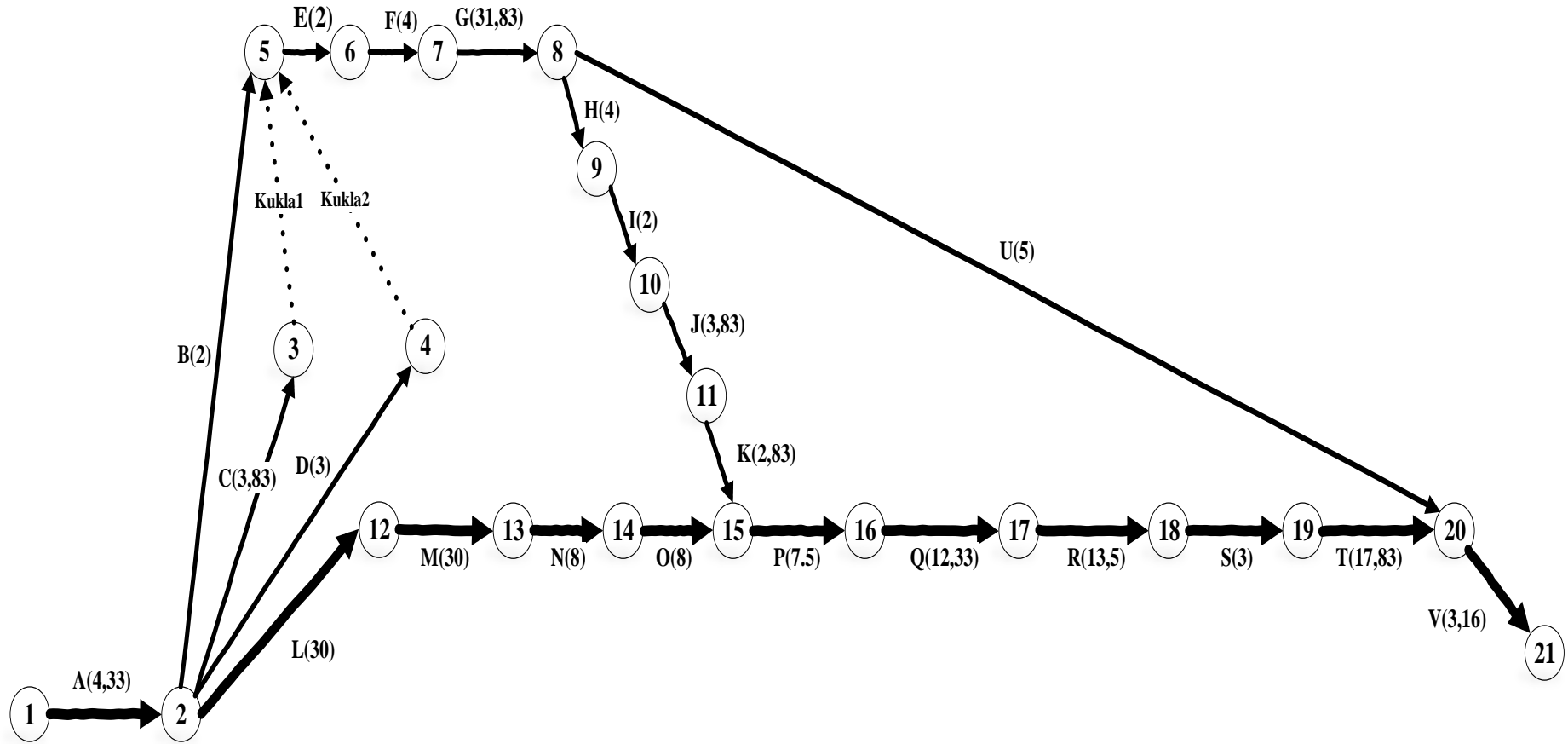
EK-2. Faaliyet ve Ortalama Sürelerin Şebeke Diyagramında Gösterimi



