

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BULANIK CPM İLE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA: TÜRKİYE İNŞAAT
ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜLLÜ DEĞİRMENCİ

1800000683

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Program: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet N. UĞURAL

MAYIS 2021

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BULANIK CPM İLE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA: TÜRKİYE İNŞAAT
ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
GÜLLÜ DEĞİRMENCİ
1800000683

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Program: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet N. UĞURAL

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. F. Heyecan GİRİTLİ

Dr. Öğr. Üyesi Bahriye İLHAN JONES (İTÜ)

MAYIS 2021

ÖNSÖZ

Projelerin yönetilmesi ve planlanması özellikle inşaat sektörü düşünüldüğünde zorlu bir süreci içermektedir. İnşaat projeleri oluşumunun ilk evresinden son evresine kadar çok fazla problemi içerisinde barındırmaktadır. Durum değişikliklerinin çok olduğu bu oluşumlarda kesin verilerle sürecin yönetilmesi ve planlanması oldukça güçtür. Bu çalışma, karmaşık bir problemin matematiksel modellenmesi kullanılarak, Bulanık CPM konusunu ve bu alanda geliştirilmiş olan çeşitli yöntemlerin teorik bilgilerini ve bir inşaat projesine uygulamasını içermektedir.

Yapılan bu çalışmanın konu ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

Yükseköğrenim sürecimin ve tez çalışmamın başlangıcından bu güne kadar vermiş olduğu emeklerden ve bu tezin oluşumuna sağladığı katkılardan dolayı çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mehmet N. UĞURAL'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmama sağladığı katkılardan dolayı meslektaşım Sayın Furkan ÇOLAK' a çok teşekkür ederim. Ayrıca her zaman beni destekleyen ve bu süreçte her daim yanımda olduklarını hissettiren aileme sonsuz teşekkür ederim.

Güllü DEĞİRMENCİ

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
SİMGELER	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Proje Yönetimi ve Planlama.....	6
2.1.1. Proje Kavramı ve Özellikleri	6
2.1.2. Proje Yönetimi Kavramı ve Yönetim Fonksiyonları	7
2.1.2.1. Proje Yönetim Fonksiyonları	10
2.1.2.2. Proje Programlama- Planlama ve Kontrol Kavramları	12
2.1.3. Proje Planlama ve Teknikleri (Klasik Metotlar)	13
2.1.3.1. Şebeke Çizim Teknikleri.....	13
2.1.3.2. Proje Planlama Teknikleri.....	14
2.1.3.2.1. Gant Şeması (Çubuk Diyagramları)	16
2.1.3.2.2. CPM (Kritik Yol Metodu)	16
2.1.3.2.3. PERT (Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği)	17
2.2. Bulanık Mantık	21
2.2.1. Bulanık Kümeler ve Bulanık Sayılar	23
2.2.1.1. Üçgen Bulanık Sayılar	27
2.2.1.2. Yamuk Bulanık Sayılar	27
2.2.1.3. Bulanık Küme Özellikleri ve Bulanık Sayılarla İşlemler	29
2.2.1.4. Üyelik Dereceleri ve Üyelik Fonksiyonları	32
2.2.2. Bulanık Mantık Kural Tabanı	35
2.2.2.1. Bulanıklaştırma (Fuzzification)	36
2.2.2.2. Bulanık Kural Tabanı (Rule-Base).....	36
2.2.2.3. Bulanık Çıkarım Mekanizması (Inference).....	36
2.2.2.4. Durulaştırma (Defuzzication).....	36

2.3. Lineer (Doğrusal) Programlama	39
2.3.1. Lineer (Doğrusal) Programlamanın Tanımı	40
2.3.2. Lineer (Doğrusal) Programlama Problemlerinin Formülasyonu	41
2.4. Bulanık CPM (FCPM)	42
2.4.1. Bulanık CPM ile Lineer (Doğrusal) Programlama	44
2.4.2. Yager Sıralama Yöntemi	47
2.4.2.1. Göreceli Yol Kritiklik Derecesi	50
2.4.3. Alfa Kesim Yöntemi	50
3. BULANIK CPM YÖNTEMİ İLE PROJE TOPLAM SÜRESİNİN BELİRLENMESİ VE ÖRNEK BİR UYGULAMA	54
3.1. Proje Tanıtımı.....	55
3.2. Projenin Klasik CPM Yöntemi ile Kritik Yol Tespiti ve Tamamlanma Süresinin Hesaplaması.....	56
3.3. Projenin Bulanık CPM Yöntemi ile Kritik Yol Tespiti ve Tamamlanma Süresinin Hesaplaması.....	61
3.3.1. Birinci Çözüm Algoritması	63
3.3.1.1. 4.a. Birinci Çözüm Algoritmasının Bulanık Sürelerle (FCPM) Hesaplanması	63
3.3.1.2. 4.b. Birinci Çözüm Algoritmasının Yager Sıralama Yöntemiyle Hesaplanması	65
3.3.2. İkinci Çözüm Algoritması	68
3.3.2.1. 4.c. İkinci Çözüm Algoritmasının Alfa Kesim Yöntemiyle Hesaplanması	68
3.3.2.2. 4.d. Adımı: İkinci Çözüm Algoritmasının Alanların Merkezi (Durulaştırma) Yöntemiyle Hesaplanması	70
4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	73
5. KAYNAKÇA	75
6. EKLER	79

KISALTMALAR

PMI	: Project Management Institute
PMBOK	: Project Management Body of Knowledge
ISO	: Uluslararası standartlar enstitüsü
TDK	: Türk Dil Kurumu
IPMA	: International Project Management Association
WBS	: Work Breakdown Structure
AOA	: Activity On Arc
AON	: Activity On Node
PERT	: Project Evaluation and Review Technique
CPM	: Critical Path Method
ES	: Earliest Start Time - Erken Başlangıç Süresi
EF	: Earliest Finish Time - Erken Bitiş Süresi
LS	: Lastest Start Time – Erken Başlangıç Süresi
LF	: Lastest Finish Time – Erken Bitiş Süresi
TF	: Total Float - Toplam bolluk
FCPM	: Fuzzy Critical Path Method
FPERT	: Fuzzy Project Evaluation and Review Technique
LP	: Lineer Programing

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1: Bulanık CPM-LP Model Çözümleri.....	64
Tablo 3.2: Proje Faaliyetleri Sıralama Endeksleri.....	66
Tablo 3.3: Alfa Kesim Yöntemi Hesaplamaları.....	69
Tablo 3.4: Alanların Merkezi (Durulaştırma) Yöntemi Hesaplamaları.....	70
Tablo 3.5: Hesaplama Sonuçları.....	71
EK A.1: Proje Faaliyet Süreleri ve Öncüllük İlişkileri.....	79
EK B.1: Bulanık Faaliyet Süreleri (Üçgen Sayılarla).....	82
EK C.1: Alfa Kesim Faaliyet Süreleri (0,1 artırımla).....	84

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Araştırma Metodolojisi.....	6
Şekil 2.1: Proje Yönetimi Evreleri	9
Şekil 2.2: Proje Yönetim Üçgeni	10
Şekil 2.3: Puko Döngüsü	12
Şekil 2.4: Kontrol Sistem Süreci	13
Şekil 2.5: "Sıcaklık" Dilsel Değişkeni Ve Dilsel Terimleri	21
Şekil 2.6: Bulanık Mantık Modeli	24
Şekil 2.7: Klasik Mantık Modeli	24
Şekil 2.8: Supnormal Bulanık Küme	25
Şekil 2.9: Normal Bulanık Küme	25
Şekil 2.10: Konveks Normal Bulanık Küme	26
Şekil 2.11: Üçgen Bulanık Küme Üyelik Fonksiyon Grafiği	28
Şekil 2.12: Yamuk Bulanık Sayılar Grafik Gösterim	28
Şekil 2.13: Bulanık Kümelerin Kesişme Özelliği	30
Şekil 2.14: Bulanık Kümelerin Birleşme Özelliği	31
Şekil 2.15: Bulanık Kümelerin Evrik Alma Özelliği	31
Şekil 2.16: Üyelik Fonksiyonu Tipleri	34
Şekil 2.17: Bulanık Sistem Yapısı	35
Şekil 2.18: Ağırlık Merkezi Yöntemi	37
Şekil 2.19: Alanların Merkezi Yöntemi	38
Şekil 2.20: Alfa Kesimi ve Üyelik Fonksiyonu	53
Şekil 3.1: Uygulama Projesine Ait Şebeke (Ağ) Diyagramı	58

SİMGELER

μ	: Ortalama Faaliyet Süresi (PERT Yöntemi)
σ	: Varyans
ss	: Standart Sapma
i	: i Faaliyeti
j	: j Faaliyeti
t_{ij}	: i j Faaliyetleri Arası Süre
$\bar{A}$	: Bulanık küme
$\mu_{\bar{A}}(x)$	: $\bar{A}$ bulanık kümesine ait $x \in X$ bulanık sayısının üyelik fonksiyonu
λ	: μ Üyelik Fonksiyonunun Başka Bir Temsili
$(+)$	: Bulanık Toplama İşlemi
$(-)$	: Bulanık Çıkarma İşlemi
(x)	: Bulanık Çarpma İşlemi
$(:)$	: Bulanık Bölme İşlemi
$(A \cap B)(x)$	: A ve B Bulanık Kümelerinin Kesişimi
$\wedge$	: Minimum operatörü
$(A \cup B)(x)$	: A ve B Bulanık Kümelerinin Birleşimi
$\vee$	: Maksimum operatörü
$\sum \mu_c(z)$	: Üyelik Fonksiyonları Toplamı C Çıkarım Kümesinde
$\int \mu_c(z) dz$	: Üyelik Fonksiyonları İntegrali C Çıkarım Kümesinde
n	: Düğüm Numarası
N	: n Dğümleri Kümesi
D	: Toplam Proje Süresi
T_{ij}	: $(i, j) \in A$ Kümesinde Tanımlanmış Faaliyet Süresi
x_{ij}	: $(i, j) \in A$ Kümesinde Karar Değişkeni
$\bar{D}$	: Bulanık Toplam Proje Süresi
$\bar{T}_{ij}$	: $(i, j) \in \bar{A}$ Kümesinde Bulanık Faaliyet Süresi
$I(\bar{t})$	: Yager Sıralama İndeksi
k	: Şebeke Diyagramı Yol Sıra Numarası
α	: Alfa Kesim Değeri
t_α	: Alfa Kesim Değerindeki Faaliyet Süresi
p^*	: Proje Kritik yolu
$\deg_{Cr}^R(p_k^*)$	: P_k .Yolun Görelî Kritiklik Derecesi
$(\bar{T}_{ij})_\alpha$	: Alfa Kesim Değerindeki ij Faaliyet Süresi

Üniversite : **İstanbul Kültür Üniversitesi**
Enstitü : **Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**
Anabilim Dalı : **İnşaat Mühendisliği**
Programı : **Proje Yönetimi**
Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet N. UĞURAL**
Tez Türü ve Tarihi : **Yüksek Lisans – Mayıs 2021**

ÖZET

BULANIK CPM İLE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA: TÜRKİYE İNŞAAT ENDÜSTRİSİNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Güllü DEĞİRMENCİ

Türkiye ve dünya ekonomisine bakıldığında inşaat sektörünün pazar payının diğer birçok sektöre göre daha fazla olduğu görülmektedir. Firmalar ulusal ve uluslararası arenada bu pazarda var olabilmek için zorlu bir rekabet ortamıyla başa çıkmak zorundadır. Oluşan rekabet ortamı, firmaları gelişen teknolojiyle birlikte projelerinde farklılaşmaya ve kapsam artışına yöneltmiştir. Kapsam artışıyla birlikte daha kompleks projeler ortaya çıkmıştır. İnşaat projelerinde karşılaşılan maliyet-zaman-kalite kısıtları artan kapsamla birlikte daha çok yönetilmeye ihtiyaç duymuştur. Özellikle zaman parametresinin yönetimi, önceden değerlendirilmesi gereken durumların bilinmemesi veya gerçekçi bir yaklaşım sergilenmemesi yönetim sürecini zorlaştırmakta ve firmaların zorlayıcı finansal durumlarla karşılaşmasına neden olmaktadır. Proje yönetimi için mevcutta var olan klasik planlama yöntemlerden yararlanılıyor oluşu yönetim sürecinde bilgi kayıplarına sebep olmaktadır. İnşaat projelerinin, insan gücüne bağlı faaliyetler barındırıyor olması, iş kalemlerinin kesin faaliyet sürelerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum faaliyet sürelerinde dolayısıyla da proje tamamlanma süresinde “belirsizlik” olarak tanımlanan kavramı ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda firmalar gelişebilecek durumları değerlendirebilecekleri planlama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle proje planlamasında belirsizliğin göz önünde bulundurulduğu yöntemlere olan ilgi artmıştır. Bu yöntemlerden biri olan bulanık küme teorisinin klasik yöntemlere genişletilmesi ve yeni geliştirilen tekniklerle belirsiz durumlarla ilgili daha fazla bilgi sağlanabilmektedir.

1965 yılında Lotfi Aliasker Zadeh tarafından ortaya çıkarılmış olan bulanık küme teorisi, bulanık yani belirsiz durumların sayısal olarak ifade edilebileceği üzerine geliştirilmiştir. Determinist yapının aksine belirsiz yapı korunarak daha fazla bilgi elde edilebileceği görülmüştür. Bu bağlamda bulanık küme teorisi, mevcut olan klasik

CPM ve PERT yöntemlerine genişletilerek bulanık CPM ve bulanık PERT (FCPM ve FPERT) yöntemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Bu çalışma; birçok inşaat projesinde tercih edilmekte olan klasik kritik yol metodunun (CPM) örnek bir proje üzerinde bulanık mantık çerçevesinde önerilen iki farklı çözüm algoritmasıyla incelenmesini içermektedir. Çalışma, bulanıklık ile net değer dönüşüme imkân veren yöntemler ve doğrusal programlama (LP) formülasyonuna dayanmaktadır. Yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda, belirsizliğin oldukça fazla olduğu inşaat proje süresinin hesaplanması problemi, çalışma konusu olarak belirlenmiş ve proje süresinin hesaplanması probleminde yer alan belirsizlikler için bulanık mantık ve bulanık küme teorisinden faydalanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen ve değerlendirilen bulanık yöntemlerle iki farklı çözüm algoritması oluşturulmuştur. Örnek bir inşaat projesinin kritik yolu ve proje süresi, proje faaliyetlerine bulanık süreler verilerek ve doğrusal programlama modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Çözümde ilk olarak klasik çözüm algoritması kullanılarak klasik CPM-LP çözümü yapılmıştır. Daha sonra proje faaliyet süreleri, üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir. Birinci bulanık çözüm algoritmasıyla bulanık CPM-LP modeli ile bulanık proje süresi ve kritik yolu hesaplanmış sonrasında Yager sıralama yöntemi-LP (Ranking Method) modeli ile bulanık proje süresi ile kritik yolun net değer dönüşümleri yapılmıştır. İkinci bulanık çözüm algoritmasıyla Alfa kesim metodu (α -Cutting Method) ile bulanık proje süresi ve kritik yolu hesaplanmış sonrasında Alanların merkezi yöntemi (COA- Center of Area) ile durulaştırılarak proje süresi ve kritik yolun net değer dönüşümleri yapılarak net α kesim aralığı belirlenmiştir. Daha sonra her iki çözüm algoritmasıyla yapılan proje çözümlerinden elde edilen bulanık ve net sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca klasik ve bulanık CPM çözümleri ile yöntemlerin anlaşılması, yöntemler arasındaki benzerlikler ve farklılıkların ortaya konulmuştur. Çalışmanın özgünlüğü incelenen projenin gerçek bir proje olması, kritik yolu ve bitiş süresinin önceden bilinmesi ve kullanılan bulanık yöntemlerin bu inşaat projesinde kıyaslanmasına olanak vermesi ile sağlanmıştır.

Yapılan uygulama çalışması sonucunda önerilen yöntemlerin inşaat projelerinde uygulanabilirliği desteklenmiş, bulanık ve net proje süresi hesaplama yöntemlerine ait yaklaşımlar ortaya koyularak bulanık ve net süre farklılıkları üzerinde durulmuştur. Her iki çözüm algoritmasıyla yapılan analizler neticesinde proje süresinin net bir değerdense bulanık olarak hesaplanmasının proje yönetim sürecinde daha fazla bilgi sağlar nitelikte olduğu görülmüştür. Bulanık proje zaman planlamasında kullanılan bulanık faaliyet süresinin üyelik fonksiyonunun derecesinin proje kritik yolu ve süresini değiştirerek projenin her hangi bir aşamasındaki değişim durumunu ve belirsizliği ortaya koyabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, İnşaat, Proje yönetimi, Lineer programlama

University : İstanbul Kültür University
Institute : Institute Of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Programme : Project Management
Advisor : Assistant Prof. Dr. Mehmet N. UĞURAL
Thesis Type – Date : Masters Degree – May 2021

ABSTRACT

FUZZY CPM WITH LINEAR PROGRAMMING: A CASE STUDY IN TURKISH CONSTRUCTION INDUSTRY

Güllü DEĞİRMENCİ

Considering the market share of the construction sector in Turkey and the world economy appears to be higher than many other sectors. Companies have to cope with a tough competitive environment in order to exist in this market in the national and international arena. The resulting competitive environment has led companies to differentiate and increase their scope in their projects with the developing technology. With the increase in coverage, more complex projects have emerged. Cost-time-quality constraints encountered in construction projects required more management with increasing scope. In particular, time parameter management, ignorance of situations that need to be assessed in advance, or lack of a realistic approach complicate the management process and cause companies to face difficult financial situations. The use of classical planning methods for project management leads to data loss in the management process. The fact that construction projects involve activities dependent on manpower makes it difficult to determine the exact activity periods of the work items. This situation reveals the concept defined as "uncertainty" in the activity periods and therefore in the project completion period. In this context, companies need planning methods that can assess the situations in which they can develop. Thus, there is a growing interest in methods that take into account uncertainty in project planning. More information about uncertain situations has been provided by extending the fuzzy set theory, which is one of these methods, to classical methods and by newly developed techniques.

The fuzzy set theory, which was introduced by Lotfi Aliasker Zadeh in 1965, was developed on the basis that fuzzy states can be expressed numerically. Contrary

to the deterministic structure, it has been observed that more information can be obtained by preserving the uncertain structure. In this context, fuzzy set theory has expanded to the existing classical CPM and PERT methods, leading to the emergence of fuzzy CPM and PERT (FCPM and FPERT) methods.

This study includes the examination of the classical critical path method (CPM), which is preferred in many construction projects, on a sample project with two different solution algorithms proposed within the framework of fuzzy logic. The research is based on methods that allow the conversion of net value to turbidity and the formulation of linear programming (LP). As a result of the investigations and researches, the problem of calculating the duration of the construction project, where the uncertainty is quite high, was determined as the study subject and fuzzy logic and fuzzy set theory were used for the uncertainties in the problem of project duration calculation. Two different solution algorithms were created using fuzzy methods that were examined and evaluated within the scope of the study. The critical path and project duration of a sample construction project were calculated by giving the project activities fuzzy times and using the linear programming model. In the solution, the classical CPM-LP solution was first solved using the classical solution algorithm. Then, project activity periods were represented by triangular fuzzy numbers. The fuzzy project time and critical path were calculated with the fuzzy CPM-LP model with the first fuzzy solution algorithm, and then the net value transformations of the fuzzy project duration and the critical path were made with the Yager sorting method-LP (Ranking Method) model. With the second fuzzy solution algorithm, the fuzzy project time and critical path were calculated with the Alpha cutting method (α -Cutting Method), and then the net α cutting range was determined by rinsing the project time and the critical path with the center of the area method (COA). Then the fuzzy and clear results obtained from the project solutions made with both solution algorithms were compared. In addition, understanding of classical and fuzzy CPM solutions and methods, similarities and differences between methods are revealed. The originality of the study has been ensured by the fact that the examined project is a real project, the critical path and the end time are known in advance and the fuzzy methods used allow comparison in this construction project.

As a result of the case study, the applicability of the proposed methods in construction projects was supported, and fuzzy and clear time differences were emphasized by introducing the approaches of the fuzzy and net project time calculation methods. As a result of the analysis made with both solution algorithms, it was seen that the fuzzy calculation of the project duration rather than a net value provides more information in the project management process. It has been determined that the fuzzy activity duration used in fuzzy project scheduling can reveal the change status and uncertainty at any stage of the project by changing the project critical path and duration of the membership function.

Keywords: Fuzzy logic, Construction, Project management, Linear programming

1. GİRİŞ

Devlet kurumları ve sanayi kuruluşları kapasite kullanımlarını en üst düzeye çıkarmak ve maliyetleri en aza indirmek için projelerini planlamaktadır. Günümüzün son derece rekabetçi iş ortamı proje yönetimi bağlamında, etkinlikleri zamanında planlama, katı maliyet kontrolü, zaman ve performans yönergelerinde ilerlemeyi izleme yeteneği, zamanında teslimat gibi rekabetçi önceliklere sahip olabilmek giderek önem kazanmaktadır. Proje yönetiminin temel alanlarından birisi olan proje zaman yönetimi, faaliyetlerin (görevlerin) mümkün olan en kısa sürede tamamlanabilecek şekilde programlanması, uygulanması ve kontrolü ile ilgilidir. Projelerdeki etkinlik süreleri, tanımlı ve bilinen olduğunda kritik yol yönteminin (CPM), bu tip zorlukların üstesinden gelme ve projelerin verimli bir şekilde yönetilmesi noktasında yararlı bir araç olduğu bilinmektedir (Karahan ve Ezin, 2014).

Proje yönetimi, projeye ait ağ diyagramları üzerinden daha kolay ve basit bir şekilde yürütülebilmektedir. Bir proje ağı, belirtilen faaliyetlerin tamamlanmasından sonra hangi faaliyetlerin başlaması gerektiğini gösteren, öncelik kısıtlamalarına göre gerçekleştirilmesi gereken bir dizi faaliyet olarak tanımlanır (Chen ve Huang, 2007). Böyle bir proje ağı yönlendirilmiş bir grafik olarak gösterilebilir. Ağ tekniği yöntemlerinden olan ve kritik yol yöntemi adı verilen CPM (Critical Path Method) yöntemi; projelerin planlanması ve kontrolüne yardımcı olmak için tasarlanmış ağ tabanlı bir yöntemdir (Atlı ve Kahraman, 2013). Bu yöntemin temel amacı, proje için zaman kontrolünü sağlayabilmektir. CPM tarafından sağlanan iki temel sonuç, projeyi tamamlamak için gereken toplam süre ve proje kritik yolunun belirlenmesidir (Atlı ve Kahraman, 2013). Ayrıca bir proje ağının birden fazla kritik yola sahip olabileceği unutulmamalıdır (Chen, 2006).