### EK-3. WINQSB ile Yapılan PERT Analizi Sonuçları

12-01-2019 15:46:13	Activity Name	On Critical Path	Activity Mean Time	Earliest Start	Earliest Finish	Latest Start	Latest Finish	Slack (LS-ES)	Activity Time Distribution	Standard Deviation
1	A	Yes	4,3333	0	4,3333	0	4,3333	0	3-Time estimate	0,6667
2	B	no	2	4,3333	6,3333	27,8333	29,8333	23,5000	3-Time estimate	0,3333
3	C	no	3,8333	4,3333	8,1667	26,0000	29,8333	21,6667	3-Time estimate	0,5
4	D	no	3	4,3333	7,3333	26,8333	29,8333	22,5000	3-Time estimate	0,3333
5	E	no	2	8,1667	10,1667	29,8333	31,8333	21,6667	3-Time estimate	0,3333
6	F	no	4	10,1667	14,1667	31,8333	35,8333	21,6667	3-Time estimate	0,6667
7	G	no	31,8333	14,1667	46	35,8333	67,6667	21,6667	3-Time estimate	4,8333
8	H	no	4	46	50	67,6667	71,6667	21,6667	3-Time estimate	0,3333
9	I	no	2	50	52	71,6667	73,6667	21,6667	3-Time estimate	0,3333
10	J	no	3,8333	52	55,8333	73,6667	77,5	21,6667	3-Time estimate	0,5
11	K	no	2,8333	55,8333	58,6667	77,5	80,3333	21,6667	3-Time estimate	0,5
12	L	Yes	30	4,3333	34,3333	4,3333	34,3333	0	3-Time estimate	3,3333
13	M	Yes	30	34,3333	64,3333	34,3333	64,3333	0	3-Time estimate	3,3333
14	N	Yes	8	64,3333	72,3333	64,3333	72,3333	0	3-Time estimate	1
15	O	Yes	8	72,3333	80,3333	72,3333	80,3333	0	3-Time estimate	1
16	P	Yes	7,5	80,3333	87,8333	80,3333	87,8333	0	3-Time estimate	1,5
17	Q	Yes	12,3333	87,8333	100,1667	87,8333	100,1667	0	3-Time estimate	1
18	R	Yes	13,5	100,1667	113,6667	100,1667	113,6667	0	3-Time estimate	1,5
19	S	Yes	3	113,6667	116,6667	113,6667	116,6667	0	3-Time estimate	0,3333
20	T	Yes	17,8333	116,6667	134,5	116,6667	134,5	0	3-Time estimate	0,8333
21	U	no	5	46	51	129,5	134,5	83,5	3-Time estimate	0,6667
22	V	Yes	3,1667	134,5	137,6667	134,5	137,6667	0	3-Time estimate	0,5
	Project	Completion	Time	=	137,67	DAYs				
	Number of	Critical	Path(s)	=	1					

EK-4. Kritik Yolun Şebeke Diyagramı Üzerinde Gösterimi



**Kritik Yol: A-L-M-N-O-P-Q-R-S-T-V**

EK-5. Hızlandırma İşlemi İçin Verilerinin WINQSB Programına Girilmesi

Activity Number	Activity Name	Immediate Predecessor (list number/name, separated by ',')	Normal Time	Crash Time	Normal Cost	Crash Cost
1	A		4.333	4.333	520	520
2	B	A	2	2	240	240
3	C	A	3.833	3.833	460	460
4	D	A	3	3	360	360
5	E	B,C,D	2	2	240	240
6	F	E	4	4	480	480
7	G	F	31.833	31.833	550	550
8	H	G	4	4	400	400
9	I	H	2	2	260	260
10	J	I	3.833	3.833	498	498
11	K	J	2.833	2.833	368	368
12	L	A	30	25	3600	4300
13	M	L	30	27	3600	3960
14	N	M	8	6	800	1020
15	O	N	8	8	960	960
16	P	K,O	7.5	7.5	975	975
17	Q	P	12.333	10.333	1603	1783
18	R	Q	13.5	10.5	540	720
19	S	R	3	3	360	360
20	T	S	17.833	15.833	2853	3173
21	U	G	5	5	400	400
22	V	T,U	3.167	3.167	253	253

EK-6. İHA Yapım Sürecinin 17 (On yedi) Gün Hızlandırılmasının Sonuçları

12-14-2019 20:01:36	Activity Name	On Critical Path	Activity Time	Earliest Start	Earliest Finish	Latest Start	Latest Finish	Slack (LS-ES)
1	A	Yes	4,333	0	4,333	0	4,333	0
2	B	no	2	4,333	6,333	17,834	19,834	13,501
3	C	no	3,833	4,333	8,166	16,001	19,834	11,668
4	D	no	3	4,333	7,333	16,834	19,834	12,501
5	E	no	2	8,166	10,166	19,834	21,834	11,668
6	F	no	4	10,166	14,166	21,834	25,834	11,668
7	G	no	31,833	14,166	45,999	25,834	57,667	11,668
8	H	no	4	45,999	49,999	57,667	61,667	11,668
9	I	no	2	49,999	51,999	61,667	63,667	11,668
10	J	no	3,833	51,999	55,832	63,667	67,5	11,668
11	K	no	2,833	55,832	58,665	67,5	70,333	11,668
12	L	Yes	25	4,333	29,333	4,333	29,333	0
13	M	Yes	27	29,333	56,333	29,333	56,333	0
14	N	Yes	6	56,333	62,333	56,333	62,333	0
15	O	Yes	8	62,333	70,333	62,333	70,333	0
16	P	Yes	7,5	70,333	77,833	70,333	77,833	0
17	Q	Yes	10,333	77,833	88,166	77,833	88,166	0
18	R	Yes	10,5	88,166	98,666	88,166	98,666	0
19	S	Yes	3	98,666	101,666	98,666	101,666	0
20	T	Yes	15,833	101,666	117,499	101,666	117,499	0
21	U	no	5	45,999	50,999	112,499	117,499	66,5
22	V	Yes	3,167	117,499	120,666	117,499	120,666	0
	Project	Completion	Time	=	120,67	days		
	Total	Cost of	Project	=	\$22.280	(Cost on	CP =	\$18.024)
	Number of	Critical	Path(s)	=	1			

EK-7. Hızlandırma Sonucunda Oluşan Yeni Faaliyet Süreleri ve Maliyetleri

12-14-2019 20:05:51	Activity Name	Critical Path	Normal Time	Crash Time	Suggested Time	Additional Cost	Normal Cost	Suggested Cost
1	A	Yes	4,333	4,333	4,333	0	\$520	\$520
2	B	no	2	2	2	0	\$240	\$240
3	C	no	3,833	3,833	3,833	0	\$460	\$460
4	D	no	3	3	3	0	\$360	\$360
5	E	no	2	2	2	0	\$240	\$240
6	F	no	4	4	4	0	\$480	\$480
7	G	no	31,833	31,833	31,833	0	\$550	\$550
8	H	no	4	4	4	0	\$400	\$400
9	I	no	2	2	2	0	\$260	\$260
10	J	no	3,833	3,833	3,833	0	\$498	\$498
11	K	no	2,833	2,833	2,833	0	\$368	\$368
12	L	Yes	30	25	25	\$700	\$3.600	\$4.300
13	M	Yes	30	27	27	\$360	\$3.600	\$3.960
14	N	Yes	8	6	6	\$220	\$800	\$1.020
15	O	Yes	8	8	8	0	\$960	\$960
16	P	Yes	7,5	7,5	7,5	0	\$975	\$975
17	Q	Yes	12,333	10,333	10,333	\$180	\$1.603	\$1.783
18	R	Yes	13,5	10,5	10,5	\$180	\$540	\$720
19	S	Yes	3	3	3	0	\$360	\$360
20	T	Yes	17,833	15,833	15,833	\$320	\$2.853	\$3.173
21	U	no	5	5	5	0	\$400	\$400
22	V	Yes	3,167	3,167	3,167	0	\$253	\$253
	Overall	Project:			120,67	\$1.960	\$20.320	\$22.280

## EK-8. WINQSB Hedef Programlama Modülüne Girilen Veriler

Hedef 15 Ocak2																																			
Minimize G1 : X2																																			
Varie	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33	X34	
Min.t																																			
C1	1											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
C2	1																																		
C3												1																							
C4													1																						
C5														1																					
C6															1																				
C7																1																			
C8																	1																		
C9																		1																	
C10																			1																
C11																				1															
C12																					1														
C13		1																																	
C14			1																																
C15				1																															
C16					1																														
C17						1																													
C18							1																												
C19								1																											
C20									1																										
C21										1																									
C22											1																								
C23												1																							
C24													1																						
C25														1																					
Lower	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Upper	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
Varie	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	