Proje yönetimi için mevcutta var olan klasik planlama yöntemlerden yararlanılıyor oluşu yönetim sürecinde bilgi kayıplarına sebep olmaktadır. CPM yönteminde kullanılan zaman değerleri belirlilik (kesinlik) temellidir (Bayraktar, 1995; Tekin, 2010). Gerçekte, bilgi belirsizliği ve yönetim senaryosunda meydana gelebilecek değişiklikler nedeniyle faaliyetlere ait süre tahminlerini yapmakta yol yöntemi vb. deterministik teknikleri kullanan geleneksel yaklaşımlar daha az etkili olmaktadır. Bununla birlikte, projeler için etkinlik sürelerinin kesin (determinist) bir şekilde sunulamayacağı birçok durum vardır. Bu bağlamda firmalar gelişebilecek durumları

değerlendirebilecekleri planlama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle proje planlamasında belirsizliğin göz önünde bulundurulduğu yöntemlere olan ilgi artmıştır. Bu noktada belirsizlik temelli problemlerin çözümünde, L.A. Zadeh (1965) tarafından önerilen bulanık küme teorisi kullanılabilmektedir (Elizabeth ve Sujatha, 2013a; Zadeh, 1965). Teori belirsiz durumların sayısal olarak ifade edilebileceği üzerine geliştirilmiştir. Projelerde kesin olmayan sürelerle sahip faaliyetlerin çokluğu dikkatleri çekmiş ve bu bağlamda bulanık küme teorisi kullanılarak geliştirilmiş farklı birçok çözüm yöntemi önerilmiştir (Chen, 2006; Chen & Huang, 2007; Chen ve Hsueh, 2008; Atlı ve Kahraman, 2013; Durucasu, vd., 2015).

Günümüzde yaşanan problemlerdeki zaman parametrelerinin belirsizliği, klasik yöntemlerin yerine bulanık CPM yani FCPM' in gelişmesine yol açmıştır (Elizabeth ve Sujatha, 2013a). Belirsizlik problemi için önerilmiş olan bir fikir, CPM probleminde en kısa yol sorununun tersi yani en uzun yol problemi olarak düşünülebileceği kavramına ve Zadeh (1965)'in genişleme prensibi ile uyumlu bir LP modeli oluşturulmasına dayanmaktadır (Chen ve Hsueh, 2008; Zadeh, 1965). Bu bağlamda proje ağındaki kritik yolu belirlemek için baştan sona en uzun yolu bulmak yeterlidir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008). En uzun yol ağı kritik yoludur (Alpay, 2007). Asıl amaç, kritik yoldaki kritik faaliyetleri belirlemektir.

Özellikle inşaat projeleri için, inşaatın süre uzunluğu ve bu sürece eşlik eden riskler nedeniyle, bir faaliyetin süresini doğru veya net bir şekilde tahmin etmek genellikle çok zor veya neredeyse imkânsızdır (Kuruj, vd., 2014). Ayrıca faaliyetlere atanan sürelerin keskin (deterministik) yapısı proje yönetimi için önemli sayılabilecek bazı bilgilerin kaybolmasına sebep olmaktadır (Chen, 2006). Bu bilgiler ışığında çalışmada ilk olarak klasik ve bulanık CPM yöntemlerinin anlaşılması amaçlanmıştır. Daha sonra geçmiş çalışmalar göz önüne alınarak (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008; Atlı ve Kahraman, 2013; Durucasu, vd., 2015) bulanık CPM çözüm yöntemlerinden olan ve etkili bir çözüm sunacağı değerlendirilen Yager sıralama (Yager Ranking Method), Alfa kesim (α -Cutting Method) ve durulaştırma yöntemlerinden alanların merkezi (COA- Center of Area) yöntemleri incelenmiştir. İncelenmiş olan bulanık yaklaşımların değerlendirilmesi sonucunda, bulanık proje planlama; yöntem seçimlerini, faaliyetlere atanması gereken üyelik derecelerinin belirlenmesini ve faaliyet sürelerinin hangi bulanık sayı tipiyle temsil edilmesi gibi konuları karar vericinin seçimine bıraktığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda kullanılacak bulanık

tekniklerin seçimi konusunda farklı görüşler ortaya çıkmıştır ve konuyla ilgili akademik ve bilimsel çalışmalar yapılmaya devam etmektedir (Chanas ve Zielinski, 2001; Chen, 2006; Tuş, 2006; Chen ve Hsueh, 2008; Atlı ve Kahraman, 2013; Durucasu, vd., 2015). Bu nedenle çalışmada yaygın olarak kullanılan teknikler arasındaki yaklaşım ve çözüm farklılıkları incelenerek problem çözümünde sonucu ne ölçüde etkileyebileceği ortaya konmak istenmiştir. Bununla birlikte çalışmada oluşturulmuş olan bulanık çözüm algoritmalarıyla; Chen (2006), Chen ve Hsueh (2008), Atlı ve Kahraman (2013), Durucasu vd. (2015) gibi çalışmalardan farklı olarak, proje süre ile kritik yolun bulunması probleminde, ilk olarak bulanık sonuçların elde edilmesi daha sonra net değer sonuçlarının elde edilmesi amaçlamıştır. Böylece bulanık sonuçların desteklenmesi dışında her iki durum için oluşabilecek süre farklılıkları ortaya konmak istenmiştir. Ayrıca çözüm algoritmaları Durucasu vd. (2015) çalışmalarında yapmış oldukları gibi bir inşaat projesinde uygulanmıştır.

Araştırma, birçok inşaat projesinde tercih edilmekte olan klasik kritik yol metodunun (CPM) örnek bir proje üzerinde bulanık mantık çerçevesinde uygulanmasını ve doğrusal programlama yöntemi (LP) yardımıyla çözümlenmesini içermektedir. LP formülasyonu, bir birim akışın başlangıç düğümünde proje ağına girdiğini ve bitiş düğümünde ayrıldığını varsayımı üzerine oluşturulmuştur. Bilinen kritik yol problemini LP ile formüle edilmiş ve bu klasik CPM-LP modelinden bulanık CPM-LP modeli ile Yager sıralama yöntemi-LP modelleri türetilmiştir (Chen, 2008). Bu bağlamda daha önceden yapılmış bir inşaat projesinin proje süresi ve kritik yolu; klasik çözüm algoritması kullanılarak klasik CPM-LP modeli ile çözülmüş, daha sonra aynı projenin proje faaliyetlerine bulanık süreler verilerek bulanık CPM-LP modeli ile çözülmüştür. Burada bulanık ve klasik CPM yöntemlerinin anlaşılması, yöntemler arasındaki benzerlikler ve farklılıkların ortaya konulması hedeflenmiştir. Bulanık CPM-LP modelinde proje faaliyet süreleri sıklıkla tercih edilmekte olan üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir. Bulanık faaliyet süreleri atanmış olan projenin proje toplam süresi, proje kritik yolu ve kritik yoldaki değişimin belirlenebilmesi için 2 farklı çözüm algoritması kullanılmıştır. Her bir çözüm algoritmasıyla proje toplam süresi ve kritik yolu; ilk olarak bulanık olarak hesaplanmış ikinci olarak bulanık değerlerin net değer dönüşü yapılmıştır.

Birinci bulanık çözüm algoritması olarak FCPM-LP model ile elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümü Yager sıralama metodu LP modeli kullanılarak

yapılmış ve proje toplam süresi ile kritik yolu belirlenmiştir. Böylece proje toplam süresi net bir değer olduğunda ne kadarlık bir süre farkı oluşturduğu ve proje kritik yolundaki değişim sınanmıştır. Bu çözüm algoritmasında Yager sıralama yöntemi kullanılmasının nedeni bu yöntemin üyelik fonksiyonlarının bilinmesini gerektirmemesidir. Böylece üyelik fonksiyonu atanmamış faaliyet süreleri için proje toplam süresinin, söz konusu net bir değerle temsil edilmesi gerektiğinde ne kadarlık bir süre farkı meydana geldiği belirlenmiştir. Daha sonra ikinci bulanık çözüm algoritması olarak üyelik fonksiyonları atanmış proje için Alfa (α) kesim yöntemiyle bulanık proje toplam süresi ve kritik yolu belirlenmiştir. Alfa (α) kesim yönteminden elde edilmiş olan bulanık sonuçların net değer dönüşümü durulaştırma yöntemlerinden olan alanların merkezi yöntemi kullanılarak yapılmış ve net proje toplam süresi ile kritik yolu belirlenmiştir. Bu çözüm algoritmasında Alfa (α) kesim yöntemi kullanılmasının nedeni bu yöntemin belirlenen kesim aralıklarıyla bulanıklığın korunmasına imkân vermesidir. Böylece bulanıklık özelliğinin kaybedilmemiş olması, projeye ait her bir yolun belirlenen seviyeler doğrultusunda projeye olan bağlılığını, başka bir deyişle üyeliğini göstermiştir. Çözümde kesim (olasılık) seviyeleri $[0,1]$ aralığında 0.1 artırımlarla gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte alanların merkezi yöntemiyle net değer dönüşü yapılarak proje toplam süresinin, söz konusu net bir değerle temsil edilmesi gerektiğinde ne kadarlık bir süre farkı meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca net değer dönüşümü yapılan proje toplam süresinin net değer kesim aralığı belirlenmiştir.

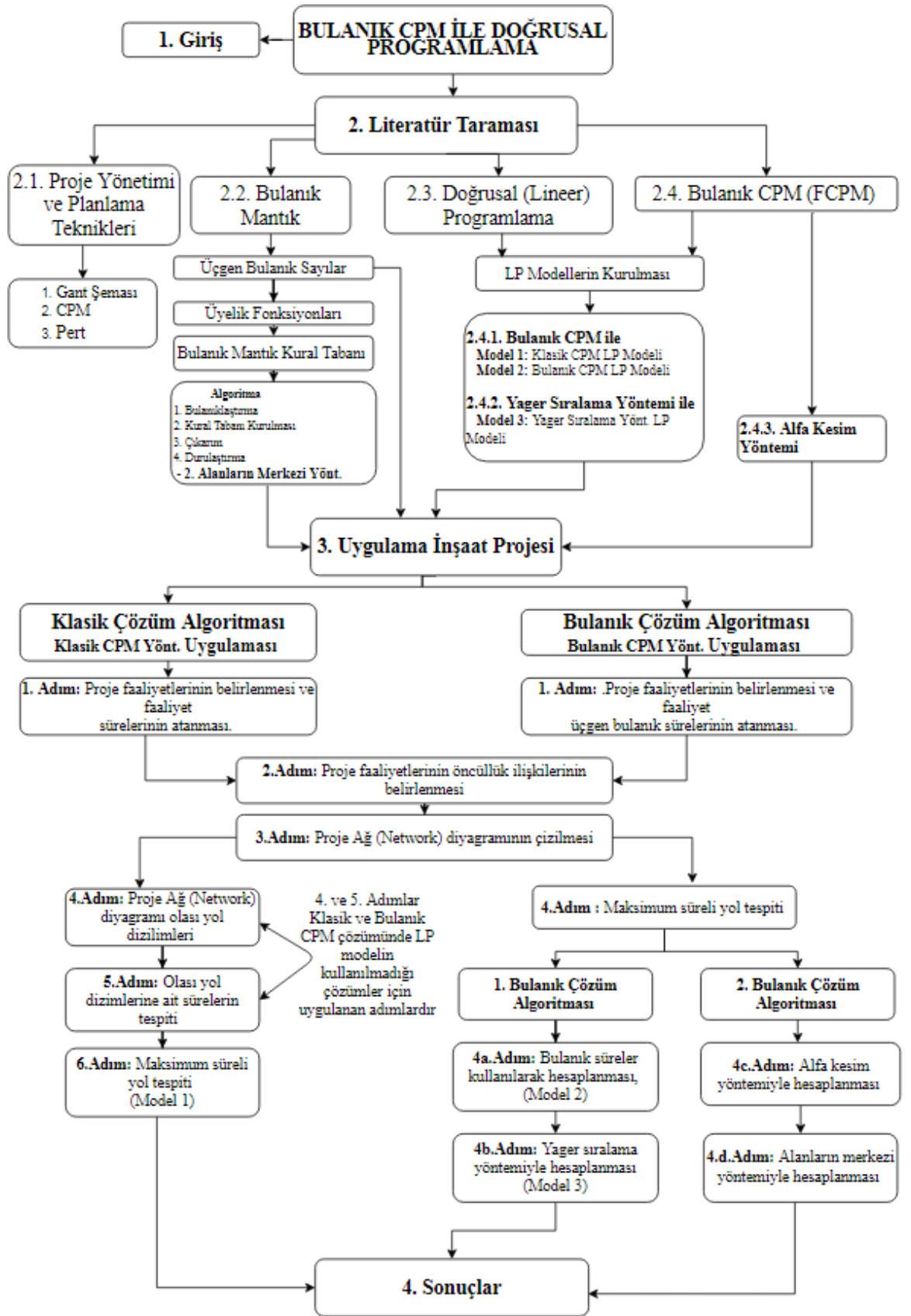
Sonuç olarak önerilen her iki bulanık çözüm algoritması ile elde edilmiş olan bulanık ve net değerler; proje süresinin değişiminin görülmesine bu bağlamda kritik yoldaki olası değişimlerin sınanmasına, bulanık yöntemlerin karşılaştırılmasına ve uygulanabilirliğinin test edilmesine imkân vermiştir. Uygulanmış bir inşaat projesi üzerinde önerilen çözüm algoritmaları uygulanarak, bulanık ve net değerlerle temsil edilebilen projenin proje toplam süresi, proje kritik yolu için toplam süredeki ve kritik yoldaki değişimler gösterilmeye çalışılarak çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır.

Çalışma 4 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde araştırmaya neden ihtiyaç duyulduğu, araştırmanın önemi ile klasik CPM ve bulanık CPM konularına giriş yapılmıştır, ikinci bölümde kavramsal çerçeve başlığı altında proje yönetimi ve planlanması, proje planlama teknikleri (klasik metotlar), bulanık mantık, doğrusal programlama (LP), bulanık CPM ile önerilen yöntemler ve LP modelleri, kavramları

açıklanmış, üçüncü bölümde bir inşaat projesi üzerinde uygulama yapılarak ikinci bölümde verilmiş olan teorik bilgilerin çözümlemesi yapılmış, son bölümde araştırma sonuçları tartışılmış ve çıkarımlarda bulunulmuştur.

Çalışmaya ait metodolojik yapı Şekil 1.1’de verilmiştir.





Şekil 1.1: Araştırma Metodolojisi

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde proje yönetimi ve proje zaman planlaması konusuna ilişkin kavramsal bilgiler açıklanmış ve geçmiş dönemde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Proje Yönetimi ve Planlama

Proje yönetimi ve projelerin planlanması günümüzde birçok alanı kapsamaktadır. Proje olarak tanımlayabildiğimiz her oluşumun yönetilmeye ve yönetim içerisinde, bir plan dâhilin de yürütülmeye ihtiyacı vardır. Özellikle inşaat sektörü ve inşaat projeleri ele alındığında yönetim ve planlama kavramları daha çok önem arz etmektedir. Bu sebeplerle ilk aşamada proje yönetimi ve proje planlaması kavramlarının anlaşılması gerekliliği açık bir şekilde görülmektedir.

2.1.1. Proje Kavramı ve Özellikleri

Proje kavramı, kaynak araştırmalarına bakıldığında üzerinde çokça tanımlamalar yapılmış bir kavramdır. Bu kavramlardan bazıları şu şekildedir;

Project Management Institute (PMI) tarafından yayınlanan PMBOK (2009)'e göre proje, “benzersiz bir ürün, hizmet ya da sonuç yaratmak için yürütülen geçici bir girişimdir.” (Özköse ve Gencer, 2019).

Uluslararası standartlar enstitüsü (ISO)'a göre; “Süre, maliyet ve kaynak kısıtlamalarını da içeren özellikli gereksinimlere uyumlu bir amacı gerçekleştirmek üzere başlangıç ve bitiş tarihleri olan, eşgüdümlü ve denetimli bir dizi aktiviteden oluşan eşsiz (ünik) bir süreçtir.” (ISO 21500, 2012).

Türkiye Bilişim Derneği'ne göre proje, “öngörülen hedeflere belirli bir süre içerisinde ulaşmak için, insan ve maddi kaynakları planlı bir çalışma içinde bir araya getiren ve kendi içerisinde bir bütünlük taşıyan yatırım ve etkinlikler paketidir.” (Özköse ve Gencer, 2019).

Türk Dil Kurumuna göre proje; “Değişik alanlarda önceden plan ve programa alınmış, maliyeti hesaplanmış, kurum ve kuruluşların yönetim organları tarafından onaylanmış, kısa ve uzun vadeye bağlanarak özel kurum veya devlet adına gerçekleştirilmesi kabul edilmiş bilimsel çalışma tasarısıdır.” (TDK, 2019).

Literatürde yer alan proje tanımlarına bakıldığında projelerin kendilerine özgü yapılarının olması, başlangıç ve bitiş sürelerinin belirli olması, belirli kısıtlar altında oluşturulmaları ve bir ürün, hizmet veya amaca yönelik yürütülmeleri proje kavramının temelini oluşturduğu görülmektedir. Süre kısıtı yani başlangıç ve bitiş sürelerinin belirli olması proje oluşumlarının geçicilik durumlarını açıklamaya imkân sağlarken, proje sonucunda elde edilmek istenen nihai ürün veya hizmetin geçicilik durumu genellikle karşılaşılan bir durum değildir. Project Management Institute, (2009)'a göre bu durum; “Çoğu proje kalıcı bir sonuca ulaşmak amacıyla yürütülür.” şeklinde belirtilmiştir (Özköse ve Gencer, 2019).

Projelerin proje olmalarını sağlayan özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Bayoğlu, 2005; Alpay, 2007; Mazlum, 2014);

- Tanımlanabilir bir amaca hizmet ederler.
- Başlangıç ve bitiş süreleri/tarihleri bellidir.
- Tek seferlik uygulamalardır.
- Geçicidirler.
- Süre, maliyet ve kalite hedefleri vardır.
- Sınırlı kaynaklarla gerçekleştirilirler.
- Farklı uzmanlık dallarını bir araya getirirler.
- İçerisinde belirsizlik ve risk barındırırlar.

Bahsetmiş olduğumuz özellikler genel kavramlar çerçevesinde ortaya çıkmış özelliklerdir. Bunlar dışında kalan özellikler ise yapılmak istenen projeye göre farklılık gösterebilmektedir.

2.1.2. Proje Yönetimi Kavramı ve Yönetim Fonksiyonları

Proje yönetimi proje kavramı çerçevesinde tanımlanmış amaçlar doğrultusunda ulaşılmak istenen ürün, hizmet veya sonucun elde edilme süreci içerisinde planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesidir.

Proje yönetimi; projenin hedefine ulaşması için ihtiyaç olan farklı organizasyonların projenin hacmine, süresine, maliyetine ve büyüklüğüne uygun bir şekilde bir araya getirilmesi ve bunların yönetilmesidir (Kömürlü ve Toltar, 2018).

Peşkircioğlu (1989)'a göre proje yönetimi; proje olarak tanımlanan işlerin, bu tanımdaki zaman, performans ve kaynak kriterleri ile kısıtları uyarınca önceden belirlenmiş olan hedefe ulaşmak için sürdürülen planlama, organizasyon, yönetim, kaynakların tahsisi ve kullanımı, uygulama, izleme, kontrol ve değerlendirme faaliyetlerinin bir bütünüdür (Peşkircioğlu, 1989).

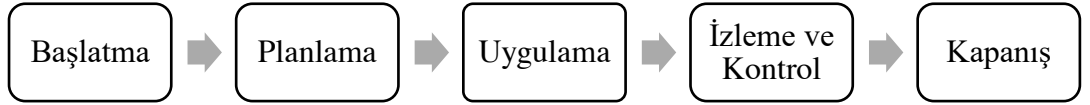
Çimen (1994) proje yönetimini, ulaşılmak istenen belli bir sonucu elde etmek için kullanılan maddi ve beşeri kaynakların ortak faaliyetlerini planlama, örgütleme, yürütme ve denetleme çalışmalarıdır (Çimen, 1994).

Proje yönetim sürecinin proje fikri oluştuğu andan başlayarak temel hedefe ulaşmayı sağlayan bir dizi evrenin bir birini takip etmesiyle oluştuğu görülmektedir. Ulaşılmak istenen amaçlara, sınırlı kaynaklarla, sınırlı bir zaman içinde ve sınır bir bütçeyle en verimli şekilde ulaşılmaya çalışılmaktadır. İnşaat sektörü düşünüldüğünde bir proje fikri oluştuğu andan itibaren mal sahibi veya projeyi yapmak isteyen kişinin şu şekilde hareket ettiği görülmektedir. Proje birbirini tamamlayan beş ayrı evreden oluşmaktadır. Şekil 2.1 ile proje yönetim evreleri görselleştirilmiştir.

Bu evreler ve tanımlamaları sırasıyla şöyledir (Çoşkun ve Ekmekçi, 2011):

- 1- Başlatma/Girişim Evresi:** Yapılmak istenen projeye yönelik; proje tanımının, uygun yer tespiti, ana hatların belirlenmesi, fizibilite çalışmaları vb. başlangıç süreci işlemlerini içermektedir. Bu kısım fizibilite çalışmaları sonucunda projenin yapılması konusunda olumlu veya olumsuz olarak sonuçlanan karar verme evresidir.
- 2- Planlama/Tasarım Evresi:** Girişim evresinde yapımına karar verilen projeyle ilgili tasarım ve organizasyon çalışmalarının yapıldığı yani projenin, amaçların, kısıtların tam olarak belirlendiği ve detayların çalışıldığı evredir. Uygulama aşamasına geçilmeden önceden proje tanımlarının tam olarak yapıldığı ve uygulamaya geçme kararının verildiği evredir.
- 3- Uygulama/Yapım Evresi:** Tasarımı yapılmış, organizasyon şemaları oluşturulmuş, gerekli tüm projeleri hazır olan ve gerekli kurumlardan onayı alınan projenin artık yapım işlemlerine başlandığı evredir.

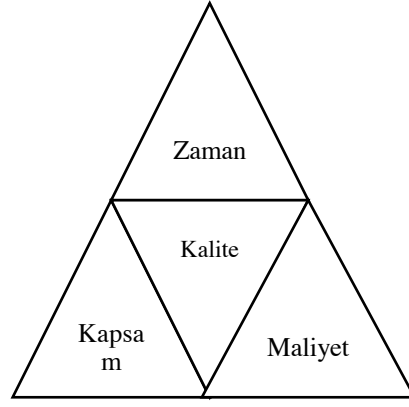
- 4- İzleme ve Kontrol Evresi:** Yapım evresi faaliyetlerinin düzenli bir şekilde takibinin yapıldığı ve oluşan program sapmaları değerlendirilerek tekrar planlama yapılarak uygulamaya alınan evredir.
- 5- Kapanış/Yapım sonrası Evresi:** Yapım sürecinin bitmiş olduğu, sözleşmelerin sonlandırıldığı, hesapların kapatıldığı evredir. Proje hangi amaç doğrultusunda üretildiyse o amaca yönelik işlemlerin yapıldığı gerekli kontrollere tabi tutulduğu evredir.



Şekil 2.1: Proje Yönetimi Evreleri (Project Management Institute (PMI), 2008)

İnşaat proje yöneticileri, projelerini zamanında, bütçe sınırlarını aşmadan, hedeflenen kaliteyi sağlayarak nihai ürünü güvenli bir biçimde teslim etmeyi hedeflerler. Bir projenin ana elemanları zaman, maliyet ve kapsamdır. Zaman; projenin tamamlanması için gerekli olan süreyi, maliyet; projedeki faaliyetler için gerekli olan kaynakların toplam bedelini, kapsam; projenin sınırlarını tanımlamaktadır. Yani, zaman ve kaynak belirli bir kapsam dâhilinde bir araya gelmektedir. Bu durum, kapsam çerçevesinde zaman ve maliyetin birbirini etkileyen iki unsur olduğunu ortaya koymaktadır (Özköse ve Gencer, 2019).

Başarılı bir proje yönetimi; maliyet, zaman, kapsam kısıtlarıyla belirlenen hedeflere ne ölçüde ulaşıldığı, proje finansörünün veya müşteri memnuniyetinin ne oranda karşılandığıyla ölçülmektedir. Bu kısıtlar birbiri ile ilintilidir. Kısıtlardan herhangi birinde oluşacak değişim durumu diğer kısıttı da etkilemektedir. Bu tip değişimler kaliteyi, dolayısıyla proje yönetiminin başarısını etkilemektedir (Kömürlü ve Toltar, 2018).



Şekil 2.2: Proje Yönetim Üçgeni (Bayoğlu, 2005)

2.1.2.1. Proje Yönetim Fonksiyonları

Proje yönetiminin ortaya çıktığı yıllar olan 1950'lerde; ilk defa bir birey proje yöneticisi olarak tanınmış ve bu bireye projenin hedeflerini gerçekleştirme sorumluluğu verilmiştir. 1970'li yıllar ve sonrasında, var olan teknikler geliştirilmiş ve yeni teknikler üretilmiştir. PMI (Project Management Institute) ve IPMA (International Project Management Association)'ın çalışmalarıyla proje yönetimi bağımsız bir meslek olarak kabul görülmüştür. PMI tarafından tanımlanan, profesyonel proje yönetim standardı olan PMBOK (Project Management Body of Knowledge) oluşturulmuştur. 1986 yılında yayınlanan PMBOK'ta süre ve maliyet yönetimi tekniklerinin yanına proje kapsam, kalite, risk, insan kaynakları, iletişim, sözleşme/tedarik teknikleri eklenmiş ve proje yönetiminin bilgi alanları genişletilmiştir. PMI dört yılda bir PMBOK kılavuzunu yayınlamaktadır. PMBOK, kılavuzu proje yönetimi sürecini; başlangıç, planlama, uygulama, denetim ve kontrol, kapanış başlıkları altında beş sürece (Şekil 2.1) dayandırmaktadır (Kömürlü ve Toltar, 2018).

Yönetim, proje yöneticilerinin hedeflerine ulaşmada yardım eden dört temel fonksiyondan oluşmaktadır. Bu fonksiyonlar birbirlerini ve yönetim sürecini etkileyen kavramlardır (Akyel, 2009). Fonksiyon kavramları şu şekildedir;

- 1- Planlama:** Yönetimin ilk fonksiyonu olan planlama; örgütün amaç ve hedeflerinin belirlendiği ve bunlara ulaşma sürecinin planlandığı evredir (Akyel, 2009).

2- Örgütlenme: Amaçlara uygun olarak işlerin gruplandırılması, bölümlerin kurulması, emir-komuta, yetki ve sorumluluk sınırlarının belirlenmesiyle uygun işletme yapısının kurulması yani organize edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Çalışanların işine bağlılığının, verimliliğinin artmasını ve işinde uzmanlaşmasını sağlamayı hedefler (Altıntop, 2014).

Bu evrede iş kırılım yapısı (WBS-Work Breakdown Structure) oluşturularak organizasyondaki görev dağılımlarının daha net görünmesi sağlanabilmektedir.

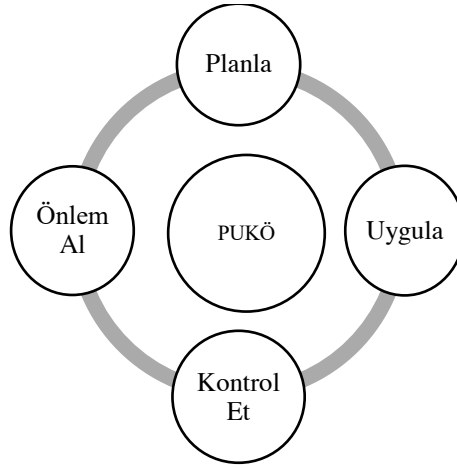
İş Kırılım Yapısı (WBS-Work Breakdown Structure) :

Projede yapılması gerekli tüm işlerin organize edilmesi, hiyerarşik düzenin detaylı biçimde ayrıştırılması ve gösterilmesidir. Küçük veya büyük tüm projeler için proje yöneticileri WBS yapısını oluşturabilirler. WBS yapısında temel olarak aşağıdaki yapının kurulması gerekmektedir (Toprak, 2010).

- Level 1: İşlerin Atanması
- Level 2: Görevler
- Level 3: Alt görevler
- Level 4: Daha Alt görevler

3- Yönelme: Bu evre işletmede veya projede yer alan kişilere verilen görevleri en doğru ve verimli şekilde yapmaları için yönlendirme yapılması olarak tanımlanabilir. Yönlendirme, yöneticinin liderlik yaparak çalışanlarına yol göstermesini ifade etmektedir (Altıntop, 2014).

4- Kontrol Etme-Denetleme: Düzeltici bir fonksiyon olan denetimin temel amacı, işletmenin planlarının gerçekleşmesidir. Standartların belirlendiği, gelişimin izlendiği ve örgütü hedeflerine odaklı tutmaya yardım eden, değişimleri içeren süreç kontrol etme (denetim) evresidir (Akyel, 2009). Kontrol aşaması ile proje güncelleştirilir, analiz edilir ve gerekirse projenin kalan aşamaları için alternatif seçenekler belirlenebilir. PUKÖ (planla-uygula-kontrol et-önlem al) döngüsü, adım adım plan yaparak sonuca ulaşmakta kullanılan sistematik bir yaklaşımdır. PUKÖ döngüsü aşağıdaki gibi (Şekil 2.3) görselleştirilmiştir.



Şekil 2.3: PUKO Döngüsü (Hacaloğlu, 2007)

2.1.2.2. Proje Programlama- Planlama ve Kontrol Kavramları

Proje Programlama

Proje programlamada ilk aşama, her bir faaliyet için gerekli süreyi belirlemektir. Proje programı, projenin kritik faaliyetlerini göstererek, faaliyetlerin serbestlik süresi ve gecikme miktarları hakkında fikir vermelidir (Bayraktar, 1995; Kutlu, 2001).

Proje Planlama

Planlama aşamasında, projeyi oluşturan faaliyetler tespit edilir ve ayrı ayrı ele alınır. Daha sonra faaliyetlerin tamamlanma süreleri tahmin edilir, öncüllük ilişkileri belirlenerek şebeke(ağ) diyagramı oluşturulur. Diyagram, faaliyetleri temsil eden oklar veya olayları temsil eden düğüm noktaları kullanılarak kurulur (Bayraktar, 1995). Çizilen şebeke diyagramı projeyi oluşturan faaliyetlerin birbirleri arasındaki ilişkileri ifade eden bir çizelgedir (Karahana ve Ezin, 2014). Proje planının geliştirilmesinde, görev ve sorumlulukların belirlenmesi, proje zaman cetvelinin hazırlanması ve proje bütçesinin çıkarılması en önemli çalışmalar arasındadır (Barutçugil, 1988).

Proje Kontrol

Proje kontrolüyle projenin yürütülmesi sırasında sorun yaratabilecek, kritik veya yarı kritik faaliyetler üzerinde yoğunlaşmak mümkündür (Kutlu, 2001). Şekil 2.4’de

görselleştirilmiş olan kontrol sisteminden yararlanılarak kritik olarak adlandırılan faaliyetler üzerinden kontrol süreci gerçekleştirilmektedir (Akyel, 2009).



Şekil 2.4: Kontrol Sistem Süreci (Hacaloğlu, 2007)

2.1.3. Proje Planlama ve Teknikleri (Klasik Metotlar)

Planlama evresinde oluşturulan proje şebeke diyagramı tüm kısıtları bir sistemde görebilme olanağı sunar. Bu durum proje yöneticilerine kolaylık sağlayarak oluşacak risklerin önceden tahmin edilebilmesini, gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktadır. Proje planlama teknikleri projelerin öncelikle planlanması daha sonra uygulanması ve kontrolünde kullanılabilmektedir. Böylece kaynakların zaman ve maliyet unsurları altında değerlendirilmesine imkân vererek proje kontrolüne yardımcı olmaktadır (Kömürlü ve Toltar, 2018).

2.1.3.1. Şebeke Çizim Teknikleri

Şebeke, projeye ait tüm faaliyetlerin bir birleriyle olan mantıksal ilişkilerini göstermek için oluşturulan görsel bir şemadır (Mazlum, 2014). Faaliyetlerin aralarındaki ilişkiler bu tip şemalarla daha net bir şekilde görülebilmektedir (Karahan ve Ezin, 2014). Kısaca tanımlamak gerekirse, şebeke söz konusu işin tamamlanması için gerekli tüm faaliyetlerin belirlenmesi ve faaliyet ilişkilerinin bir diyagram şeklinde gösterilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Bayraktar, 1995).

Şebeke içerisinde yer alan kavram tanımları şu şekildedir;

Faaliyet kavramı; projenin oluşmasını sağlayan elemanlardır. Belirli bir olayın gerçekleşmesi, faaliyetin ve/veya faaliyetlerin tamamlanmasıyla meydana gelmektedir (Karahan ve Ezin, 2014; Mazlum, 2014).

Olay kavramı; bir veya daha fazla faaliyetin başlamasını veya bitirilmesini gösteren, genellikle ağ şemalarında dairesel olarak gösterilen noktalardır (Mazlum, 2014).

Kukla eylem; kaynak ve zaman gerektirmeyen hayali faaliyetler olarak tanımlanmaktadır. Diyagram çiziminde kesik çizgili oklarla ifade edilirler (Tekin, 2010).

Şebeke(ağ) diyagramı çiziminde yaygın olarak kullanılan iki çizim yöntemi bulunmaktadır (Yang ve Wang, 2010).

- 1- Activity On Arc (AOA):** Faaliyetlerin oklarla tanımlandığı bir ağ diyagramı çizim yöntemidir. AOA yaklaşımıyla çizilen ağ diyagramlarında kukla faaliyetler kullanılabilmektedir.
- 2- Activity On Node (AON):** Faaliyetlerin düğümler üzerinden tanımlandığı bir çizim yöntemidir. AON yaklaşımıyla çizilen ağ diyagramlarında kukla faaliyeti kullanılmamaktadır.

Şebeke çizim tekniklerini uygularken; faaliyetler arasında eksik veya fazla ilişkiler kurulmamalıdır ve öncelik ilişkilerinin doğru olarak sağlandığından emin olunmalıdır (Alpay, 2007). Yanlış çizilmiş bir şebeke diyagramı mantıksal hata oluşturacak ve planlama aşamasında hatalar ortaya çıkaracaktır.

2.1.3.2. Proje Planlama Teknikleri

Proje planlama ve programlama tekniklerinin geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar 1950’li yılları sonlarına rastlamaktadır. Bu konuda geliştirilen temel yöntemler, Gantt cetvelleri, PERT ve CPM’dir (Kutlu, 2001). Literatüre bakıldığında CPM ve PERT teknikleri çok fazla alanda uygulanabilen ve firmalar tarafından tercih edilen tekniklerdendir (Bayraktar, 1995). CPM ve PERT teknikleri yakın tarihlerde ve birbirlerinden bağımsız olarak ortaya çıkmışlardır. Geliştirilen her iki tekniğin temelinde şebeke diyagramları kullanılmakta olup, şebeke diyagramları projenin bütününi oluşturan faaliyetlerin ve bu faaliyetlerin aralarındaki mantıksal bağlantıların grafik şeklinde ifade edilmesine dayanmaktadır (Karahan ve Ezin, 2014;

Mazlum, 2014). Diyagram faaliyetler arasındaki karmaşık ilişkiyi anlaşılması kolay bir mantıkla ve doğrudan gösterir. Ayrıca bu tekniklerle hazırlanan raporlar, dikkatleri proje için önemli olan faaliyetler üzerine yoğunlaştırmaktadır. (Kutlu, 2001).

CPM ile PERT yöntemleri arasındaki en temel fark faaliyet sürelerinin tahmin edilmesi aşamasında ortaya çıkmaktadır (Kömürlü ve Toltar, 2018). CPM yönteminde kullanılan zaman değerleri belirlilik içerirken, PERT yönteminde zaman olasılıklıdır (Bayraktar, 1995; Tekin, 2010). Faaliyet sürelerinin kesin olarak bilinmediği projelerde PERT tercih edilir ki bu yüzden PERT tekniği, uygulamasına çok nadir rastlanan veya ilk defa gerçekleştirilecek olan projelerde kullanılmaktadır. CPM tekniği ise daha önce tecrübe edilmiş projelerde tercih edilmektedir. Her iki teknikte popüler yaklaşımlardan olup, işletmelerin yatırım projelerinin; planlama, programlama ve kontrolünde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır (Karahan ve Ezin, 2014).

Temelde her iki teknik için geçerli olan amaç; eldeki kaynaklar çerçevesinde projenin en kısa zamanda bitirilmesidir (Karahan ve Ezin, 2014; Mazlum, 2014). Proje kritik yörüngesi üzerinde bulunan faaliyetlerin başlangıç veya bitiş sürelerindeki gecikmeler projenin tamamlanma süresine etki etmekte ve projenin tamamlanmasını geciktirmektedir. Kritik yörünge dışında kalan diğer tüm faaliyetler bolluklara sahiptir ve bu faaliyetler projenin bitimini dolaylı olarak etkilemektedir (Alpay, 2007). Bu noktadan yola çıkılarak kritik faaliyetler; kritik yol üzerinde bulunan ve oluşacak herhangi bir gecikme durumunda projeye ek bir zaman ve maliyet yükleyen faaliyetler olarak tanımlanabilir (Winston, 2004). Projenin kritik yolu ise projenin tamamlanması için gerekli olan faaliyetler arasında toplamda en fazla süreye sahip faaliyetler diziliminden oluşan yoldur (Tekin, 2010).

Proje planlama konusunda çok sayıda teknik olmasına karşın Bölüm 3'te ver verilmiş olan vaka çalışmasında klasik ve bulanık kritik yol yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmada planlama teknikleri anlatılırken bu tekniklerden yaygın olarak kullanılan Gant Şeması, CPM (Critical Path Method) ve PERT (Project Evaluation and Review Technique) tekniklerine ilişkin kavramsal bilgilere yer verilmiştir.

2.1.3.2.1. Gant Şeması (Çubuk Diyagramları)

1900'lü yılların başlarında hayata geçirilen çubuk diyagramların kullanımı Henry Gantt tarafından başlatılmıştır (Naylor, 1995). Çubuk diyagramlar, CPM ve PERT tekniklerinin geliştirilmesinde temel bir yaklaşım sunmuş ve temelde aynı amaç için geliştirilmiş tekniklerdir (Mazlum, 2014). Gantt Şeması, aktivitelerin öncelik ilişkilerine göre listelenmesini ve aktive sürelerinin sıralanmasını amaçlamaktadır. Gant grafikleri incelendiğinde x eksenin görevleri, y eksenin ise aktivite sürelerini gösterdiği görülmektedir. Y eksenini üzerindeki çubuk uzunlukları aktivite sürelerini temsil etmektedir. Aktivitelere ait başlangıç tarihleri kullanılarak kronolojik bir sıralama yapılmaktadır (Konakcı, 2006; Naylor, 1995).

Gant diyagramı, kullanım kolaylığı sağlaması ve basit bir mantık üzerine kurulu olması, proje takibi sürecinde tercih edilen bir yaklaşım olmasını sağlamaktadır (Konakcı, 2006). Yöntem ile faaliyetlerin ilerleme durumunun takibi yapılabilir de performans ve kaynak takibi yapılmasında olanaklar kısıtlıdır. Bu durum kapsamlı projeler yerine daha küçük projelerde tercih edilmesine sebep olmaktadır.

2.1.3.2.2. CPM (Kritik Yol Metodu)

CPM (Critical Path Method), projeye ait kritik yolun tespit edilmesi ve proje tamamlanma süresi tespit edilerek istenilen zamanda ürünün oluşmasını sağlamayı amaçlayan bir yaklaşımdır. Metodun uygulanmasına ilk olarak projeye ait faaliyetlerin belirlenmesiyle başlanır. Faaliyetlerin eksiksiz ve doğru belirlenmesi projenin diğer aşamaları için önemlidir. Eksik veya fazla belirlenen faaliyetler planlama aşamasında yanlışlığa sebep olabilir. Faaliyetleri belirlenmiş olan proje için proje planlamasına faaliyetlere süreler atanarak devam edilir. Faaliyet süreleri tanımlanırken gerçekçi bir yaklaşım benimsenmelidir. Atanan süreler öngörülebilir (hava ve saha koşulları, kaynak ve ekipman yeterliliği, paralel faaliyetler vb.) riskleri barındırmalıdır (Alpay, 2007). Riskler düşünülmeden yapılmış bir planlama, proje kapsamı içerisinde süre-maliyet ve kalite bağlamında olumsuz sonuçlar alınmasına sebep olacaktır. Süre tahminleri yapılmasının ardından faaliyetler arasındaki mantıksal ilişkiler tanımlanmalıdır (Karahana ve Ezin, 2014). Faaliyetler arası öncül-ardıl ilişkiler, eş zamanlı faaliyetler belirlenmelidir. Burada öncüllük, bir aktivite bitmeden diğer aktivitenin başlamayacağını gösterir. Ardıllık ise bir aktivitenin kendinden sonra başlayacak olan aktivitesini göstermektedir. Eş zamanlı faaliyetler tanımı ile ise

herhangi bir öncüle bağlı olmakla birlikte aynı anda yapılabilen faaliyetler anlatılmaktadır (Konakcı, 2006). Faaliyetlerin belirlenmesi, sürelerin atanması ve aktiveler arası mantıksal bağlantıların kurulması CPM yaklaşımının en önemli adımlarındandır. Özellikle proje faaliyetlerinin belirlenmesinde ve faaliyet arasında kurulan mantıksal ilişkilerde yapılacak hatalar, oluşturulan sistemde tüm durumların değişmesine sebep olabilmektedir (Kömürlü ve Toltar, 2018). Mantıksal ilişkiler kurulduktan sonra, projeye ait şebeke diyagramı oluşturularak kritik veya en uzun yörünge hesaplanmalıdır (Karahan ve Ezin, 2014). Kritik faaliyetler olarak adlandırdığımız faaliyetler aslında bize projenin en uzun bitiş süresini veren faaliyetlerdir (Konakcı, 2006; Alpay, 2007). Ardı ardına bir birini takip eden bu faaliyetlerin bir tanesinde dahi bir gecikme yaşanması proje bitiş süresini uzatıcı etki oluşturacaktır (Alpay, 2007; Winston, 2004). Kritik olmayan faaliyetler ise kritiklik tanımı dışında kalan faaliyetlerdir. Bu faaliyetlerin bolluk süreleri yani gecikmeleri tolere edebilecekleri zamanları vardır ve aktivitenin sahip olduğu bolluk miktarını geçmediği sürece proje bitiş süresine etki etmezler (Karahan ve Ezin, 2014; Mazlum, 2014).

2.1.3.2.3. PERT (Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği)

PERT, İngilizce olarak 'Project Evaluation and Review Technique' olarak adlandırılmaktadır. Türkçe karşılığı ise 'Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği' anlamına gelmektedir (Kutlu, 2001). PERT yönteminin tarihsel gelişimine bakıldığında, Gantt cetvellerinin PERT'in temelini oluşturduğu görülmektedir. Fakat Gantt diyagramı, yapılacak işin faaliyetleri arasındaki ilişkiyi en basit şekilde göstermektedir (Kutlu, 2001). Bu nedenle PERT'e Gantt cetvelinin geliştirilmiş bir versiyonu da denilebilir. PERT yaklaşımıyla yapılacak olan planlamalarda izlenen adımların CPM yaklaşımıyla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Faaliyetlerin belirlenmesi, öncüllük ilişkilerinin kurulması aşamaları iki yaklaşım içinde ortaklık. Fakat faaliyet sürelerinin atanması aşamasında PERT tekniğinde her faaliyet için üç zaman tanımlanmasını gerektirir (Bayraktar, 1995). Bu süreler; iyimser tahmin (a), kötümser tahmin (b) ve muhtemel tahmin (m) süreleridir (Konakcı, 2006; Karahan ve Ezin, 2014). 3'lü süre tahminleri tamamlandıktan sonra şebeke diyagramı çizilir (Kutlu, 2001).