Hedef 15 Ocak2																																					
Minimize G1 : X2																																					
Varie	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33	X34	X35	X36	X37	X38	X39	X40	X41	X42	X43	X44	X45	X46	X47	X48	X49	X50	recliv	R. H. S.				
Min.t																																					
C1	1																																		=	137.67	
C2																																				=	4.333
C3																																				=	30
C4																																				=	30
C5																																				=	8
C6																																				=	8
C7																																				=	7.5
C8																																				=	12.333
C9																																				=	13.5
C10																																				=	3
C11	1																																			=	17.833
C12																																				=	3.167
C13																																				>=	2
C14																																				>=	3.833
C15																																				>=	3
C16																																				>=	2
C17																																				>=	4
C18																																				>=	31.833
C19																																				>=	4
C20																																				>=	2
C21																																				>=	3.833
C22																																				>=	2.833
C23																																				>=	5
C24																																				>=	0
C25																																				>=	0
Lower	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Upper	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M		
Varie	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u	o	u		

EK-9. Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

	14:07:25		Wednesday	January	15	2020		
	Goal Level	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	G1	X1	4,33	0	0	0	-1,00	1,00
2	G1	X2	2,00	0	0	0	0	M
3	G1	X3	3,83	0	0	0	0	M
4	G1	X4	3,00	0	0	0	0	M
5	G1	X5	2,00	0	0	0	0	M
6	G1	X6	4,00	0	0	0	0	M
7	G1	X7	31,83	0	0	0	0	M
8	G1	X8	4,00	0	0	0	0	M
9	G1	X9	2,00	0	0	0	0	M
10	G1	X10	3,83	0	0	0	0	M
11	G1	X11	2,83	0	0	0	0	M
12	G1	X12	30,00	0	0	0	-1,00	1,00
13	G1	X13	30,00	0	0	0	-1,00	1,00
14	G1	X14	8,00	0	0	0	-1,00	1,00
15	G1	X15	8,00	0	0	0	-1,00	1,00
16	G1	X16	7,50	0	0	0	-1,00	1,00
17	G1	X17	12,33	0	0	0	-1,00	1,00
18	G1	X18	13,50	0	0	0	-1,00	1,00
19	G1	X19	3,00	0	0	0	-1,00	1,00
20	G1	X20	17,83	0	0	0	-1,00	1,00
21	G1	X21	5,00	0	0	0	0	M
22	G1	X22	3,17	0	0	0	-1,00	1,00
23	G1	X23	0,00	0	0	0	-1,00	0
24	G1	X24	0	0	0	0	0	M
25	G1	X25	0	0	0	0	0	M
26	G1	X26	0	1,00	0	1,00	0	M
27	G1	X27	0	1,00	0	1,00	0	M
28	G1	X28	0	1,00	0	1,00	0	M
29	G1	X29	0	1,00	0	1,00	0	M
30	G1	X30	0	1,00	0	1,00	0	M
31	G1	X31	0	1,00	0	1,00	0	M
32	G1	X32	0	1,00	0	1,00	0	M
33	G1	X33	0	1,00	0	1,00	0	M
34	G1	X34	0	1,00	0	1,00	0	M
35	G1	X35	0	1,00	0	1,00	0	M
36	G1	X36	0	1,00	0	1,00	0	M
37	G1	X37	0	1,00	0	1,00	0	M