Önceki kısımda bahsedilmiş olduğu gibi PERT tekniği olasılıklı bir yaklaşım önermektedir (Bayraktar, 1995). Önerilen bu olasılık yaklaşımıyla proje içerisinde risklerle başa çıkılmaya çalışılır. PERT yönteminde her faaliyetin ortalaması, varyansı ve tüm projenin olasılık dağılımı hesaplanır. Bu konuda elde edilen bilgiler, projenin fizibilitesini değerlendirmede kullanılan yönetim planlama bilgisini sağlar. Bu teknikte faaliyetlere ait beklenen, tahmini süreler aşağıdaki formül (2.1) uygulanarak hesaplanır. Beklenen süreler μ simgesi ile temsil edilmiştir. Faaliyetlere ait varyanslar σ işaretiyle temsil edilerek formül (2.2) ile standart sapmalar ise formül (2.3) ile hesaplanır.

$$\mu = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \left(\frac{b - a}{6} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$ss = \sqrt{\sigma} \quad (2.3)$$

Tüm hesaplamalar yapıldıktan sonra proje şebeke diyagramından en uzun yol belirlenir ve bu yol projenin kritik yolu veya yörüngesi olur (Konakcı, 2006). Kritik yörünge üzerindeki faaliyetlere ait, faaliyet süreleri (μ) toplanarak proje tamamlanma süresi ile proje varyansı ve standart sapması (σ , ss) hesaplanır.

Olay Zamanlarının Hesaplaması

CPM ve PERT tekniğiyle yapılan hesaplamalarda ihtiyaç duyulan diğer bir durumda faaliyetlerin olay zamanlarıdır. Olay zamanlarından kasıt faaliyetlerin erken başlama, erken bitiş, geç başlama, geç bitiş ve bolluk süreleridir. Bu süreleri hesaplarken diyagram üzerinden soldan sağa ileri gidiş hesaplamaları ve sağdan sola geri gidiş hesaplamaları yapılması gerekmektedir. Olay zamanları tanımları aşağıda verilmiştir (Mazlum, 2014).

ES: Earliest Start Time - Erken Başlangıç Süresi

EF: Earliest Finish Time - Erken Bitiş Süresi

LS: Lastest Start Time – En Geç Başlangıç Süresi

LF: Lastest Finish Time – En Geç Bitiş Süresi

TF: Total Float - Toplam bolluk

En Erken Başlama Zamanı (Earliest Start Time-ES): Projede yer alan bir faaliyetin başlayabileceği en erken zamanı gösterir. En erken başlama zamanları, kendisinden sonra gelen faaliyetlerin en erken başlama zamanlarından küçük veya bu zamanlara eşit olmak zorundadır.

En Erken Tamamlanma Zamanı (Earliest Finish Time-EF): Bir faaliyetin tamamlanabileceği en erken süreyi ifade etmektedir (Bayraktar, 1995).

En Geç Başlama Zamanı (Latest Start Time-LS): Projede yer alan bir faaliyetin, en geç başlama zamanını ifade eder (Karahan ve Ezin, 2014).

En Geç Tamamlanma Zamanı (Latest Finish Time-LF): Projede yer alan bir faaliyetin en geç bitiş zamanını gösterir (Bayraktar, 1995). En geç tamamlanma zamanı, diğer faaliyetlerin tamamlanmasına engel olmayacak şekilde bir faaliyetin en geç tamamlanabileceği süredir.

i olayında j olayına giden t_{ij} süreli bir diyagram üzerinden hesaplamaları yapacak olursak olay zamanları hesaplama formülleri aşağıda belirtildiği gibi ifade edilebilir.

İleri Gidiş Hesaplamaları:

İleri gidiş hesaplamaları projenin başlangıç olayından başlar, son olaya doğru devam eder (Alpay, 2007). Her bir aktivite için erken başlangıç ve erken bitiş zamanları, “ileri geçiş” olarak bilinen süreç yoluyla belirlenebilir (Konakcı, 2006). Diyagramda başlangıç faaliyetine ait $ES=LS$ süreleri genellikle 0 kabul edilerek hesaplamalara başlanır (Alpay, 2007). Şebekenin başından sonuna doğru (forward pass) yani şebekenin solundan sağına doğru gerçekleştirilmelidir (Mazlum, 2014). Daha sonra ileri gidiş hesaplamalarıyla (2.4) ve (2.5) numaralı formüller kullanılarak bütün faaliyetlere ait ES ve EF süreleri hesaplanır.

$$ES_j = \max (ES_i + t_{ij}) \quad (2.4)$$

$$EF_j = ES_j + t_{ij} \quad (2.5)$$

(2.4) formüldeki maksimum seçim durumu j faaliyetinden önce gelen birden çok i faaliyetinin olması durumunda maksimum ES süresinin seçimiyle sağlanabilmektedir. İleri gidiş işlemleri tamamlanmadan geri gidiş işlemlerine başlanamaz (Alpay, 2007).

Geri Gidiş Hesapları:

Faaliyetlere ait ES ve EF süre hesaplamaları tamamlandıktan sonra diyagramın bitiş faaliyetinden başlanarak geri gidiş hesaplamaları yapılmaya başlanır. Geri geçiş hesaplamalarıyla, planlanmış bitiş süresini geciktirmeyecek şekilde proje faaliyetlerinin başlayıp bitebileceği en geç zamanlar hesaplanır (Konakcı, 2006). Hesaplamalar son olaydan, ilk olaya doğru ilerlemektedir (Alpay, 2007). Şebekenin sonundan başına doğru (backward pass) yani şebekenin sağından soluna doğru gerçekleştirilmektedir (Mazlum, 2014). Burada bitiş faaliyeti için $EF=LF$ kabulü yapılarak, (2.6) numaralı formül kullanılır ve her faaliyet için LS ve LF süreleri hesaplanır.

$$LS_i = \min (LF_j - t_{ij}) \quad (2.6)$$

Formülde belirtilen minimum süre seçimi t_i faaliyetinin kendinden sonra gelen birden çok t_j faaliyeti olması durumunda minimum LF süresinin seçimiyle sağlanabilmektedir.

Bollukların Hesaplanması:

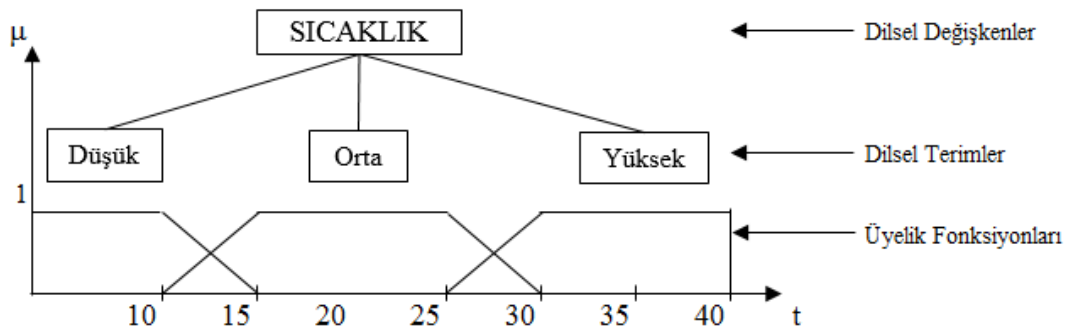
Başlangıç ve bitiş süreleri arasında, LS-ES ve LF-EF fark süreleri bolluk miktarlarını verecektir (Winston, 2004). Belirtilen süreler arasındaki farkın sıfır olduğu faaliyetler kritik yörünge üzerinde bulunan faaliyetlerdir ve kendi erken başlangıç ve erken bitiş zamanlarında başlayıp bitmeleri gerekir. Bu nedenle bu tip aktivitelere “kritik” aktivite adı verilmektedir (Konakcı, 2006). Kritik yörünge dışında kalan faaliyetler için bu süreler faaliyetlerin başlangıç veya bitişinin ne kadarlık bir süre geciktirilebileceğini göstermektedir (Alpay, 2007). Bu gecikebilirlik durumu bolluk kavramını

tanımlamaktadır. Bolluk sürelerinin bilinmesi proje planlamasında herhangi bir faaliyetin gecikmesi durumunda proje tamamlanma süresinin etkilenmemesi için üzerinde durulması gereken önemli bir bilgidir (Bayraktar, 1995). Yapılan iş programı kontrolü ile gecikmelerden etkilenmemeye çalışılarak iş programında bolluk süreleri dikkate alınarak yeni çözümler ve düzeltmeler yapılabilmektedir.

2.2. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, klasik küme kuramı yerine bulanık küme kuramına dayanan bir matematiksel yaklaşımdır (Karasakal, 2012). Bulanık mantık yaklaşımı en basit anlamda; günlük hayatta kullanılan dilsel değişkenlerin ve dilsel niteleyicilerin matematiksel olarak modellenmesi şeklinde ifade edilebilir (Karasakal, 2012; Mazlum, 2014). Günlük hayatta kullanılan çok sıcak, sıcak, ılık, az sıcak gibi öznel yargıların, matematiksel olarak temsil edilmesini içermektedir. Bu söylem şöyle örneklendirebilir; hava sıcaklığının değerlendirildiğini ve 0-5 C° arası soğuk, 5-15 C° arasının sıcak olarak tanımladığı varsayalım. Burada kişinin öznel yargısına göre değişken durumlar oluşmaktadır. Şöyle ki 0-5 C° ve 5-15 C° arası sıcaklıklar tanımlanan aralığa göre belirli derecelerde yargıları karşılamaktadır. 0 C° soğuk tanımını %100 olarak karşılarken, 3 C° %60 oranında karşılayabilmektedir. Aynı şekilde 15 C° sıcaklık tanımına %100 oranında karşılarken 5 C° %0 oranında karşılamaktadır. Örnekten yola çıkılarak 10 C° kişi değerlendirmesinde bir yandan ılık olarak tanımlanırken bir yandan az sıcak olarak tanımlanabilmektedir.

Benzer bir örnekleme çalışması aşağıdaki gibi grafiksel olarak (Şekil 2.5) gösterilir.



Şekil 2.5: "Sıcaklık" dilsel değişkeni ve dilsel terimleri (Karasakal, 2012)

Bu durum tanımlanan aralıkların, yargıyı hangi oranda karşıladığıyla ilgili olmaktadır. Yani verinin ne kadar o yargı kümesine ait, ne kadar ait olmadığı bilgisine dayanarak o veriye yeni bir tanım getirir (Mazlum, 2014).

Bulanık mantık yaklaşımının tarihsel gelişim sürecine bakıldığında aslında ilk adımların ‘mantık’ kavramının incelenmesiyle atıldığı görülmektedir. Bulanık mantık yaklaşımı günümüzde bilinen tanımıyla 1900’lü yıllardan sonra ortaya çıkmaya başlamıştır. Literatüre bakıldığında, özellikle batı dünyası tarafından başlangıçta “ihtimal” kavramına benzetilerek şüpheyile yaklaşmış olsa da (Keskenler ve Keskenler, 2017) L.R Zadeh tarafından 1965 yılında yayınlanmış bir makale çalışması yaklaşıma öncüllük etmiş ve Zadeh (1965) bu çalışmasıyla yaklaşımın ilk kurucusu olarak görülmüştür (Karasakal, 2012; Zadeh, 1965). 1970’li yıllardan sonra ise Japonya’da önemli teknolojik gelişmelerde yaklaşımın kullanılmış olması batı ve doğu dünyasının dikkatini çekerek yaklaşımın önemini arttırmıştır (Keskenler ve Keskenler, 2017). 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından ilk defa bir buhar makinesinin kontrol sistemi bulanık mantık sistemi kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışma bulanık sistemlerle çalışmanın aslında kolay ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar dünyada birçok araştırma merkezinin ilgisini bulanık sistemlere yöneltmiştir (Mazlum, 2014).

Bulanık mantık konusunda yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, bulaşık makinesi, çamaşır kurutma makinesi ve çimento harç makineleri kontrol örnekleri karşımıza çıkan en popüler örneklerden olmakta ve yaklaşımın anlaşılmasında fayda sağlamaktadır (Cicioğlu, vd., 2018; Tiryaki ve Kazan, 2007). İncelenen örnekler; bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak geliştiren modellerin; dilsel ifadelerin ve belirsizliklerin, matematiksel ifadelerle tanımlanabilmesine, makinelere insanların deneyimlerinden ve önsözlerinden yararlanarak çalışabilme imkânı verdiğini göstermektedir (Mazlum, 2014).

Zadeh (1965) çalışmalarında bulanık mantık ilkeleri ve bulanık mantık yapısı üzerinde durarak yaklaşıma yönelik ilkeler geliştirmiştir. Zadeh (1965) tarafından geliştirilen ilkeler şöyle ifade edilmektedir (Zadeh, 1965; Keskenler ve Keskenler, 2017).

Zadeh (1965)'in bulanık mantık ilkeleri;

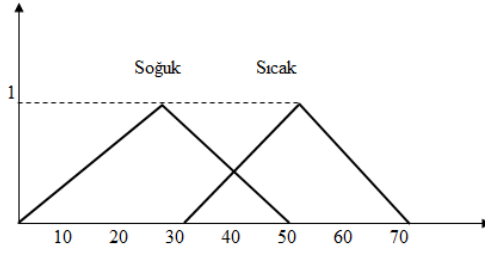
- Bulanık mantık da kesin değerler yerine yaklaşık değerler kullanılır.
- Bulanık mantık için bilgi çok az, az, küçük, büyük şeklinde dilsel ifadeler ile tanımlanır.
- Bulanık mantıkta tüm değerler $[0-1]$ aralığında bir üyelik derecesi ile gösterilir.
- Her mantıksal ifade bulanık ifadeye dönüştürülebilir.
- Matematiksel modeli çok karmaşık ve zor olan sistemler için bulanık mantık uygun bir yöntemdir (Zadeh, 1965).

Bulanık mantık yaklaşımının anlaşılabilmesinde bulanık küme teorisi, bulanık sayılar, üyelik fonksiyonları gibi kavramların biliniyor olması önem taşımaktadır. Bu sebeple ilk olarak bu kavramlar üzerinde durulacak daha sonra bulanık CPM (FCPM) yaklaşımı ve önerilen metotlar açıklanarak, örnek vaka çözümlemesi yapılarak önerilen metotların uygulanabilirliği test edilecektir.

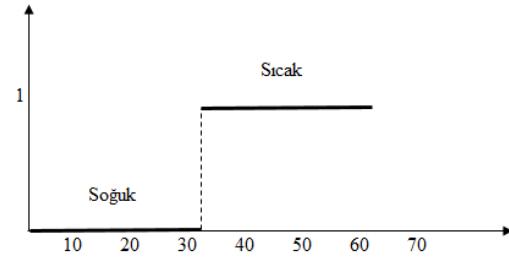
2.2.1. Bulanık Kümeler ve Bulanık Sayılar

Bulanık küme teorisi, farklı birçok bilimsel alanda yeni bir yaklaşım sunmuştur. 20 yıldan daha uzun bir zaman önce ortaya çıkarılmış ve o zamandan günümüze kadar karar verme, matematiksel programlama ve regresyon analizi gibi birçok tekniğe uyarlanarak geniş bir çalışma ortamı bulmuştur (Durucasu vd., 2015).

Klasik mantık olarak bildiğimiz Aristo mantığı, matematiksel yaklaşımda durumların 0 ve 1 değerlerinden biriyle temsilini içermektedir (Tuş, 2006; Tiryaki ve Kazan, 2007; Ökmen ve Öztaş, 2014). Klasik küme teorisini savunan bu yaklaşımın aksine bulanık mantık yaklaşımı L.A. Zadeh (1965) tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisine dayanmaktadır (Altaş, 1999a). Bulanık küme teorisi kesin bilginin olmadığı ve özneliliğin bulunduğu durumların modellenerek çözümlenmesini hedefleyen bir yöntemdir (Atlı ve Kahraman, 2013). Zadeh (1965) bulanık kümeleri şöyle tanımlamıştır; “Bulanık küme, üyelik derecelerinin sürekliliği olan bir nesne sınıfıdır. Böyle bir küme, her bir nesneye sıfır ile bir arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik (karakteristik) işlevi ile karakterize edilir” (Zadeh, 1965). Klasik ve bulanık mantık model grafik gösterimleri Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.6: Bulanık Mantık Modeli
(Mazlum, 2014)



Şekil 2.7: Klasik Mantık Modeli
(Mazlum, 2014)

İki yaklaşım arasındaki en temel fark; klasik kümeler, kesin sınırlara sahip olmasından dolayı net ortamları temsil ederken bulanık kümeler, ara değerlerle çalışarak belirsiz ortamlara da uygulanabilir olmasıdır (Mazlum, 2014). Zadeh (1965), bu noktada ikili üyelik fonksiyonuyla ifade edilen klasik kümeler yerine dereceli üyelik fonksiyonuyla ifade edilen bulanık kümelerin tanımlamasını öne sürmüştür (Zadeh, 1965). Kesin kümeler karakteristik fonksiyonlar ile tanımlanırken, bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanır (Karasakal, 2012). Yaklaşımlar arasındaki fark Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de daha net görülebilmektedir.

Hava sıcaklık örneği tekrar değerlendirilecek olursa, aynı şekilde geçerliliğini koruyan sıcaklık varsayımından yola çıkılarak; 0 C° soğuk tanımını %100 olarak karşılaması tanımlanan bulanık küme içerisindeki aitlik yani üyelik derecesinin 1, 3 C°’nin %60 oranında karşılıyor olması üyelik derecesinin 0,60 ile temsil edilmesi şeklinde ifade edilebilir. Aynı şekilde 15 C° sıcaklık tanımına %100 oranında karşılaması bulanık kümeye üyeliğinin 1, 5 C°’nin %0 oranında karşılaması ise üyelik derecesinin 0 olması şeklinde ifade edilebilir. Burada 0 seviyesindeki üyelik derecesi, elemanın bulanık kümeye ait olmadığını ifade ederek, “üye değildir” şeklinde yorumlanmaktadır. Örnek üzerinde verilmiş olan üyelik dereceleri tahmini olarak verilmiş değerler olup örnek bağlamında konuya açıklık getirmek amacıyla kullanılmıştır. Sonuç olarak bulanık küme, kümeye aitlik derecesi yani üyelik değeri ile tanımlanmış olan elemanlardan oluşan kümeyi ifade eder.

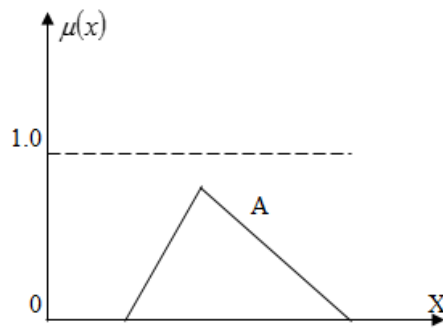
Bir bulanık sayı, bulanık kümeler arasında ve gerçek sayıların bulunduğu yer içerisinde tanımlıdır (Mazlum, 2014). Bulanık sayılar X söylem evreninde hem konveks hem normal olan şu koşulları sağlayan bulanık bir alt kümedir.

- $\mu_{\bar{A}}(X)$ aralıklı süreklidir
- $\mu_{\bar{A}}(X)$ konveks(dışbükey)tir
- $\mu_{\bar{A}}(X)$ bulanık bir alt kümenin normalliğidir ve en az bir eleman için üyelik fonksiyonunun 1'e eşit ($\mu_{\bar{A}}(x) = 1$) olması gerekmektedir.

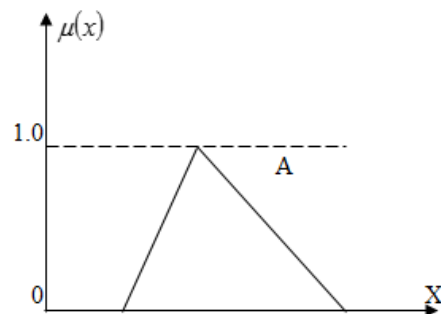
$\mu_{\bar{A}}(x) = 1$ durumu x 'in gerçel sayı olması koşuluyla sağlanabilir (Chen ve Hsueh, 2008; Durucasu vd., 2015).

X söylem evreninde tanımlanan $\bar{A}$ bulanık kümesi 0 ve 1 kapalı aralığındaki üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanırlar. $\bar{A}$ bulanık kümesine ait $x \in X$ bulanık sayısının üyelik fonksiyonu $\mu_{\bar{A}} : x \rightarrow [0,1]$ olarak tanımlanırken, bulanık $\bar{A}$ kümesi tanımı ise, $\bar{A} = \{x, \mu_{\bar{A}}(x) | x \in X\}$ şeklindedir (Ökmen ve Öztaş, 2014).

Normal bulanık küme, üyelik değeri 1'e eşit olan en az bir elemana sahip olan kümelerdir (Tuş, 2006). 1'e eşit elemana sahip olmayan bulanık kümeler ise supnormal kümeler olarak tanımlanmaktadır. $\bar{A}$ bulanık kümesinin yüksekliği, üyelik fonksiyonunun maksimum değerine eşittir. Eğer maksimum üyelik fonksiyonu değeri 1 den küçük bir değere sahipse küme supnormal küme olacaktır. Küme tanımları aşağıdaki gibi grafiksel olarak (Şekil 2.8) ve (Şekil 2.9) ile gösterilir (Mazlum, 2014).