EK-9. (Devam) Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

14:07:25 Wednesday January 15 2020								
35	G1	X35	0	1,00	0	1,00	0	M
36	G1	X36	0	1,00	0	1,00	0	M
37	G1	X37	0	1,00	0	1,00	0	M
38	G1	X38	0	1,00	0	1,00	0	M
39	G1	X39	0	1,00	0	1,00	0	M
40	G1	X40	0	1,00	0	1,00	0	M
41	G1	X41	0	1,00	0	1,00	0	M
42	G1	X42	0	1,00	0	1,00	0	M
43	G1	X43	0	1,00	0	1,00	0	M
44	G1	X44	0	1,00	0	1,00	0	M
45	G1	X45	0	1,00	0	1,00	0	M
46	G1	X46	0	1,00	0	1,00	0	M
47	G1	X47	0	1,00	0	1,00	0	M
48	G1	X48	0	1,00	0	1,00	0	M
49	G1	X49	0	1,00	0	1,00	0	M
50	G1	X50	0	1,00	0	1,00	0	M
	G1	Goal	Value	(Min.) =	0	(Alternate	Solution	Exists!!)
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	ShadowPrice Goal 1
1	C1	137,67	=	137,67	0	137,67	M	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0	4,34	0
3	C3	30,00	=	30,00	0	0	30,00	0
4	C4	30,00	=	30,00	0	0	30,00	0
5	C5	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0	7,50	0
8	C8	12,33	=	12,33	0	0	12,34	0
9	C9	13,50	=	13,50	0	0	13,50	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0	3,00	0
11	C11	17,83	=	17,83	0	0	17,84	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0	3,17	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0	M	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0	M	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0	M	0

EK-9. (Devam) Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

	14:07:25		Wednesday	January	15	2020		
41	G1	X41	0	1,00	0	1,00	0	M
42	G1	X42	0	1,00	0	1,00	0	M
43	G1	X43	0	1,00	0	1,00	0	M
44	G1	X44	0	1,00	0	1,00	0	M
45	G1	X45	0	1,00	0	1,00	0	M
46	G1	X46	0	1,00	0	1,00	0	M
47	G1	X47	0	1,00	0	1,00	0	M
48	G1	X48	0	1,00	0	1,00	0	M
49	G1	X49	0	1,00	0	1,00	0	M
50	G1	X50	0	1,00	0	1,00	0	M
	G1	Goal	Value	(Min.) =	0	(Alternate	Solution	Exists!!)
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	ShadowPrice Goal 1
1	C1	137,67	=	137,67	0	137,67	M	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0	4,34	0
3	C3	30,00	=	30,00	0	0	30,00	0
4	C4	30,00	=	30,00	0	0	30,00	0
5	C5	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0	7,50	0
8	C8	12,33	=	12,33	0	0	12,34	0
9	C9	13,50	=	13,50	0	0	13,50	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0	3,00	0
11	C11	17,83	=	17,83	0	0	17,84	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0	3,17	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0	M	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0	M	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
20	C20	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
21	C21	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
22	C22	2,83	>=	2,83	0	0	M	0
23	C23	5,00	>=	5,00	0	0	M	0
24	C24	0,00	>=	0	0,00	-M	0,00	0
25	C25	0	>=	0	0	-M	0	0

EK-10. Analiz Sonucu Kısıtlar İçin Bulunan Değerler

01-15-2020 14:12:04	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price Goal 1
1	C1	137,67	=	137,67	0	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0
3	C3	30,00	=	30,00	0	0
4	C4	30,00	=	30,00	0	0
5	C5	8,00	=	8,00	0	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0
8	C8	12,33	=	12,33	0	0
9	C9	13,50	=	13,50	0	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0
11	C11	17,83	=	17,83	0	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0
20	C20	2,00	>=	2,00	0	0
21	C21	3,83	>=	3,83	0	0
22	C22	2,83	>=	2,83	0	0
23	C23	5,00	>=	5,00	0	0
24	C24	0,00	>=	0	0,00	0
25	C25	0	>=	0	0	0

EK-11. Analiz Sonucu Bulunan Diğer Sonuçlar

01-15-2020 14:13:47	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1
1	X1	4,33	basic	0
2	X2	2,00	basic	0
3	X3	3,83	basic	0
4	X4	3,00	basic	0
5	X5	2,00	basic	0
6	X6	4,00	basic	0
7	X7	31,83	basic	0
8	X8	4,00	basic	0
9	X9	2,00	basic	0
10	X10	3,83	basic	0
11	X11	2,83	basic	0
12	X12	30,00	basic	0
13	X13	30,00	basic	0
14	X14	8,00	basic	0
15	X15	8,00	basic	0
16	X16	7,50	basic	0
17	X17	12,33	basic	0
18	X18	13,50	basic	0
19	X19	3,00	basic	0
20	X20	17,83	basic	0
21	X21	5,00	basic	0
22	X22	3,17	basic	0
23	X23	0,00	basic	0
24	X24	0	at bound	0
25	X25	0	at bound	0
26	X26	0	at bound	1,00
27	X27	0	at bound	1,00
28	X28	0	at bound	1,00
29	X29	0	at bound	1,00
30	X30	0	at bound	1,00
31	X31	0	at bound	1,00
32	X32	0	at bound	1,00
33	X33	0	at bound	1,00
34	X34	0	at bound	1,00
35	X35	0	at bound	1,00
36	X36	0	at bound	1,00
37	X37	0	at bound	1,00
38	X38	0	at bound	1,00
39	X39	0	at bound	1,00