Şekil 2.8: Supnormal Bulanık Küme
(Mazlum, 2014)

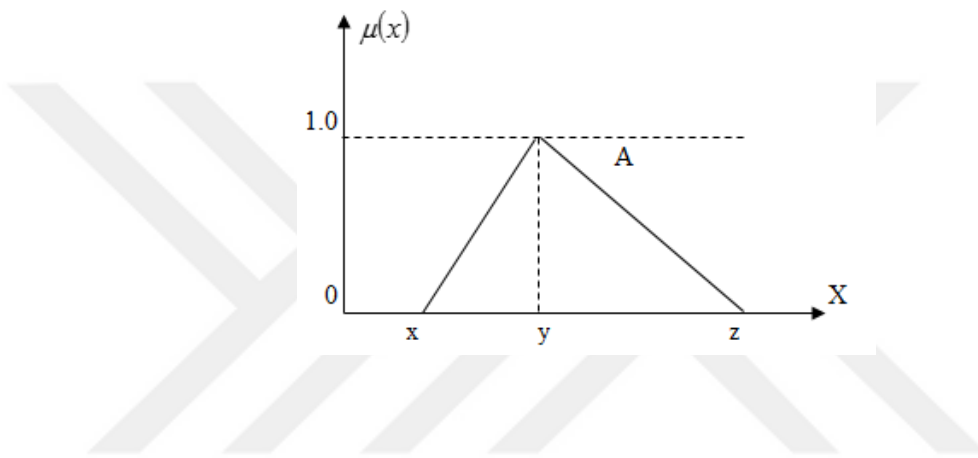


Şekil 2.9: Normal Bulanık Küme
(Mazlum, 2014)

Bir bulanık kümenin üyelik fonksiyon değeri ($\mu(x)$) monoton bir şekilde artış veya azalış gösteriyorsa ya da monoton olarak önce artış gösterip, kırılım noktasından itibaren monoton şekilde azalış gösteriyorsa bu kümeler konveks bulanık kümeler olarak ifade edilebilirler. Öyle ki herhangi bir $\bar{A}$ bulanık kümesi $\bar{A} = (a, m, b)$ ve $a < m < b$ şeklinde tanımlansın, küme elemanlarına ait üyelik dereceleri arasındaki ilişki;

$$\mu_{\bar{A}}(m) \geq \min [\mu_{\bar{A}}(a), \mu_{\bar{A}}(b)] \quad \text{olması durumu konvekslik özelliğini temsil edecektir.}$$

Konveks normal bulanık küme grafiksel gösterimi Şekil 2.10 ile gösterilir (Mazlum, 2014).



Şekil 2.10: Konveks Normal Bulanık Küme (Mazlum, 2014)

Bulanık kümelerde bahsedilmiş olan konvekslik özelliği önemli bir unsurdur. Kümenin $\alpha \in [0,1]$ için her bir α -kesim değer aralıklarında da aynı şekilde konvekslik özelliğini sağlaması gerekmektedir. Her bir kesim aralığının konveks olması bulanık kümenin de konveks olacağı anlamına gelmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta bulanık kümenin konveks olması durumunun üyelik fonksiyonlarının da aynı şekilde konveks olması anlamına gelmediğidir. Alfa (α) kesitleri birer keskin kümedir ve keskin kümelerde konvekslik tanımı şu şekilde tanımlanmaktadır;

“ R^n ’de tanımlı bir kümenin herhangi iki elamanını birleştiren doğru parçasının her bir noktası kümenin içinde kalıyorsa bu kümeye konveks denir.” (Tektaş ve Tektaş, 2020).

$x_1, x_2 \in R$; $\lambda \in [0,1]$ olmak üzere R ’de tanımlı bir bulanık $\bar{A}$ kümesinin konveks olması için gerek ve yeter koşul:

$$\bar{A}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min [\bar{A}(x_1), \bar{A}(x_2)] \quad \text{eşitsizliği ile tanımlanmaktadır.}$$

Sonuç olarak bakıldığında bulanık küme teorisinin belirsizlikler nedeniyle tanımlanması zor olan sistemlerin modellenmesi kolaylaştıran etkili bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Yaklaşım bu tür problemlerin çözümünde en uygun çözümün bulunmasında yol gösterici olacak bir tekniktir. Teknik, probleme uygun olarak tanımlanabilecek çeşitli bulanık sayı tiplerini içermektedir. L-R tipi, L-L tipi, Üçgen ve Yamuk bulanık sayılar bunlara örnek verilebilir. Çalışmada üçgen ve yamuk bulanık sayı kavramları açıklanacak ve üçgen bulanık sayılar kullanılarak örnek vaka çözümlemesi yapılacaktır.

2.2.1.1. Üçgen Bulanık Sayılar

Üçgen bulanık sayılar, $\bar{A} = (a, m, b)$ şeklinde tanımlanmış bir bulanık kümede, m merkez olmak üzere sağ ve sol açıklıkların a ve b değerleriyle temsil edildiği ve üyelik fonksiyonlarının aşağıdaki gibi tanımlandığı kümeler üçgen bulanık sayılar denilmektedir (Tektaş ve Tektaş, 2020).

Üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi (2.7) formüle edilir (Elizabeth ve Sujatha, 2013a).

$$\mu_{\bar{A}}(x; a, m, b) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a} & , \quad x \in [a, m) \\ 1 & , \quad x = m \\ \frac{b-x}{b-m} & , \quad x \in (m, b] \\ 0 & , \quad x \notin [a, b] \end{cases} \quad (2.7)$$

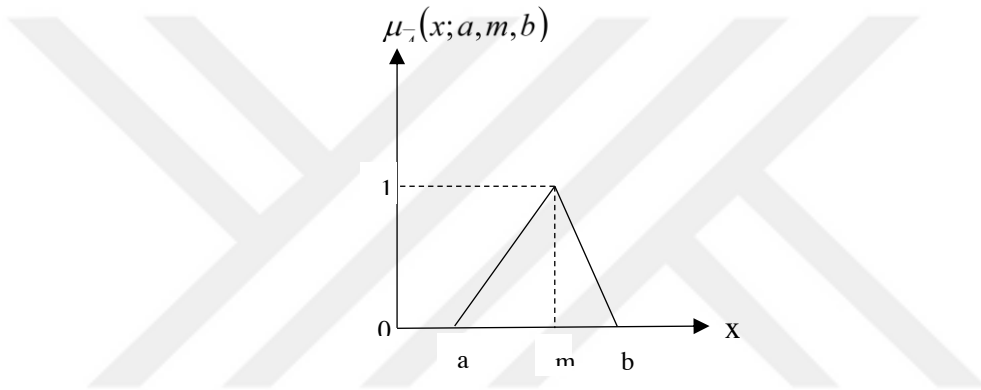
2.2.1.1. Yamuk Bulanık Sayılar

Yamuk bulanık sayılar, $\bar{A} = (a, b, m, n)$ şeklinde tanımlanmış bir bulanık kümede, tolerans aralığı $[a, b]$ olan, sağ ve sol açıklıkların m ve n değerleriyle temsil edildiği ve üyelik fonksiyonlarının aşağıdaki gibi tanımlandığı kümeler yamuk bulanık sayılar denilmektedir. (Tektaş ve Tektaş, 2020)

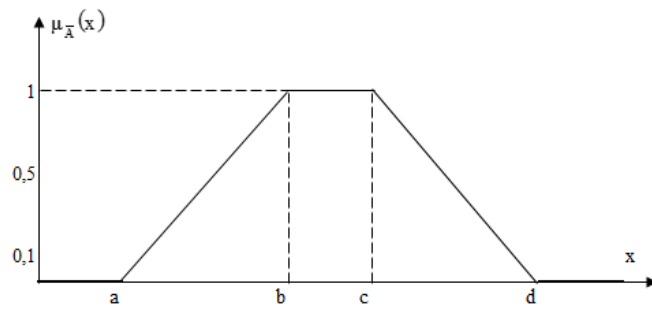
Yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonu formül 2.8 ile formüle edilir (Kurij vd., 2014).

$$\mu_{\bar{A}}(x; a, b, m, n) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & , x \in [a, b] \\ 1 & , x = [b, m] \\ \frac{n-x}{n-m} & , x \in [m, n] \\ 0 & , other \end{cases} \quad (2.8)$$

Üçgen ve yamuk bulanık sayılara ait üyelik fonksiyonları grafiksel olarak Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’ de gösterildiği gibidir (Elizabeth ve Sujatha, 2013a; Kurij vd., 2014).



Şekil 2.11: Üçgen Bulanık Küme Üyelik Fonksiyon Grafiği (Elizabeth ve Sujatha, 2013b)



Şekil 2.12: Yamuk Bulanık Sayılar Grafik Gösterim (Kurij vd., 2014)

Bulanık kümelerin kullanılabilirliği problemin çözüme yönelik üyelik fonksiyonu oluşturabilme becerisine dayanmaktadır. Bulanık küme teorisinin ortaya çıktığı ilk dönemlerde bu beceri zayıf olsa da günümüze kadar yapılan çalışmalarla ve geliştirilen yönlerle üst seviyelere taşınarak birçok alanda kullanılabilir olmuştur. Pratikte, kolay uygulanabilir olmasından dolayı üçgen ve yamuk bulanık sayılar daha sıklıkla tercih edilmektedir (Tektaş ve Tektaş, 2020).

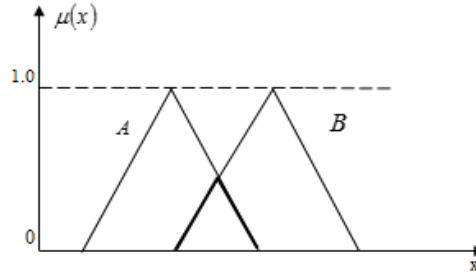
2.2.1.2. Bulanık Küme Özellikleri ve Bulanık Sayılarla İşlemler

Zadeh (1965) bulanık küme teorisi ilke ve yöntemlerini geliştirirken, klasik küme özellikleri olarak bildiğimiz kesişme, birleşme, tümleyen vb. özellikleri bulanık kümelerle genişletmiş ve bu kavramların bulanık kümeler bağlamında çeşitli özelliklerini belirlemiştir (Zadeh, 1965). Bulanık küme işlemlerinin klasik kümelerden farkı ise üyelik fonksiyonlarının bulanık küme özellikleriyle işleme sokulmasıdır (Mazlum, 2014). Şöyle ki;

X evreninde A ve B iki bulanık küme olsun. A ve B bulanık kümelerine ait özellikler kullanılarak oluşturulacak yeni küme de C bulanık kümesi olsun. Bulanık sayılarla işleme alınan bulanık kümelerin sonuçları da aynı şekilde bulanık olacaktır (Chen, 2006).

Bulanık küme teorisi daha öncede bahsedilmiş olduğu gibi dilsel ifadelerin matematiksel olarak tanımlanmasını içermektedir. Zadeh (1965) genişleme prensibi ile klasik küme özellikleri bulanık kümelerle genişletmiş ve bulanık küme özellikleri aşağıda belirtildiği gibi tanımlanmıştır.

1. Bulanık Kümelerin Kesişimi: Bulanık kümelerde kesişim işlemi “ve” operatörü ile ifade edilir ve bu dilsel bağlam matematiksel olarak “min” ifadesiyle karşılır. Minimum operatörü ayrıca “ $\wedge$ ” sembolü ile gösterilir. İki bulanık kümeye ait kesişim kümesinin grafiksel gösterimi (Şekil 2.13) aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.13: Bulanık Kümelerin Kesişme Özelliği (Tuş, 2006)

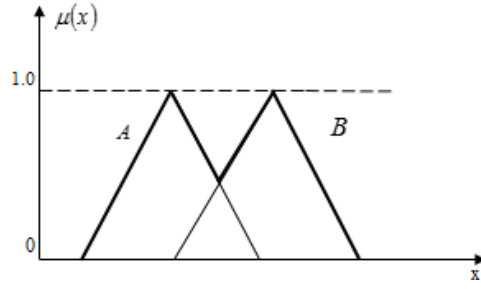
X evreninde tanımlı A ve B bulanık kümeleri, $C = A \cap B$ olduğunda her $x \in X$ için; Üyelik fonksiyonu tanımı $\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$, küme tanımı $(A \cap B)(x) = \min[A(x), B(x)] = A(x) \wedge B(x)$ şeklinde ifade edilecektir (Mazlum, 2014; Tektaş ve Tektaş, 2020).

Dilsel bağlamda ise C(x) kümesi “if A(x) and B(x) then C(x)” şeklinde tanımlanan bir kural tabanı olduğu düşünülürse bu ifade $\min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_C(x)$ ifadesine karşılık gelmektedir. Burada kullanılan “AND” yani “VE” bağlacı kesişim işlemi ifade etmektedir (Altaş, 1999a).

2. Bulanık Kümelerin Birleşimi: Bulanık kümelerde birleşme işlemi “veya” operatörü ile ifade edilir ve bu dilsel bağlam matematiksel olarak “max” ifadesiyle karşılanır. Maksimum operatörü ayrıca “ $\vee$ ” sembolü ile gösterilir. İki bulanık kümeye ait birleşim kümesinin grafiksel gösterimi (Şekil 2.14) aşağıdaki gibidir.

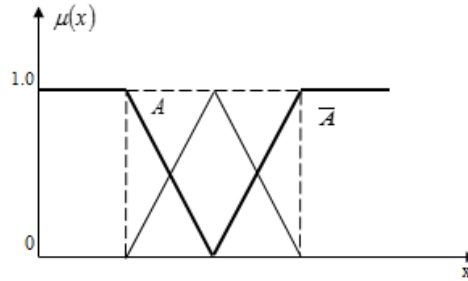
X evreninde tanımlı A ve B bulanık kümeleri, $C = A \cup B$ olduğunda her $x \in X$ için; Üyelik fonksiyonu tanımı $\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$, küme tanımı $(A \cup B)(x) = \max[A(x), B(x)] = A(x) \vee B(x)$ şeklinde ifade edilecektir (Mazlum, 2014; Tektaş ve Tektaş, 2020).

Dilsel bağlamda ise C(x) kümesi “if A(x) or B(x) then C(x)” şeklinde tanımlanan bir kural tabanı olduğu düşünülürse bu ifade $\max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_C(x)$ ifadesine karşılık gelmektedir. Burada kullanılan “OR” yani “VEYA” bağlacı birleşim işlemi ifade etmektedir (Altaş, 1999a).



Şekil 2.14: Bulanık Kümelerin Birleşme Özelliği (Tuş, 2006)

- 3. Bulanık Kümelerin Tümleyeni:** X evreninde tanımlı A ve B bulanık kümeleri ve $X - A = \{x \in X : x \notin A\}$ olmak üzere, $x \in X$ 'in her bir değeri için; A kümesinin tümleyen kümesi; $-A(x) = 1 - A(x)$, üyelik fonksiyonları ise, $\mu_{X-A} = 1 - \mu_A$ şeklinde ifade edilmektedir (Tektaş ve Tektaş, 2020). Bulanık bir kümenin tümleyen kümesinin grafiksel gösterimi (Şekil 2.15) aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.15: Bulanık Kümelerin Evrik Alma Özelliği (Tektaş ve Tektaş, 2020).

Bulanık Kümelerle İşlemler:

X evreninde $A = (x_1, x_2, x_3)$ ve $B = (y_1, y_2, y_3)$ tanımlanmış üçgen iki bulanık küme olsun. Kümelere ait işlemler,

- **Toplama:** $A + B = (x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3)$
- **Çıkarma:** $A - B = (x_1 - y_1, x_2 - y_2, x_3 - y_3)$
- **Çarpma:** $A \times B = (x_1 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2, x_3 \cdot y_3)$
- **Bölme:** $A : B = \left(\frac{x_1}{y_1}, \frac{x_2}{y_2}, \frac{x_3}{y_3} \right)$ şeklinde gösterilir. Burada çarpma ve bölme işlemleri yalnızca pozitif bulanık sayılar üzerinde tanımlanmaktadır. Pozitif bulanık sayı alt sınır değeri pozitif olan sayıdır. (Mazlum, 2014)
- **Eşitlik:** Küme eşitlikleri kümelere ait elemanların bir birlerine olan eşitliği anlamına gelmektedir. Bu şu şekilde açıklanabilir:

$$A = B = (x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_3 = y_3)$$
- **Simetriği:** A ve B kümelerinin simetriği,

$$-A = (-x_1, -x_2, -x_3)$$

$$-B = (-y_1, -y_2, -y_3)$$
 şeklinde gösterilmektedir.

Yukarıda gösterilmiş olan işlemler üçgen bulanık sayılar varsayımı üzerinden gösterilmiştir. İşlem sonuçlarına bakıldığında elde edilen sonuç kümesinin aynı şekilde üçgen bulanık sayılardan oluştuğu görülmektedir. Sonuç olarak bulanık kümelerle yapılan işlemlerde elde edilecek sonuçlar, küme içerisinde kullanılan bulanık sayı tipi ile aynı olması gerekmektedir. Literatüre bakıldığında en çok üçgen ve yamuk tipi bulanık sayıların kullanılıyor olması, bu tip bulanık sayıların işlem kolaylığı sağlamasındandır.

2.2.1.3. Üyelik Dereceleri ve Üyelik Fonksiyonları

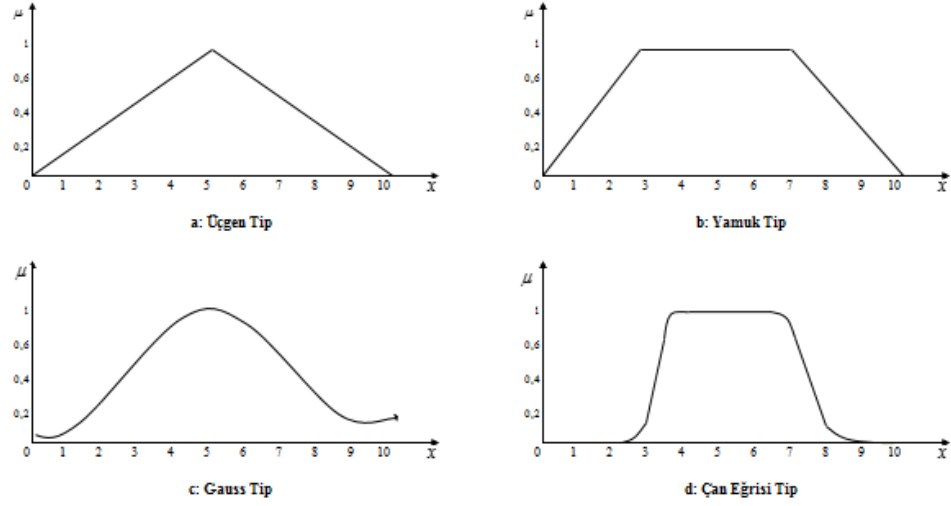
Zadeh (1965) bulanık kümeleri şöyle tanımlamıştı; “Bulanık küme, üyelik derecelerinin sürekliliği olan bir nesne sınıfıdır. Böyle bir küme, her bir nesneye sıfır ile bir arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik (karakteristik) işlevi ile karakterize edilir” (Zadeh, 1965). Tanımda bahsedilen üyelik dereceleri, aslında bulanık küme teorisinin temelini oluşturan üyelik fonksiyonları veya kümeye ait elemanların üyelik dereceleriyle temsil edilmesidir. Şu şekilde daha açıklayıcı olacaktır; bulanıklık kavramının ortaya atılmasına kadar alışla gelen ve Aristo

mantığına dayanan klasik küme kavramına daha önceden değinilmişti. Burada küme elemanlarının küme aitlikleri 0 veya 1 ile temsil edilmekteydi. Bu aitlik durumu elemanların kümeye üyelik durumlarını göstermektedir. Zadeh (1965)'e göre ise; “Çoğu zaman, gerçek fiziksel dünyada karşılaşılan nesne sınıflarının kesin olarak tanımlanmış üyelik kriterleri yoktur” (Zadeh, 1965). Bu söylem klasik küme kavramına karşıt gelen bir söylemdir ve nesnelerin üyeliklerinin kesin olarak temsil edilemeyeceğini savunur. Zadeh (1965) bu noktada, bulanık küme teorisinin savunduğu, nesnelerin kümeye olan aitlikleri yani üyeliklerinin 0 ile 1 arasında herhangi bir değerle temsil edilebilirliğini ortaya atarak çoklu üyelik kavramını geliştirmiştir (Zadeh, 1965).

X evreninde tanımlanmış bulanık bir A kümesi için, 0 ile 1 arasında değişen değerler üyelik derecesi (μ), bir alt küme içindeki değişimi ise üyelik fonksiyonu ($\mu_A(x)$) ile ifade edilmektedir (Mazlum, 2014). Burada A kümesine ait üyelik fonksiyonu, küme elemanlarının üyelik derecelerinden oluşmaktadır. A kümesini tanımlayan üyelik fonksiyonu, $\mu_A : x \rightarrow [0,1]$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Bulanık A küme tanımı ise, $A = \{(x, \mu_A(x), x \in X)\}$ şeklinde ifade edilmektedir.

$\mu_A(x)$ 'e karşılık gelen değerlerin 1 değerine daha fazla yakın olması x elemanının A bulanık kümesine daha yüksek derece ile ait olduğunu, 0 değerine daha fazla yakın olması A bulanık kümesine daha düşük derece ile ait olduğunu ifade etmektedir. $\mu_A(x)$ değerinin 0 olması ise x elemanının A bulanık kümesinin bir elemanı olmadığını belirtmektedir. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde çeşitli yöntemler olmasına karşın, çözüme yönelik kesin sonuç veren bir yöntem mevcut değildir. Temelde iki genel yaklaşım ile belirlenmeye çalışılmaktadır. İlk yaklaşım uzman kişi bilgi ve tecrübesine başvurmak, ikinci yaklaşım ise sisteme ait verilerin toplanıp üyelik fonksiyonu tipinin seçilmesi ve üyelik fonksiyonun oluşturulmasıdır. Üyelik fonksiyonları çeşitli tiplerde oluşturulabilmektedir. Sıklıkla tercih edilen tipler Şekil 2.16'da verilmiştir (Karasakal, 2012).