EK-11. (Devam) Analiz Sonucu Bulunan Diğ er Sonuç lar

01-15-2020 14:13:47	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1
14	X14	8,00	basic	0
15	X15	8,00	basic	0
16	X16	7,50	basic	0
17	X17	12,33	basic	0
18	X18	13,50	basic	0
19	X19	3,00	basic	0
20	X20	17,83	basic	0
21	X21	5,00	basic	0
22	X22	3,17	basic	0
23	X23	0,00	basic	0
24	X24	0	at bound	0
25	X25	0	at bound	0
26	X26	0	at bound	1,00
27	X27	0	at bound	1,00
28	X28	0	at bound	1,00
29	X29	0	at bound	1,00
30	X30	0	at bound	1,00
31	X31	0	at bound	1,00
32	X32	0	at bound	1,00
33	X33	0	at bound	1,00
34	X34	0	at bound	1,00
35	X35	0	at bound	1,00
36	X36	0	at bound	1,00
37	X37	0	at bound	1,00
38	X38	0	at bound	1,00
39	X39	0	at bound	1,00
40	X40	0	at bound	1,00
41	X41	0	at bound	1,00
42	X42	0	at bound	1,00
43	X43	0	at bound	1,00
44	X44	0	at bound	1,00
45	X45	0	at bound	1,00
46	X46	0	at bound	1,00
47	X47	0	at bound	1,00
48	X48	0	at bound	1,00
49	X49	0	at bound	1,00
50	X50	0	at bound	1,00
	<b>Goal 1:</b>	<b>Minimize</b>	<b>G1 =</b>	<b>0</b>





EK-14. Hızlandırılma Sonucunda Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

	15:05:53		Wednesday	January	15	2020		
	Goal Level	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	G1	X1	4,33	0	0	0	-1,00	1,00
2	G1	X2	2,00	0	0	0	0	M
3	G1	X3	3,83	0	0	0	0	M
4	G1	X4	3,00	0	0	0	0	M
5	G1	X5	2,00	0	0	0	0	M
6	G1	X6	4,00	0	0	0	0	M
7	G1	X7	31,83	0	0	0	0	M
8	G1	X8	4,00	0	0	0	0	M
9	G1	X9	2,00	0	0	0	0	M
10	G1	X10	3,83	0	0	0	0	M
11	G1	X11	2,83	0	0	0	0	M
12	G1	X12	25,00	0	0	0	-1,00	1,00
13	G1	X13	27,00	0	0	0	-1,00	1,00
14	G1	X14	6,00	0	0	0	-1,00	1,00
15	G1	X15	8,00	0	0	0	-1,00	1,00
16	G1	X16	7,50	0	0	0	-1,00	1,00
17	G1	X17	10,33	0	0	0	-1,00	1,00
18	G1	X18	10,50	0	0	0	-1,00	1,00
19	G1	X19	3,00	0	0	0	-1,00	1,00
20	G1	X20	15,83	0	0	0	-1,00	1,00
21	G1	X21	5,00	0	0	0	0	M
22	G1	X22	3,17	0	0	0	-1,00	1,00
23	G1	X23	0,00	0	0	0	-1,00	0
24	G1	X24	0	0	0	0	0	M
25	G1	X25	0	0	0	0	0	M
26	G1	X26	0	1,00	0	1,00	0	M
27	G1	X27	0	1,00	0	1,00	0	M
28	G1	X28	0	1,00	0	1,00	0	M
29	G1	X29	0	1,00	0	1,00	0	M
30	G1	X30	0	1,00	0	1,00	0	M
31	G1	X31	0	1,00	0	1,00	0	M
32	G1	X32	0	1,00	0	1,00	0	M
33	G1	X33	0	1,00	0	1,00	0	M
34	G1	X34	0	1,00	0	1,00	0	M
35	G1	X35	0	1,00	0	1,00	0	M
36	G1	X36	0	1,00	0	1,00	0	M
37	G1	X37	0	1,00	0	1,00	0	M

EK-14. (Devam) Hızlandırılma Sonucunda Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

	15:05:53		Wednesday	January	15	2020		
36	G1	X36	0	1,00	0	1,00	0	M
37	G1	X37	0	1,00	0	1,00	0	M
38	G1	X38	0	1,00	0	1,00	0	M
39	G1	X39	0	1,00	0	1,00	0	M
40	G1	X40	0	1,00	0	1,00	0	M
41	G1	X41	0	1,00	0	1,00	0	M
42	G1	X42	0	1,00	0	1,00	0	M
43	G1	X43	0	1,00	0	1,00	0	M
44	G1	X44	0	1,00	0	1,00	0	M
45	G1	X45	0	1,00	0	1,00	0	M
46	G1	X46	0	1,00	0	1,00	0	M
47	G1	X47	0	1,00	0	1,00	0	M
48	G1	X48	0	1,00	0	1,00	0	M
49	G1	X49	0	1,00	0	1,00	0	M
50	G1	X50	0	1,00	0	1,00	0	M
	G1	Goal	Value	(Min.) =	0	(Alternate	Solution	Exists!!)
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	ShadowPrice Goal 1
1	C1	120,67	=	120,67	0	120,67	M	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0	4,34	0
3	C3	25,00	=	25,00	0	0	25,00	0
4	C4	27,00	=	27,00	0	0	27,00	0
5	C5	6,00	=	6,00	0	0	6,00	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0	7,50	0
8	C8	10,33	=	10,33	0	0	10,34	0
9	C9	10,50	=	10,50	0	0	10,50	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0	3,00	0
11	C11	15,83	=	15,83	0	0	15,84	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0	3,17	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0	M	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0	M	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
20	C20	2,00	>=	2,00	0	0	M	0

EK-14. (Devam) Hızlandırılma Sonucunda Karar Değişkenleri İçin Hesaplanan Değerler Ve Sonuçlar

	15:05:53		Wednesday	January	15	2020		
41	G1	X41	0	1,00	0	1,00	0	M
42	G1	X42	0	1,00	0	1,00	0	M
43	G1	X43	0	1,00	0	1,00	0	M
44	G1	X44	0	1,00	0	1,00	0	M
45	G1	X45	0	1,00	0	1,00	0	M
46	G1	X46	0	1,00	0	1,00	0	M
47	G1	X47	0	1,00	0	1,00	0	M
48	G1	X48	0	1,00	0	1,00	0	M
49	G1	X49	0	1,00	0	1,00	0	M
50	G1	X50	0	1,00	0	1,00	0	M
	G1	Goal	Value	(Min.) =	0	(Alternate	Solution	Exists!!)
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	ShadowPrice Goal 1
1	C1	120,67	=	120,67	0	120,67	M	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0	4,34	0
3	C3	25,00	=	25,00	0	0	25,00	0
4	C4	27,00	=	27,00	0	0	27,00	0
5	C5	6,00	=	6,00	0	0	6,00	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0	8,00	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0	7,50	0
8	C8	10,33	=	10,33	0	0	10,34	0
9	C9	10,50	=	10,50	0	0	10,50	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0	3,00	0
11	C11	15,83	=	15,83	0	0	15,84	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0	3,17	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0	M	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0	M	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0	M	0
20	C20	2,00	>=	2,00	0	0	M	0
21	C21	3,83	>=	3,83	0	0	M	0
22	C22	2,83	>=	2,83	0	0	M	0
23	C23	5,00	>=	5,00	0	0	M	0
24	C24	0,00	>=	0	0,00	-M	0,00	0
25	C25	0	>=	0	0	-M	0	0