Şekil 2.16: Üyelik Fonksiyonu Tipleri (Karasakal, 2012; Tuş, 2006)

Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi için başlıca yöntemler ise şöyle sıralanabilir;

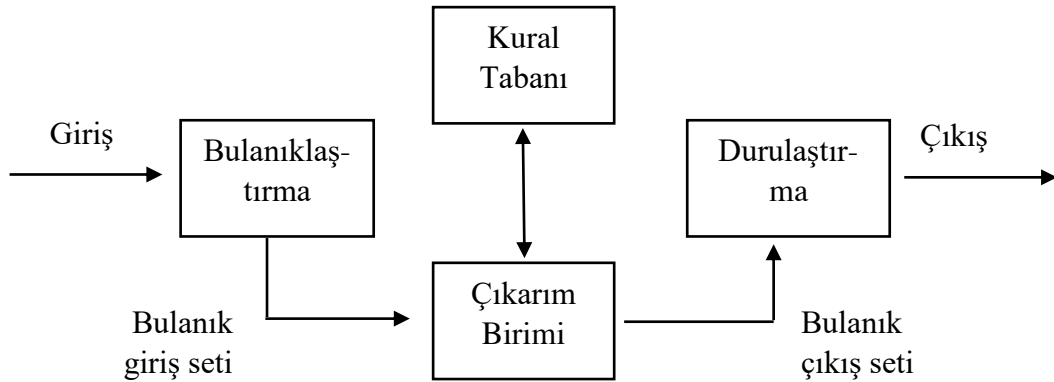
- Sezgi,
- Çıkarım,
- Merteleme,
- Açılı bulanık kümeler,
- Yapay sinir ağları,
- Genetik algoritmalar,
- Çıkarımcı muhakeme

Bunlardan bir kaçını açıklanacak olursa; sezgi, kişinin olaylara bakış açısı ve kendi görüşünün önemli bir rol oynadığı, fazla metodolojik bilgi gerektirmeyen bir yöntemdir. Çıkarım ise durum ve olaylar hakkında temel bilgilerin bilinmesini gerektiren bir yöntemdir. Merteleme yöntemi, bulanık değişkenler hakkında anketler, soruşturmalar veya seçimler yapılarak üyelik derecelerinin belirlenmeye çalışıldığı, her zaman verilen iki seçenek arasındaki tercihlerin sayıldığı ve bu tercihlere verilen puanlandırmalarla işlemlerin yapıldığı bir yöntemdir (Mazlum, 2014).

2.2.2. Bulanık Mantık Kural Tabanı

Bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak dilsel niteleyicilerin veya dilsel değişkenlerin matematiksel ifadelerle dönüştürülmesi, belirli bir sistem dâhilin de oluşturulan yapı ile gerçekleştirilebilir. Şöyle ki, insanların makinelere belirledikleri, dilsel ifade karşılıklarını işlerken belirli bir algoritmik yapı kullanması gerekir. Böylece işlenen veriler bu algoritma üzerinden denetlenerek sonuç elde edilmeye çalışılır. Problem tanımları, if ... then else biçiminde ifade edilen önerme ve kural yürütme işlemleri kullanılarak tanımlanırlar. Bu özelliğinden dolayı bu tip sistemler kural tabanlı bulanık sistemler olarak adlandırılırlar. Bulanık sistemler kullanılarak elde edilen sonuçlar yine bulanıklık özelliklerini koruyacaklardır (Altaş, 1999b; Karasakal, 2012).

İnsanların karşılaştıkları sorunları çözümlerken izledikleri yol düşüldüğünde bulanık sistemlerin de benzer bir yapı ile çalıştığı söylenebilir. Şöyle ki, insan beyni karşılaştığı problemleri çözümlerken bilgi birikimleri ve tecrübelerinden yararlanır. Bulanık sistemlerde Şekil 2.17'deki algoritmayı kullanarak sisteme daha önceden işlenmiş veriyi kullanarak problemi çözümlmeye çalışır (Tiryaki ve Kazan, 2007).



Şekil 2.17: Bulanık Sistem Yapısı (Tiryaki ve Kazan, 2007)

Şekil 2.17’de görüldüğü gibi bulanık mantık sistemi,

- Bulanıklaştırma
- Bulanık kural tabanı
- Bulanık çıkarım mekanizması

- Durulaştırma birimlerinden meydana gelmektedir (Tiryaki ve Kazan, 2007).

2.2.2.1. Bulanıklaştırma (Fuzzification)

Bulanıklaştırma birimi, kendisine kesin olarak girişi yapılan veriyi bulanıklaştırarak sisteme dâhil eden birimdir. Kesin verinin bulanıklaştırması kavramı, girdinin bulanık küme içerisindeki üyelik derecelerinin bulunmasını ifade etmektedir. Bu yolla, veri bulanık kümenin belli bir oranda elemanı olarak temsil edilir (Altaş, 1999a; Mazlum, 2014). Burada bulanıklaştırma birimi, bulanıklaştırma işlemini için üçgen, yamuk, gauss vb. tipteki üyelik fonksiyonu çeşitlerini kullanarak kesin verileri bulanık verilere dönüştürmektedir (Karasakal, 2012).

2.2.2.2. Bulanık Kural Tabanı (Rule-Base)

Bulanıklaştırılan verilere ait üyelik fonksiyonları kural tabanına girişi yapılan bilgilerle birlikte kullanılarak bulanık sonuçlar elde edilir. Burada kural tabanı sistem içerisinde giriş ve çıkış bağlantısını oluşturmak için “if then else” gibi koşul ifadeleri kullanılarak sisteme işlenen bir dizi kuralı temsil etmektedir (Altaş, 1999b).

2.2.2.3. Bulanık Çıkarım Mekanizması (Inference)

Bulanık çıkarım mekanizması, genel olarak insanın karar verme, önerme ve çıkarım yapma kabiliyetine paralel biçimde çıkarım yapar. Mekanizma kural tabanına işlenmiş her bir kural için bulanıklaştırılmış verileri kullanarak bulanık çıkış verilerinin hesaplanmasını sağlar. Aşağıda en çok tercih edilen üç adet çıkarım yöntemi verilmiştir (Karasakal, 2012).

- Mamdani tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması
- Takagi-Sugeno tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması
- Tekil (Singleton) tip yapı için bulanık çıkarım mekanizması

2.2.2.4. Durulaştırma (Defuzzication)

Bulanık mantık sisteminin son elemanı olarak işlem yapar. Bulanık çıkarım mekanizmasından elde edilen bulanık çıkarım kümesinin kesin sonuçlara dönüştürülmesi işlemini gerçekleştirir (Mazlum, 2014; Altaş, 1999b). Bulanık değerlerin kesin değerlere dönüştürülmesi durulaştırma veya durulama olarak ifade edilir. Bunu gerçekleştiren birime ise durulayıcı adı verilmektedir (Karasakal, 2012).

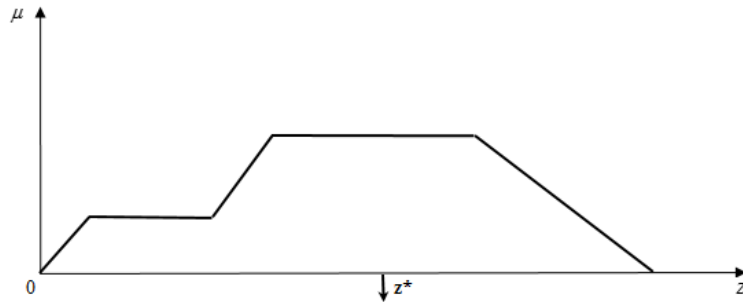
Durulaştırma işlemi için önerilen birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en çok bilinenleri;

1. Ağırlık Merkezi Yöntemi (COG - Center of Gravity)
2. Alanların Merkezi Yöntemi (COA - Center of Area)
3. İki bölge yöntemi (BOA - Bisector of Area)
4. Maksimumun ortalaması (MOM - Mean of Maximum)
5. Maksimumun en küçüğü (SOM - Smallest of Maximum)
6. Maksimumun en büyüğü (LOM - Largest of Maximum)
7. Sugeno bulanık modelleri
8. Tsukamoto bulanık modelleri şeklinde sıralanabilir (Altaş, 1999b).

Bu yöntemlerden hangisinin seçileceği ise eldeki problemin yapısına göre araştırmacı tarafından belirlenir (Durucasu vd., 2015). Literatüre bakıldığında sıklıkla tercih edilen yöntemlerden ağırlık merkezi ve alanların merkezi yöntemleri özetlenmiştir.

1. Ağırlık Merkezi Yöntemi (COG - Center of Gravity)

Bu durulaştırma yönteminde bulanık çıkarım mekanizması sonucunda elde edilen alanların ağırlık merkezi bulunur (Karasakal, 2012).



Şekil 2.18: Ağırlık Merkezi Yöntemi (Karasakal, 2012)

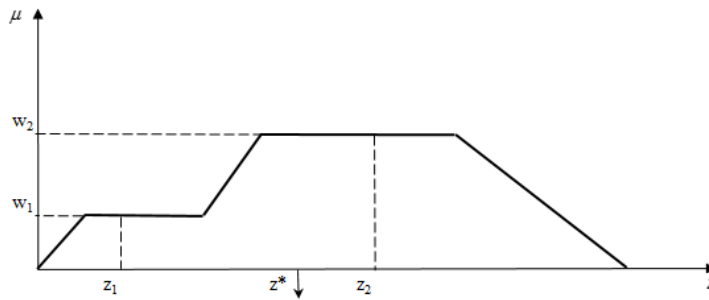
Grafik gösterimi Şekil 2.18’teki gibi olan durulaştırma işlemi (2.9) formülü ile formülize edilmektedir.

$$z^* = \frac{\int \mu_C(z).z.dz}{\int \mu_C(z).dz} \quad (2.9)$$

Grafik gösterimi Şekil 2.18’teki gibi olan durulaştırma işlemi (2.9) formülü ile formülize edilmektedir (Karasakal, 2012).

2. Alanların Merkezi Yöntemi (COA - Center of Area)

Bu yöntemde çıkarım mekanizmasında elde edilen bulanık değerler ve üyelik dereceleri kullanılarak durulaştırma biriminde durulaştırma işlemi yapılmaktadır. Her bir üyelik fonksiyonunun, kendisinin maksimum değeri ile ağırlıklandırılması (w_i) yolu ile aşağıda verilmiş olan (2.10) formülü kullanılarak net çıkış değeri hesaplanır (Karasakal, 2012).



Şekil 2.19: Alanların Merkezi Yöntemi (Karasakal, 2012)

Grafik gösterimi Şekil 2.19’deki gibi olan alanların merkezi yöntemi (2.10) formülü ile formüle edilmektedir (Karasakal, 2012).

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(z).z}{\sum \mu_c(z)} \quad (2.10)$$

Formül açılımı şu şekildedir;

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i).z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} = \frac{\mu(z_1).z_1 + \mu(z_2).z_2 + \mu(z_3).z_3 + \dots + \mu(z_{n-1}).z_{n-1} + \mu(z_n).z_n}{\mu(z_1) + \mu(z_2) + \mu(z_3) + \dots + \mu(z_{n-1}) + \mu(z_n)} \quad (2.11)$$

Bu ifadede i kural numarasını, n toplam kural sayısını göstermektedir. Etkin olmayan kurallar için daima $\mu(z_i) = 0$ 'dır. Etkin kurallar için ise i kural numarası olduğu kadar, i . kural için geçerli olan sözel komutu da temsil etmektedir (Altaş, 1999b).

2.3. Lineer (Doğrusal) Programlama

Matematik bilimi konularından olan doğrusal programla, doğrusal karar verme modeli oluşturulmasıyla ilgili kavram ve tekniklerden oluşmaktadır (Doğanay, 2001). Bir optimizasyon tekniği olan lineer programlama (LP), değişkenlere ve kısıtlayıcılara bağlı kalarak en uygun (maksimum veya minimum) çözümün elde edilmesini hedeflemektedir (Türköz, 2001).

Literatüre bakıldığında lineer programlama (LP) ile ilgili çalışmalar; ilk kez 1920'li yıllarda Sovyet Rusya da ortaya çıkmıştır. İlk yapılan çalışmalarla ekonomik faaliyetlerin teoride nasıl planlanabileceği problemi üzerinde durulmuştur. Daha sonra problemin çözüme ilişkin Leonid Kantoroviç'in de katkısıyla ilk defa bir lineer (doğrusal) programlama problemi açıkça ortaya çıkarılmıştır. I. Dünya Savaşı sırasında İngiliz ve Amerikalı araştırmacılar, askeri sorunların çözümü için doğrusal programlamaya başvurmuşlardır. II. Dünya Savaşı sırasında Birleşik Amerika'nın ortaya çıkan lojistik sorunlarının çözümü için George Dantzig tarafından doğrusal programlama probleminin tanımlanması gerektiği ortaya çıkarılmıştır. Problemin çözümü için bir ekip oluşturulmuş ve matematiksel tekniklerin etkinlikleri denetlenmiştir (Tuş, 2006). Bu tür bir problem çözümü içinde simpleks algoritması adını verdikleri bir çözüm sistemi ortaya atmışlardır. Simpleks algoritması, doğrusal

programlama problemlerinde optimum çözümü pratik olarak bulmak amacıyla George Dantzig tarafından 1947 yılında geliştirilen bir algoritmadır. 1947'den sonra, özellikle geliştirilen bilgisayar uygulamaları ile birlikte büyük özel sanayi birimleri ve büyük devlet projeleri için birçok doğrusal programlama problemi tanımlanmış ve simpleks algoritması ile çözümlenip pratikte kullanılmaya başlanmıştır (Tuncel, 1997).

Günümüzde doğrusal programlamanın uygulama alanları çok çeşitlidir. Kullanım alanı çok geniş olan LP için bazı kullanım alanları şu şekilde belirtilebilir (Türköz, 2001);

1. En kârlı üretim(imalat) programının tespiti,
2. En iyi envanter stratejisinin tespiti,
3. Satın alma veya satış fiyatlarında yapılacak değişikliklerin etkilerinin ölçülmesi,
4. Öngörülen yatırımların getireceği gelirlerin değerlendirilmesi
5. En iyi yer tespiti problemlerinde,
6. En düşük maliyetle üretimin, zaman esasına göre düzenlenmesi,
7. Dağıtım yerlerinin veya depoların en uygun kuruluş yerinin seçilmesi gibi konularda doğrusal programlama metodu kullanılır (Türköz, 2001).

2.3.1. Lineer (Doğrusal) Programlamanın Tanımı

Temelde lineer (doğrusal) programlama, optimallik (en iyileme) ölçütüne bağlı olarak sınırlı kaynaklarla optimal çözümün elde edilmesini içeren matematiksel bir tekniktir (Türköz, 2001). Amaç kabul edilen doğrusal fonksiyonun, doğrusal kısıtlara uyularak optimize edilmesidir (Doğanay, 2001). Problemdeki kısıt ve amaç fonksiyonlarının doğrusal olup olmamasına göre matematiksel programlama temelde; doğrusal programlama ve doğrusal olmayan programlama olarak iki alt bransa ayrılmaktadır (Tuş, 2006). Lineer (doğrusal) programlamayla ilgili literatürde yer alan tanımların bazıları şu şekildedir;

Matematiksel yani doğrusal programlama, belirli eşitlik veya eşitsizlik kısıtları altında yine belirli bir fonksiyonun en iyi değerinin, dolayısıyla fonksiyona bu en iyi değeri verecek olan çözümlerin araştırıldığı kavram ve yöntemler bütünüdür (Tuş, 2006).

Lineer (doğrusal) Programlama, değişkenlere ve kısıtlayıcılara bağlı kalarak amaç fonksiyonunu en uygun (maksimum veya minimum) kılmaya çalışır. Bir başka tanıma göre doğrusal programlama, doğrusal eşitlik veya eşitsizlikler halinde bulunan kısıtlayıcı şartlar altında, belli bir amaç fonksiyonunun en iyilemesidir (Türköz, 2001).

Tanımlar incelendiğinde lineer (doğrusal) programlama, belirlenen kısıtlar ve amaç fonksiyonu ile en uygun çözüme daha kısa zamanda ulaşılmasını amaçlamaktadır. Burada belirlenmesi gereken kısıtlar zaman alıcı olsa da değerlendirilmesi gereken tüm ihtimallerin işleme alınması konusunda pratiklik sağlamaktadır.

2.3.2. Lineer (Doğrusal) Programlama Problemlerinin Formülasyonu

Çözülme istenen problem modeli, maksimum veya minimum amaca göre iki şekilde formüle edilebilmektedir (Türköz, 2001). Her iki model içinde geçerli olan bazı temel kavramlar şu şekildedir (Tuş, 2006; Doğanay, 2001);

a) Amaç Fonksiyonu: Bir maksimize veya minimize edilecek doğrusal amaç fonksiyonudur. En iyi çözüm seçeneğinin bulunması için işleme alınan fonksiyondur.

b) Sınırlayıcı şartlar: Doğrusal eşitsizlik veya eşitliklerden oluşan kısıtlayıcı koşullardır. Kısıt olarak adlandırılan sınırlayıcı şartlar, seçeneklerin neler olduğunu belirleyerek zorunlu ilişkileri tanımlar.

c) Negatif olmama şartı: Değişken değerlerinin 0 veya pozitif değerde olmaları

d) Bütün ilişkilerin doğrusal olduğunun kabul edilmesi.

LP modeli oluşturulurken üç etkeni; amaç fonksiyonu, kısıtlayıcı koşullar ve pozitiflik koşulunun göz önüne alınması gerekir (Bircan ve Kartal, 2004).

LP modeli formülasyonu oluşturulurken izlenecek adımlar şu şekildedir (Tuş, 2006);

1. Amacın belirlenmesi,
2. Karar değişkenlerinin tanımlanması,
3. Amaç fonksiyonunun matematiksel olarak belirtilmesi,
4. Her bir sınırlayıcı koşulla ilgili olarak açıklayıcı bilgilerin belirtilmesi,
5. Birim cinsinden sınırlayıcı koşul olarak sağ taraf değerlerinin belirtilmesi,
6. Her bir sınırlayıcı koşula göre denklem katsayılarının belirtilmesi,

7. Sol tarafa her sınırlayıcı koşul için karar değişkenlerinin yazılması,
8. Her bir sınırlayıcı koşul için karar değişkenleri katsayılarının belirtilmesi

Doğrusal programlama modelinden doğru sonucun alınabilmesi için amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı şartların doğru tanımlanmalıdır. Amacın açık olarak bilinmesi ve nicel olarak tanımlanması gerekir (Doğanay, 2001; Bircan ve Kartal, 2004).

- n tane değişken ve m tane eşitlik ya da eşitsizlik kısıtı içeren bir LP probleminin matematiksel gösterimi (Türköz, 2001);

Amaç fonksiyonu: $Z = \sum c_i x_i$

$$\max(\min) Z(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

Kısıtlar:

$$a_{ij} x_i \leq b_j$$

$$i= 1,2,3,\dots,m$$

$$j= 1,2,3,\dots,n$$

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1j} x_j \leq b_1$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2j} x_j \leq b_2$$

.....

$$a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + \dots + a_{ij} x_j + \dots + a_{in} x_n \leq b_i$$

.....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mj} x_j + \dots + a_{mn} x_n \leq b_m$$

Negatif olmama: $x_i \geq 0, j=1,2,3,\dots, n$

2.4. Bulanık CPM (FCPM)

Kritik yol yöntemi, çalışılmaya başladığı tarihten günümüze kadar pratikte kullanımının kolay olması yönüyle karmaşık projelerin planlanması ve çizelgelenmesinde, projelerin kontrol çalışmalarında etkin olarak kullanılan bir araçtır. Kritik yol yöntemi kullanılarak çözüme yönelik oluşturulan modelin en temel amacı proje tamamlanma süresinin tespitidir. Bu amaçla kullanılan ve popüler olan diğer bir proje planlama ve çizelgeleme yöntemi ise bilindiği gibi PERT yöntemidir. Her iki

yönteme ait çözüm modeli, ağdaki kritik yolların, kritik faaliyetlerin ve kritik olayların tanımlanmasından oluşur (Chanas ve Zielinski, 2001).

Sektör ayrımı yapılmadan ilk kez uygulanacak bir proje düşünüldüğünde, projeye ait faaliyetlerin ve faaliyet sürelerinin tam ve doğru bir şekilde tespiti ve uygulanması çoğu durum için zordur (Atlı ve Kahraman, 2013). Ayrıca proje faaliyetleri veya faaliyet süreleri belirlenirken uzman kişinin deneyim, bilgi birikimi, tahmin gücü gibi özelliklerinden yararlanılır. Çok sayıda uzmandan aynı proje için istenilen proje faaliyetleri ve proje faaliyet süreleri tahminleri farklılık gösterebilir (Durucasu vd., 2015). Bu gibi durumlar projelerdeki belirsizlik fikrini net bir şekilde açıklamaktadır. Öznelliğin söz konusu olduğu belirsiz durumlar için önerilen bir yaklaşım bulanık mantık yaklaşımıdır. Bu bağlamda Zadeh (1965)'in ortaya attığı bulanık küme teorisinin klasik proje çizelgeleme yöntemlerine uygulanması fikri; projeler için oluşan belirsizlik durumlarıyla klasik yöntemler kullanılarak tam anlamıyla başa çıkılmamasıdır. 1970'lerin ikinci bölümünden başlayarak proje ağ analizi ve proje planlama alanında bulanık PERT ve bulanık CPM adı verilen yaklaşımlar geliştirilmiştir (Chanas ve Zielinski, 2001).