EK-15. Hızlandırılma Sonucunda Kısıtlar İçin Bulunan Değerler

01-15-2020 15:08:52	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price Goal 1
1	C1	120,67	=	120,67	0	0
2	C2	4,33	=	4,33	0	0
3	C3	25,00	=	25,00	0	0
4	C4	27,00	=	27,00	0	0
5	C5	6,00	=	6,00	0	0
6	C6	8,00	=	8,00	0	0
7	C7	7,50	=	7,50	0	0
8	C8	10,33	=	10,33	0	0
9	C9	10,50	=	10,50	0	0
10	C10	3,00	=	3,00	0	0
11	C11	15,83	=	15,83	0	0
12	C12	3,17	=	3,17	0	0
13	C13	2,00	>=	2,00	0	0
14	C14	3,83	>=	3,83	0	0
15	C15	3,00	>=	3,00	0	0
16	C16	2,00	>=	2,00	0	0
17	C17	4,00	>=	4,00	0	0
18	C18	31,83	>=	31,83	0	0
19	C19	4,00	>=	4,00	0	0
20	C20	2,00	>=	2,00	0	0
21	C21	3,83	>=	3,83	0	0
22	C22	2,83	>=	2,83	0	0
23	C23	5,00	>=	5,00	0	0
24	C24	0,00	>=	0	0,00	0
25	C25	0	>=	0	0	0

EK-16. Hızlandırılma Sonucunda Bulunan Diğer Sonuçlar

01-15-2020 15:09:51	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1
1	X1	4,33	basic	0
2	X2	2,00	basic	0
3	X3	3,83	basic	0
4	X4	3,00	basic	0
5	X5	2,00	basic	0
6	X6	4,00	basic	0
7	X7	31,83	basic	0
8	X8	4,00	basic	0
9	X9	2,00	basic	0
10	X10	3,83	basic	0
11	X11	2,83	basic	0
12	X12	25,00	basic	0
13	X13	27,00	basic	0
14	X14	6,00	basic	0
15	X15	8,00	basic	0
16	X16	7,50	basic	0
17	X17	10,33	basic	0
18	X18	10,50	basic	0
19	X19	3,00	basic	0
20	X20	15,83	basic	0
21	X21	5,00	basic	0
22	X22	3,17	basic	0
23	X23	0,00	basic	0
24	X24	0	at bound	0
25	X25	0	at bound	0
26	X26	0	at bound	1,00
27	X27	0	at bound	1,00
28	X28	0	at bound	1,00
29	X29	0	at bound	1,00
30	X30	0	at bound	1,00
31	X31	0	at bound	1,00
32	X32	0	at bound	1,00
33	X33	0	at bound	1,00
34	X34	0	at bound	1,00
35	X35	0	at bound	1,00
36	X36	0	at bound	1,00
37	X37	0	at bound	1,00
38	X38	0	at bound	1,00
39	X39	0	at bound	1,00

EK-16. (Devam) Hızlandırılma Sonucunda Bulunan Diğer Sonuçlar

01-15-2020 15:09:51	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1
14	X14	6,00	basic	0
15	X15	8,00	basic	0
16	X16	7,50	basic	0
17	X17	10,33	basic	0
18	X18	10,50	basic	0
19	X19	3,00	basic	0
20	X20	15,83	basic	0
21	X21	5,00	basic	0
22	X22	3,17	basic	0
23	X23	0,00	basic	0
24	X24	0	at bound	0
25	X25	0	at bound	0
26	X26	0	at bound	1,00
27	X27	0	at bound	1,00
28	X28	0	at bound	1,00
29	X29	0	at bound	1,00
30	X30	0	at bound	1,00
31	X31	0	at bound	1,00
32	X32	0	at bound	1,00
33	X33	0	at bound	1,00
34	X34	0	at bound	1,00
35	X35	0	at bound	1,00
36	X36	0	at bound	1,00
37	X37	0	at bound	1,00
38	X38	0	at bound	1,00
39	X39	0	at bound	1,00
40	X40	0	at bound	1,00
41	X41	0	at bound	1,00
42	X42	0	at bound	1,00
43	X43	0	at bound	1,00
44	X44	0	at bound	1,00
45	X45	0	at bound	1,00
46	X46	0	at bound	1,00
47	X47	0	at bound	1,00
48	X48	0	at bound	1,00
49	X49	0	at bound	1,00
50	X50	0	at bound	1,00
	Goal 1:	Minimize	G1 =	0