Prade 1979 yılında “zamanlama probleminde bulanık küme teorisinin kullanılması” adlı çalışmasıyla bulanık küme teorisini proje çizelgeleme problemine ilk kez uygulamıştır (Prade, 1979). Araştırmacılar bulanık proje çizelgeleme ve planlama konusunda birçok çalışma yayınlamışlardır. Chanas ve Zielinski (2001), yaptıkları çalışma ile yol kritiklik derecesi üzerine çalışmışlardır ve yol kritiklik derecesinin hesaplanmasında iki etkili yöntem önermişlerdir. Çalışmalarında, her bir aktivitenin çalışma süresinin keskin bir değer, aralık veya bulanık bir sayı olarak temsil edilebileceğini varsaymış ve kritikliğin karmaşıklığını tartışmışlardır. Bunu takiben Zadeh (1965)'in genişleme prensibini ağdaki aktivite süresi sürelerinin bir fonksiyonu olarak ele alarak, klasik kritiklik kavramına doğrudan uygulanmasını ümit etmişlerdir. L-L tipi bulanık sayılar kullanarak yollara ait kritiklik derecelerinin proje en uzun yolunun bulunmasında yeterli olduğu sonucuna varmışlardır (Chanas ve Zielinski, 2001). Chen vd. (2006,2007,2008), FCPM üzerine farklı tarihlerde çeşitli çalışmalar yayınlamışlardır ve çeşitli yaklaşımlar önermişlerdi. Chen 2006 yılında; çalışmasını doğrusal programlama formülasyonuna ve bulanık CPM problemini bir çift parametrik doğrusal programa dönüştürmek için Zadeh (1965)'in genişletme ilkesine dayandırmıştır. L-R tipi bulanık sayıları ve alfa kesim yöntemini kullanarak toplam

proje süresinin üyelik fonksiyonunu tanımlamıştır (Chen, 2006). Çözümü destekleyici bir yaklaşım olarak ise Yager sıralama yöntemini kullanmıştır. Sonuç olarak Chen (2006) çalışmasında proje toplam süresinin net değerler yerine üyelik fonksiyonlarıyla temsil edilmelerinin değerli sayılabilecek bilgi kayıplarını önlediğini savunmuştur (Chen, 2006). Chen ve Huang 2007 yılında yaptıkları çalışmada, Chen (2006)'nın bir önceki çalışmasından farklı olarak FPERT yöntemi kullanmışlardır. Faaliyet sürelerini üçgen bulanık sayılarla temsil ederek faaliyetlere ait başlangıç ve bitiş sürelerini hesaplamışlar, faaliyetlerin ve yolun kritiklik derecesinin belirlenmesinde alfa kesim dışınca ikinci bir endeks kullanmışlardır. Önerilen modeli kullanarak, proje ağının durumu hakkında bilginin hemen elde edilebileceğini ve kritik yoldaki faaliyetlerin süreleri değiştirilerek duyarlılık analizi yapılabileceğini savunmuşlardır (Chen ve Huang, 2007). Chen ve Hsueh 2008 yılında ise üyelik fonksiyonlarının bilinmediği durumlarda bu tarz problemlerin çözümüne yönelik yaklaşımlar önermiştir. Şöyle ki bulanık kritik yol yöntemini LP yaklaşımı ile çözülebilen net CPM'e dönüştürmeyi hedeflemiştir. Bulanık CPM problemini net bir hale getirmek için ise uygun bir bulanık sıralama yöntemi, yani Yager'in sıralama yöntemi benimsenmiştir. Yöntemi çalışmalarında başarıyla uygulamışlardır (Chen ve Hsueh, 2008). Çalışmalarda önerilmiş olan lineer programla formülasyonlarında, bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bir bulanık sayının en üst düzeye çıkarılması amaçlanmıştır (Chen , 2006; Chen ve Hsueh, 2008). Duruca vd., (2015) çalışmasında gerçek bir inşaat projesinin kritik yolunun ve tamamlanma süresinin bulanık faaliyet süreler söz konusu olduğunda nasıl hesaplanabileceği konusunda literatürde sık kullanılan yöntemlerden α -kesim ve ağırlık merkezi yöntemlerini kullanmış ve Yager sıralama yöntemiyle elde edilen çözümleme sonuçlarının doğruluğunu sınamıştır. Yöntemler inşaat projesine başarıyla uygulanmış ve Yager sıralama yöntemiyle sonuçlar desteklenmiştir. Sonuç olarak proje öngörülen süreler dâhilinde tamamlanmış ve bu tarz bilimsel yaklaşımların avantajlı olabileceği sonucuna varmışlardır (Duruca vd., 2015).

2.4.1. Bulanık CPM ile Lineer (Doğrusal) Programlama

Kritik yol metodunun amacı, proje için zaman çizelgesi oluşturmak, projeyi tamamlamak için gereken toplam süre ve kritik yolun bulunmasıdır. Toplam süreyi belirlemenin ve kritik yolları bulmanın alternatif bir yolu LP tekniğini kullanmaktır (Chen, 2006).

Genel olarak bilindiği gibi, klasik CPM problemi en kısa yol probleminin tersi olarak yani en uzun yol (kritik yol) problemi olarak düşünülebilmektedir. Bu bağlamda faaliyet sürelerini bazı keskin kısıtlamalar altında değerlendiren ve amacı faaliyet sürelerinin doğrusal kombinasyonunu en üst düzeye çıkarmak olan bir LP formüle edilebilir. Bunu takiben, aktivite süreleri için bulanık sayılar söz konusu olduğunda bulanık CPM problemi için bir LP formüle edilebilir, burada amaç bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bir bulanık sayıyı en üst düzeye çıkarmaktır (Chen ve Hsueh, 2008).

Amaç, proje ağının 1 nolu düğümünden n nolu düğümüne kadar proje ağının toplam süresine ulaşmaktır. N düğümlü klasik CPM problemi Model 1'deki gibi formüle edilmektedir. Burada N, n düğümlerinin kümesini, $(i, j) \in A$ serim kümesini, T_{ij} : $(i, j) \in A$ kümesinde tanımlanmış faaliyet süresini temsil etmektedir.

$$D = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} x_{ij}$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1,$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in A$$

Model 1: Klasik CPM-LP Modeli (Chen, 2006)

Burada A net değerler kümesi için x_{ij} , $(i, j) \in A$ 'da akış miktarını belirten karar değişkenidir. Kısıtlamalar, her bir düğümdeki akışın korunmasını sağlayarak, akışın proje ağında ne oluşturulabileceğini hem de ne yok edilebileceğini gösterir. Böylece şebeke diyagramı içerisinde olası tüm yollar kısıtlamalar ile değerlendir ve en uzun

yol problemine daha kısa sürede cevap alınması sağlanır. Proje şebekesi için kritik yol Model 1 için en uygun çözümde $x_{ij}=1$ optimal karar değişkenlerini kapsayan yollardaki her bir faaliyetin başlangıçtan sona kadar $(i, j) \in A$ faaliyetini kapsar. Burada akış içerisinde bir faaliyet için akışa dâhil olma veya olmama durumu söz konusudur. Akışa dâhil faaliyetler için $x_{ij}=1$ iken akışa dâhil olmayan faaliyetler $x_{ij}=0$ olarak tanımlanır. Sonuç olarak projenin tamamlanması için gereken toplam faaliyet süresi Model 1'in maksimum amaç değeri olan D olarak verilir (Chen ve Hsueh, 2008; Atlı ve Kahraman, 2013).

Model 1 için bulanık sayılar söz konusu olduğunda bulanık kritik yol problem formülasyonu N düğümlü bir bulanık CPM problemi için Model 2'deki gibi olacaktır. N , n düğümlerinin kümesini, $(i, j) \in \bar{A}$ bulanık serim kümesini, $\bar{T}_{ij}$, $(i, j) \in \bar{A}$ için bulanık aktivite sürelerini, $\bar{D}$ 'de bulanık proje tamamlanma süresini ifade etmektedir. Bulanık aktivite sürelerine sahip bir proje ağı $S_f = (V, A, \bar{T})$ olarak düşünülür. Üyelik fonksiyonu $\mu_{\bar{T}_{ij}}(t_{ij})$ dir. $\bar{T}_{ij} = \left[\left\{ (t_{ij}, \mu_{\bar{T}_{ij}}(t_{ij})) \mid t_{ij} \in S(\bar{T}_{ij}) \right\} \right]$, $(i, j) \in \bar{A}$ olmak üzere bulanık faaliyet süresi küme tanımını temsil etmektedir.

$$\bar{D} = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1,$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in \bar{A}$$

Model 2: Bulanık CPM-LP Modeli (Chen, 2006)

Burada, karar değişkeni x_{ij} 'nin bir akış birimi herhangi bir yayda olabileceğinden, yalnızca ikili değerleri (0 veya 1) almalıdır (Chen, 2006). Yani faaliyetin akışa dâhil olma veya dâhil olmama durumunu temsil etmelidir.

Model 1'deki fonksiyon katsayısı olan aktivite süresi T_{ij} 'nin herhangi biri bulanıksa, toplam süre olan D 'de bulanıklaşır. Bu durumda, net sayılarla temsil edilen T_{ij} tam ve doğru olmayacaktır. Dikkat edilirse T_{ij} aktivite süreleri $\bar{T}_{ij}$ bulanık aktivite sürelerine, $(i,j) \in A$ net sayılar kümesi $(i,j) \in \bar{A}$ bulanık sayılar kümesine ve toplam süreyi temsil eden D 'de $\bar{D}$ ile ifade edilen toplam bulanık proje tamamlanma süresine dönüştüğü görülecektir (Atlı ve Kahraman, 2013).

Model 2 kullanılarak elde edilen proje tamamlanma süresi bulanık olacağından sonuçların net sayılara dönüştürülmesi gerekmektedir. Chen vd. (2008), toplam sürenin net değerlere dönüşümünde yaygın bir yaklaşım olan Yager'in sıralama yöntemini önermişlerdir. Önerilen yaklaşım üyelik fonksiyonlarının bilinmesini gerektirmez (Chen ve Hsueh, 2008). Chen (2006), bu yaklaşıma karşı bir görüş olarak net değerlere dönüşüm bazı yararlı bilgilerin kaybolmasına yol açacağını belirterek toplam bulanık proje süresi için alfa olasılık seviyeleri atanarak üyelik fonksiyonu geliştirilmesini önermişlerdir (Chen, 2006). Bu çalışmada sadece Yager'in sıralama yöntemi, alfa (α) kesim yöntemi ve durulaştırma yöntemlerinden olan alanların merkezi yöntemi kullanıldığı için bu alanda çok daha fazla sayıda yöntem olmasına rağmen sadece belirtilen bu üç yöntemle ilgili açıklamada bulunulmuştur.

2.4.2. Yager Sıralama Yöntemi

Yager'in sıralama yöntemi, adını yaklaşımı geliştirmiş olan Yager'den almıştır. Bulanık sayıların sıralanması için önerilen prosedür bulanık sayıların durulaştırmasını temel almaktadır (Atlı ve Kahraman, 2013). Yöntem, bulanık kritik yol problemini kesin faaliyet süreli geleneksel kritik yol problemine dönüştürme temeline dayalıdır. Uygulanması basit ve bulanık etkinlik sürelerinin üyelik işlevlerinin açık biçimini bilmeyi gerektirmez (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008).

Yager "alan telafisi" kavramına dayanarak, bulanık kümeleri temsil etmek için alfa kesiminden konveks bulanık $\bar{t}$ sayısı için aşağıdaki formüle göre bir sıralama indeksi

$I(\bar{t})$ önerdi;

$$I(\bar{t}) = \int_0^1 \frac{1}{2} (t_\alpha^L + t_\alpha^U) d\alpha, \quad (2.12)$$

$\bar{t}$; bulanık sayılarının ortalama değerinin merkezidir.

İki bulanık sayı $\bar{D}_1$ ve $\bar{D}_2$ olsun. $I(\bar{D}_1) \geq I(\bar{D}_2)$, olduğunda $\bar{D}_1 \geq \bar{D}_2$ ve $\max\{\bar{D}_1, \bar{D}_2\} = \bar{D}_1$ olacaktır. Üyelik fonksiyonları bilinmeyen bulanık sayılar için belirlenen sıralama indeksleri kullanılarak işlem yapılır ve yöntem üyelik derecelerinin bilinmediği durumlarda geçerliliğini korumaya devam etmektedir (Atlı ve Kahraman, 2013; Durucasu, vd., 2015).

Ayrıca Yager'in sıralama yöntemi, alan telafisine dayalı sıralama tekniklerinden biri olduğu için doğrusallık ve katkı özellikleri barındırır. Şöyle ki,

B ve C konveks bulanık sayılarının doğrusal bir kombinasyonu aynı şekilde konveks bulanık bir sayı olabilen A olduğu düşünüldüğünde, $A = uB + vC$ olacaktır. Burada u ve v sabitlerdir. Daha sonra işlem, sıralama indeksleri için uygulandığında,

$I(A) = uI(B) + vI(C)$ elde edilecektir. Sonuç olarak, Yager'in sıralama yöntemi temelinde, bulanık CPM sorununu, net etkinlik süreli geleneksel bir CPM sorununa dönüştürülebilir (Chen ve Hsueh, 2008; Atlı ve Kahraman, 2013; Durucasu, vd., 2015).

Kritik yolun bulunması problemi m adet yoldan oluşan Model 2 için;

$p_k, k = 1, 2, \dots, m$ 'e kadar proje ağ diyagramına ait yollardan oluşsun. $x_{ij}^{(k)}, (i, j) \in \bar{A}$, bulanık kümesinde her bir bulanık yol için karar değişkenini temsil etmek üzere tanımlandığında;

$\bar{D}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}$, formülü her bir k. yol için toplam bulanık süreyi verecektir.

Burada $k = 1, 2, \dots, m$ 'e kadar olan tüm yollar için maksimum süreyi veren yol,

$\bar{D}^* = \max\{\bar{D}^{(k)}, k = 1, 2, \dots, m\}$ formülü ile tanımlanabilir. Maksimum süreyi yani

kritik yolu veren $\max \bar{D}^{(k)} = \max\left\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}\right\}$ formülü Yager sıralama yöntemine

uygulandığında, $I(\bar{D}^*) = \max\{I(\bar{D}^{(k)}), k = 1, 2, \dots, m\}$ dönüşecektir. Bu dönüşüm Yager

sıralama metodunun doğrusallık ve katkı özelliğine dayanarak yapılmıştır. Özetlemek gerekirse net formüller aşağıdaki gibi olacaktır.

k. yola ait sıralama indeksi:

$$I(\bar{D}^{(k)}) = I\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^{(k)} \quad (2.13)$$

Proje tamamlanma süresine (maksimum süreli yol) ait yolun sıralama indeksi:

$$I(\bar{D}^*) = \max_k \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^{(k)} \right\} \quad (2.14)$$

Sonuç olarak Yager'in sıralama yöntemi kullanılarak bulanık sayıların net sayılara dönüşüm LP modeli aşağıdaki gibidir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008);

$$I(\bar{D}^*) = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1,$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{veya} \quad 1 \quad (i, j) \in \bar{A}$$

Model 3: Yager Sıralama LP Modeli (Chen ve Hsueh, 2008)

Not: $x_{ij}^{(k)}$, $(i, j) \in \bar{A}$ 'da k. yol üzerindeki faaliyetler için 1, k. yola ait olmayan faaliyetler için 0 değerini alır.

Maksimum sıralama indeksine sahip yol projenin kritik yolunu göstermektedir. Başka bir deyişle projenin tamamlanma süresine sahip yolu vermektedir.

2.4.2.1. Göreceli Yol Kritiklik Derecesi

Kritik yolun belirlenmesi probleminde proje ağ diyagramına ait tüm yolların göreceli kritiklik dereceleri yani kritiklik durumlarının belirlenmiş bir algoritmaya göre sıralanmasıdır (Chen , 2006; Chen ve Hsueh, 2008) .

Yollar 0 ile 1 arasındaki değerlerle derecelendirilmektedir. Proje ait en uzun yolun derecesinin 1 olarak kabul edilmesi varsayımına dayanmaktadır (Atlı ve Kahraman, 2013). Sıralama formülü (2.15)'te verilmiştir.

p^* proje kritik yolu ve $\deg_{Cr}^R(p^*)=1$ kabul edilerek,

$$\deg_{Cr}^R(p_k) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^k}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij}) x_{ij}^*}, \quad k=1,2,\dots,m. \quad (2.15)$$

Not: x_{ij}^* , p^* kritik yolunun karar değişkeni (Chen ve Hsueh, 2008)

Unutulmamalıdır ki, proje içerisinde değişim gösterecek her bir durum projenin kritik yolunun değişimine sebep olabilmektedir. Bu bağlamda oluşabilecek değişimlere yolların kritiklik dereceleri göz önünde bulundurularak karar vermek, oluşacak etkilerin önceden tahmin edilmesini sağlayabilmektedir. Böylece projenin başarısında olumlu bir etki oluşturabilir.

2.4.3. Alfa Kesim Yöntemi

Alfa (α) kesim, bulanık ortamlarda çalışılan projelerde belirsizliğin korunmasına yönelik bir yöntemdir. Temel fikir, 0 ile 1 arasında değişen olasılık seviyeleri kullanılarak proje toplam süresine üyelik fonksiyonu atanmasına dayanmaktadır. Bilindiği üzere proje ağındaki faaliyetler bulanık sayılar ise proje toplam süreside bulanık olacaktır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, üyelik fonksiyonu atanması işlemi proje yönetimi için önemli sayılabilecek bilgilerin kaybolmasını önleyerek belirlenen olasılık seviyelerinde güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Bulanık ortamlarda farklı olasılık seviyeleri altında faaliyet süreleri değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak proje için tanımlanan kritik yolda değişebilir (Elizabeth ve

Sujatha, 2013a). Ayrıca belirli bir olasılık düzeyinde birden fazla kritik yolun bulunması da mümkündür. Yani, toplam faaliyet süre değerleri çeşitli olasılık seviyeleri altında farklı olabilir. Ne yazık ki, mevcut tekniklerin çoğu sadece net çözümler sunar. Elde edilen objektif değer net bir değerse, proje yönetimi için bazı yararlı bilgiler kaybolabilir. Etkinlik sürelerinin belirsizliğini korumak için toplam proje süresinin ($\bar{D}$) üyelik işlevi belirlenmelidir (Chen, 2006). Üyelik fonksiyonunun oluşturulmasına yönelik bir yaklaşım, $\mu_{\bar{D}}(d)$ 'nin alfa kesimlerini türetmektir. $\bar{T}_{ij}$ 'nin α -kesim tanımı; $(T_{ij})_{\alpha} = \left\{ t_{ij} \in S(\bar{T}_{ij}) \mid \mu_{\bar{T}_{ij}}(t_{ij}) \geq \alpha \right\}$ şeklindedir (Dutta vd., 2011). Burada, $(T_{ij})_{\alpha}$ bulanık bir küme yerine net bir küme olduğu belirtilmelidir. $\bar{T}_{ij}$, α -kesimi kullanılarak farklı seviyelerdeki güven aralıklarında temsil edilmiştir. Bu nedenle $\bar{T}_{ij}$ α -kesimi aşağıdaki gibi tanımlanan net bir aralıktır:

$$(T_{ij})_{\alpha} = \left[\inf_{t_{ij}} \left\{ t_{ij} \in S(\bar{T}_{ij}) \mid \mu_{\bar{T}_{ij}}(t_{ij}) \geq \alpha \right\}, \sup_{t_{ij}} \left\{ t_{ij} \in S(\bar{T}_{ij}) \mid \mu_{\bar{T}_{ij}}(t_{ij}) \geq \alpha \right\} \right] = [(T_{ij})_{\alpha}^L, (T_{ij})_{\alpha}^U]$$

Üçgen bulanık sayılar için üyelik fonksiyonu,

$$\mu_{\bar{A}}(x; a, m, b) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a} & , \quad x \in [a, m) \\ 1 & , \quad x = m \\ \frac{b-x}{b-m} & , \quad x \in (m, b] \\ 0 & , \quad x \notin [a, b] \end{cases} \quad (2.16)$$

Olduğu önceden belirtilmiştir. Belirtilen üyelik tanımından yola çıkılarak; α -kesim parametreleriyle oluşturulacak yeni $\bar{T}_{ij}$ değerlerini aşağıdaki gibi tanımlamak mümkündür; $\alpha \in [0,1]$ aralığında $\bar{T}_{ij} = (a, m, b)$ üçgen bulanık sayılar kümesi için (Elizabeth ve Sujatha, 2013a; Dutta, vd., 2011)

$$(\bar{T}_{ij})_{\alpha} = [a^{\alpha}, b^{\alpha}] = [(m-a)\alpha + a, (m-b)\alpha + b] \quad , \quad \alpha \in [0,1] \quad (2.17)$$

Basit bir örnek üzerinde uygulamak yöntemin anlaşılmasını kolaylaştıracaktır.

Örneğin: Bir etkinlik süresinin yaklaşık 6 saat olduğu varsayımıyla,

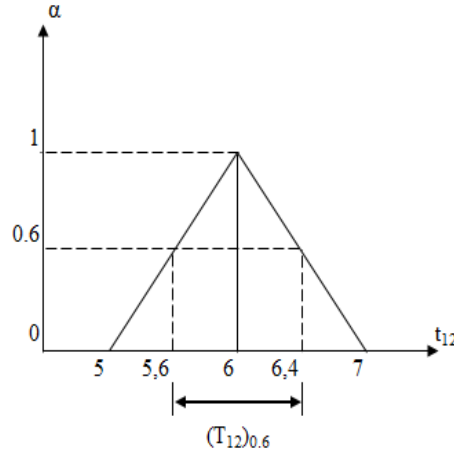
Bu etkinlik süresinin üyelik işlevi üçgen bulanık sayılarla gösterilebilir. Etkinliğe ait üyelik fonksiyonu tanımı;

$$\mu_{\bar{T}_{12}}(t_{12}) = \begin{cases} t_{12} - 5, & 5 \leq t_{12} \leq 6 \\ 7 - t_{12}, & 6 \leq t_{12} \leq 7 \end{cases} \text{ olsun.}$$

Üçgen bulanık sayılar $\bar{T}_{ij} = (x, y, z)$ olarak gösterilmekteydi. Bu bağlamdan etkinliğe ait bulanık aktivite süresi, $\bar{T}_{12} = (t_{12}, \mu_{\bar{T}_{12}}(t_{12})) \mid t_{12} \in [5,7]$ ya da $\bar{T}_{12} = (5,6,7)$ şeklinde tanımlanır. α -kesim kümesi ise $(T_{12})_{\alpha} = \left\{ t_{12} \in [5,7] \mid \mu_{\bar{T}_{12}}(t_{12}) \geq \alpha \right\}$ ile tanımlanacaktır (Chen, 2006).

$\bar{T}_{12} = (5,6,7)$ bulanık kümesine $\alpha=0,6$ için formül (2.17) uygulanırsa,

$(\bar{T}_{12})_{0,6} = [(6-5)0.6 + 5, (6-7)0.6 + 7] = [5.6, 6.4]$ kesim değerleri bulunacaktır. Burada elde edilmiş olan bu aralık değeri t_{ij} değerlerinin $\alpha=0,6$ olasılığında nerede olduğunu göstermektedir (Chen, 2006). Sonuçlar grafik üzerinde Şekil 2.20'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.20: Alfa kesim ve Üyelik fonksiyon (Chen, 2006)

Sonuç olarak görülmektedir ki, her bir bulanık t_{ij} sayısı için $\mu(t_{ij})$ üyelik değeri α -kesim parametreleri kullanılarak belirlenen güven aralıklarında temsil edilmektedir. Belirlenen her bir kesim aralığı değerleri için t_{ij} değeri de değişmektedir. Dolayısıyla her bir seviye için elde edilecek proje toplam süresi farklılık göstermektedir. Açıklanan tüm işlemler bu yargının doğruluğunu kanıtlamaktadır. Yöntem, üyelik değerlerinin bilinmediği veya öznellik içerdiği durumlar için etkili bir çözüm sunabilecek güçtedir. Üyelik dereceleri kullanımı belirsizlik ortamını koruduğundan ayrıca bir durulaştırma işlemine ihtiyaç duymamaktadır.

Çalışmanın son kısmında önerilen yöntemlerin geçerliliği bir inşaat projesi üzerinde uygulanarak kanıtlanmaya çalışılacaktır.

3. BULANIK CPM YÖNTEMİ İLE PROJE TOPLAM SÜRESİNİN BELİRLENMESİ VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

Çalışmanın amacı, belirsizlik durumları söz konusu olduğunda alternatif bir çözüm yolu sunduğu düşünülen bulanık proje planlama yönteminin, önerilen iki farklı çözüm algoritması kullanarak, bulanık ve net proje süresi ile kritik yolun tespitinde toplam süre ve kritik yoldaki olası değişimlerin gösterilmesidir. Çözümde lineer programlama (LP) tekniği yardımcı araç olarak kullanılacaktır. Önerilen çözüm algoritmaları uygulanan bir inşaat projesi üzerinde örneklendirilecek ve çalışmanın özgünlüğünü oluşturacaktır. Ayrıca önerilen çözüm algoritmalarıyla bulanık yöntemlerin karşılaştırılması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, Chen vd. (2006, 2008) tarafından hazırlanan çalışmalar ışığında yürütülmüştür. Temel fikir, CPM probleminde en kısa yol sorununun tersi yani en uzun yol problemi olarak düşünülebileceği kavramına ve Zadeh (1965)'in genişleme prensibi ile uyumlu bir LP modeli oluşturulmasına dayanmaktadır. LP formülasyonu, bir birim akışın başlangıç düğümünde proje ağına girdiğini ve bitiş düğümünde ayrıldığını varsayımı üzerine oluşturulmuştur. Bilinen kritik yol problemini LP ile formüle edilmiş ve bu klasik CPM-LP modelinden bulanık CPM-LP modeli ile Yager sıralama yöntemi-LP modelleri türetilmiştir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008). Bu bağlamda projenin kritik yolu ve toplam süresinin tespitinde klasik kritik yol yönteminde kullanılan değerler lineer programlama modeli (klasik CPM-LP model) kullanılarak hesaplanacaktır. Bulanık kritik yol ve süre hesaplamalarına, proje faaliyetlerine üçgen bulanık sayılar atanarak başlanacaktır. Üçgen bulanık sayılar, proje için iyimser, kötümser ve muhtemel durumları değerlendirebilmeye imkân vermektedir. Daha sonra üçgen bulanık sayılarla temsil edilen faaliyetler kullanılarak projenin bulanık kritik yolu ve toplam süresi, bulanık CPM-LP modeli kullanılarak hesaplanacaktır. Burada bulanık ve klasik CPM yöntemlerinin anlaşılması, yöntemler arasındaki benzerlikler ve farklılıkların ortaya konulması hedeflenmiştir. Daha sonra Yager sıralama yöntemi, alfa kesim yöntemi ve durulaştırma yöntemlerinden alanların merkezi yöntemlerini içeren önerilmiş iki farklı çözüm algoritması uygulanacaktır. Birinci çözüm algoritması; bulanık CPM-LP modelinden elde edilmiş olan bulanık değerlerin Yager sıralama yöntemi (Yager Ranking Method) kullanarak proje süresi

ve kritik yolunun net değer dönüşümünün yapılmasıdır. İkinci çözüm algoritması; Alfa (α) kesim yöntemi (α -Cutting Method) kullanılarak bulanık proje toplam süresinin ve kritik yolunun hesaplanmasını ve durulaştırma yöntemlerinden Alanların merkezi yöntemi (COA- Center of Area) kullanılarak alfa kesim yönteminden elde edilen bulanık proje toplam süresi ve kritik yolun net değer dönüşümünün yapılmasıdır. Alfa (α) kesim aralık değerleri $\alpha \in [0,1]$ aralığında 0'dan 1'e doğru 0,1 artırımlarla monoton şekilde yapılacaktır. Net değer dönüşümüyle elde edilen proje toplam süresi ve kritik yolunun alfa kesim seviyesi belirlenecektir. Her bir çözüm algoritmasıyla proje toplam süresi ve kritik yolu; ilk olarak bulanık olarak elde edilecek, daha sonra bulanık değerlerin net değer dönüşü yapılacaktır. Böylece proje toplam süresi net bir değer olduğunda ne kadarlık bir süre farkı oluşturduğu ve proje kritik yolundaki değişimin sınanması hedeflenmiştir.

3.1. Proje Tanıtımı

Uygulamanın gerçekleştirildiği proje İstanbul ilinde kurulmuş bir inşaat müteahhitlik şirketinden temin edilmiştir. Sektör içerisinde yeni kurulmuş bir aile firmasıdır. Yaptırdığı projelerini gerçekleştirmekte olan firma, bugüne kadar İstanbul ilinde üç konut projesi hayata geçirmiş ve faaliyetlerine devam etmektedir. Çalışmaya konu olan proje İstanbul ili Avcılar ilçesinde 2017 yılında yapımına başlanmış ve 2018 yılı içerisinde daire teslimleri yapılmış bir konut projesidir. İki bodrum, bir zemin ve bir normal kata sahip konut projesinde katlara çift daire konumlandırılmıştır. Normal katta bulunan daireler dubleks tipi dairelerden oluşmaktadır. Ayrıca yönetmelik gereği ikinci bodrum kat sığınak olarak planlanmıştır.

Proje toplam konut alanı 530,90 m², toplam ortak kullanım alanları 192,10 m², toplam inşaat alanı 723,00 m² dir. Katlarda bulunan daireler, 2. Bodrum kat 103,90 m², 1. Bodrum kat daireleri 68,53 m² ve 59,40 m², zemin kat daireleri 68,53 m² ve 59,47 m², 1. Normal kat daireleri 142,07 m² ve 132,83 m², brüt alanları üzerine projelendirilmiştir.

Projeye ait tüm faaliyetler, faaliyet süreleri ve öncüllük ilişkileri firma yetkilisi tarafından uygulamada yapıldığı şekliyle sunulmuştur. Yapımı tamamlanmış bir proje olmasından dolayı proje tamamlanma süresi bilinen bir projedir. Bu bağlamda çalışmaya konu olan proje, klasik ve bulanık mantık yöntemleri kullanılarak hesaplanan proje tamamlanma süresinin karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır.

Gerçek bir projenin tamamlanma süresinin analiz edilmesi, firmanın yapacağı benzer projeler içinde ön çalışma niteliğinde olacaktır. Böylece firmanın daha doğru bir planlanmayla daha başarılı projeler elde etmesine olanak sağlayacaktır.

Çözümde klasik CPM metodunun anlaşılabilmesi ve bulanık CPM yöntemine uygulanabilmesi açısından ilk olarak klasik CPM çözümü sunulacaktır. Daha sonra Bulanık CPM metotlarıyla çözüm yapılarak sonuçlar bölümünde değerlendirilecektir. Tüm hesaplamalar adım adım belirtilerek iki yöntem arasındaki benzerlik ve farklılıklar ortaya konacaktır.

3.2. Projenin Klasik CPM Yöntemi ile Kritik Yol Tespiti ve Tamamlanma Süresinin Hesaplaması

Klasik kritik yol metodu, proje kritik yol tespiti ve toplam proje süresi hesaplanmasında çok sık karşılaştığımız çözüm yollarından biridir. Metot, başlangıç faaliyetinden bitiş faaliyetine kadar tüm yolların ve bu yollar üzerinde maksimum süreyi veren yolun tespit edilmesine dayanmaktadır. Çözüme ilişkin izlenmiş olan adımlar şöyledir;

1.Adım: Proje faaliyetlerinin belirlenmesi ve faaliyet sürelerinin atanması.

Proje toplam 66 faaliyetten oluşmakta ve faaliyet süreleri klasik CPM metodunun özelliklerinden biri olan determinist (kesin) sürelerle temsil edilmektedir. İlgili süreler proje yapımında harcanan süreleri göstermektedir.

2.Adım: Faaliyetler arası öncüllük ilişkilerinin belirlenmesi.

Adım 1 ve adım 2’de belirtilmiş olan proje faaliyetleri, faaliyetlere ait süreler ve faaliyetler arası öncüllük ilişkileri Ek. A.1’de gösterilmiştir.

3.Adım: Proje ağ diyagramının çizilmesi.

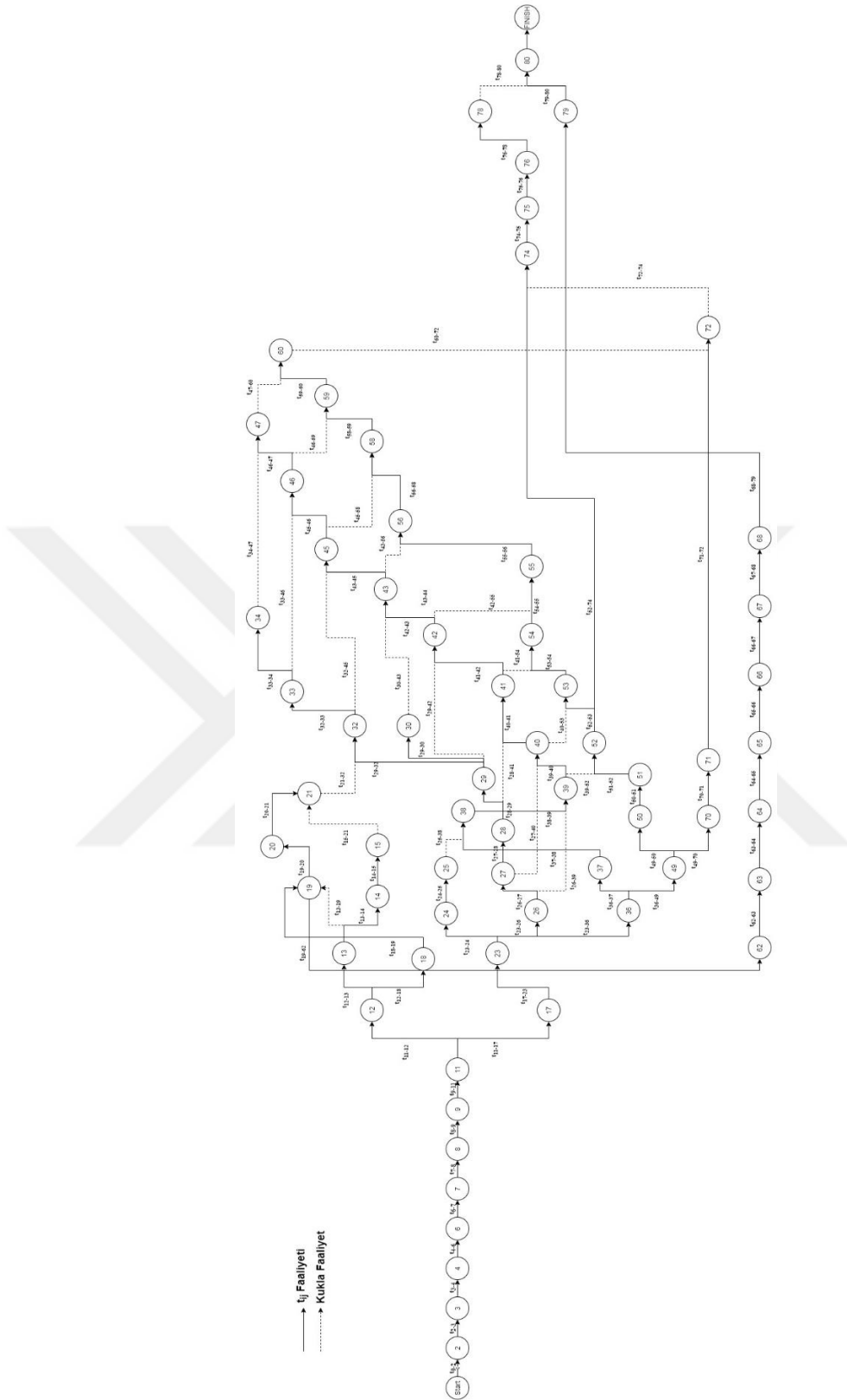
Projenin ilk olarak başlangıç ve bitiş noktası belirlenmiş ve faaliyetlerin öncüllük ilişkileri takip edilerek proje ait şebeke diyagramı çizilmiştir. Proje şebeke çizim yöntemlerinden AOA (Activity on Arrow) yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 3.1’de düğümler arası oklar faaliyet sürelerini temsil etmektedir. Kesik çizgilerle belirtilen oklar ise kukla faaliyetleri göstermektedir. Ağ diyagramı 66 adet düğüm

noktası ve 23 adet kukla faaliyet bulunmaktadır. Diyagram Drawio programıyla görselleştirilmiştir.

Projeye ait şebeke diyagramı çizimde, öncüllük ilişkilerinin doğru kurulması ve faaliyetler arası ilişkilerin takip edilerek diyagramın doğru bir şekilde oluşturulması, bundan sonraki adımlarda yapılacak hesaplamaların doğruluğu için dikkatli olarak uygulanması gereken bir adım niteliğindedir.





Şekil 3.1: Uygulama Projesine ait Şebeke (Ağ) Diyagramı

4.Adım: Proje ait olası yol dizilimlerinin belirlenmesi.

Proje ait yol dizilimleri, başlangıç faaliyetinden başlanarak son faaliyete ulaşıncaya kadar oluşabilecek tüm faaliyet dizilimlerini göstermektedir. Küçük projeler söz konusu olduğunda uygulanması basit olan bu adım, daha karmaşık projeler için zorlayıcı ve zaman alıcı olmaktadır. Bu amaçla geliştirilmiş olan bilgisayar programlarından destek alınabilir.

5.Adım: Alternatif yolların toplam sürelerinin belirlenmesi.

Bu çalışmada lineer program çözücü programlardan destek alınarak proje kritik yolu belirlenmiştir.

6.Adım: Maksimum süreli yolun tespit edilmesi.

Problem çözümüne ilişkin doğrusal programlama modeli;

n adet düğüm noktasına sahip diyagram için $T_{kn} = k_n$. yolun süresini, t_{ij} : ij faaliyet süresini, x_{ij} : ij faaliyetinin karar değişkenini, $\max T_{kn} = D$ proje tamamlanma süresini ifade etmektedir (Model 1).

$$T_{kn} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (n. \text{ yolun toplam süresi}) \quad (3.1)$$

x_{ij} : k_n . yol üzerindeki faaliyetler için 1, diğer faaliyetler için 0 kabul edilir.

Model 1, POM-QM for Windows programı ile çözümlenerek proje kritik yolu ve proje toplam süresi tespit edilmiştir. Model çözümü problemle ilişkin kısıtlar belirlenerek elde edilmiştir. Ek. A.1’de verilmiş olan faaliyet süreleri kullanılarak oluşturulan,

Amaç Fonksiyonu:

$$\begin{aligned} \text{MaxD} = & 2x_{0-2} + x_{2-3} + 30x_{3-4} + 5x_{4-6} + 2x_{6-7} + x_{7-8} + 2x_{8-9} + 5x_{9-11} + 4x_{11-12} + 5x_{12-13} + \\ & 2x_{13-14} + x_{14-15} + 10x_{11-17} + 9x_{12-18} + 10x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5x_{20-21} + 20x_{17-23} + 15x_{23-24} \\ & + 24x_{24-25} + 10x_{23-26} + 33x_{26-27} + 10x_{27-28} + 3x_{28-29} + 18x_{29-30} + 10x_{29-32} + 5x_{32-33} + \\ & 15x_{33-34} + 20x_{23-36} + 15x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10x_{38-39} + 33x_{39-40} + 10x_{40-41} + 3x_{41-42} + \\ & 18x_{42-43} + 10x_{43-45} + 5x_{45-46} + 15x_{46-47} + 9x_{36-49} + 9x_{49-50} + 30x_{50-51} + 13x_{51-52} + 42x_{52-53} \\ & + 13x_{53-54} + 6x_{54-55} + 27x_{55-56} + 13x_{56-58} + 8x_{58-59} + 18x_{59-60} + 20x_{19-62} + 20x_{62-63} \\ & + 65x_{63-64} + 20x_{64-65} + 10x_{65-66} + 15x_{66-67} + 35x_{67-68} + 15x_{49-70} + 20x_{70-71} + 10x_{71-72} \\ & + 15x_{52-74} + 15x_{74-75} + 10x_{75-76} + 10x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80} \end{aligned}$$

Projeye ait kısıtlar Model alt kısıt koşullarının (Şekil 3.1) şebeke diyagramına uygulanmasıyla elde edilmiştir. Projeye ait şebeke diyagramı değişim göstermeyeceğinden her üç model (Model 1, Model 2 ve Model 3) için kısıt koşulları aşağıdaki gibi olmaktadır.

Kısıtlar;

$$\begin{aligned}
&X_{79-80} + X_{78-80} = 1 \\
&X_{68-79} - X_{79-80} = 0 \\
&X_{76-78} - X_{78-80} = 0 \\
&X_{75-76} - X_{76-78} = 0 \\
&X_{74-75} - X_{75-76} = 0 \\
&X_{52-74} + X_{72-74} - X_{74-75} = 0 \\
&X_{71-72} + X_{60-72} - X_{72-74} = 0 \\
&X_{70-71} - X_{71-72} = 0 \\
&X_{49-70} - X_{70-71} = 0 \\
&X_{67-68} - X_{68-79} = 0 \\
&X_{66-67} - X_{67-68} = 0 \\
&X_{65-66} - X_{66-67} = 0 \\
&X_{64-65} - X_{65-66} = 0 \\
&X_{63-64} - X_{64-65} = 0 \\
&X_{62-63} - X_{63-64} = 0 \\
&X_{19-62} - X_{62-63} = 0 \\
&X_{59-60} + X_{47-60} - X_{60-72} = 0 \\
&X_{58-59} + X_{46-59} - X_{59-60} = 0 \\
&X_{56-58} + X_{45-58} - X_{58-59} = 0 \\
&X_{55-56} + X_{43-56} - X_{56-58} = 0 \\
&X_{54-55} + X_{42-55} - X_{55-56} = 0 \\
&X_{53-54} + X_{41-54} - X_{54-55} = 0 \\
&X_{52-53} + X_{40-53} - X_{53-54} = 0 \\
&X_{51-52} + X_{39-52} - X_{52-53} - X_{52-74} = 0 \\
&X_{50-51} - X_{51-52} = 0 \\
&X_{49-50} - X_{50-51} = 0 \\
&X_{36-49} - X_{49-50} - X_{49-70} = 0 \\
&X_{46-47} + X_{34-47} - X_{47-60} = 0 \\
&X_{45-46} + X_{33-46} - X_{46-47} - X_{46-59} = 0 \\
&X_{43-45} + X_{32-45} - X_{45-46} - X_{45-58} = 0 \\
&X_{42-43} + X_{30-43} - X_{43-45} - X_{43-56} = 0 \\
&X_{41-42} + X_{29-42} - X_{42-43} - X_{42-55} = 0 \\
&X_{40-41} + X_{28-41} - X_{41-42} - X_{41-54} = 0 \\
&X_{39-40} + X_{27-40} - X_{40-41} - X_{40-53} = 0 \\
&X_{38-39} + X_{26-39} - X_{39-40} - X_{39-52} = 0 \\
&X_{37-38} + X_{25-38} - X_{38-39} = 0 \\
&X_{36-37} - X_{37-38} = 0 \\
&X_{23-36} - X_{36-37} - X_{36-49} = 0 \\
&X_{33-34} - X_{34-47} = 0 \\
&X_{32-33} - X_{33-34} - X_{33-46} = 0 \\
&X_{29-32} + X_{21-32} - X_{32-33} - X_{32-45} = 0 \\
&X_{29-30} - X_{30-43} = 0 \\
&X_{28-29} - X_{29-30} - X_{29-32} - X_{29-42} = 0 \\
&X_{27-28} - X_{28-29} - X_{28-41} = 0 \\
&X_{26-27} - X_{27-28} - X_{27-40} = 0 \\
&X_{23-26} - X_{26-27} - X_{26-39} = 0 \\
&X_{24-25} - X_{25-38} = 0 \\
&X_{23-24} - X_{24-25} = 0 \\
&X_{17-23} - X_{23-24} - X_{23-26} - X_{23-36} = 0 \\
&X_{15-21} + X_{20-21} - X_{21-32} = 0 \\
&X_{19-20} - X_{20-21} = 0 \\
&X_{13-19} + X_{18-19} - X_{19-20} = 0 \\
&X_{12-18} - X_{18-19} = 0 \\
&X_{11-17} - X_{17-23} = 0 \\
&X_{14-15} - X_{15-21} = 0 \\
&X_{13-14} - X_{14-15} = 0 \\
&X_{12-13} - X_{13-14} - X_{13-19} = 0 \\
&X_{11-12} - X_{12-13} - X_{12-18} = 0 \\
&X_{9-11} - X_{11-12} - X_{11-17} = 0 \\
&X_{8-9} - X_{9-11} = 0 \\
&X_{7-8} - X_{8-9} = 0 \\
&X_{6-7} - X_{7-8} = 0 \\
&X_{4-6} - X_{6-7} = 0 \\
&X_{3-4} - X_{4-6} = 0 \\
&X_{2-3} - X_{3-4} = 0 \\
&X_{0-2} - X_{2-3} = 0 \\
&X_{0-2} = 1
\end{aligned}$$

Belirlenmiş olan kısıtların POM-QM programına girişi yapılmıştır. Tüm veri girişleri Lineer programlama modeli üzerinden girilmiş ve model çalıştırılmıştır.

Probleme ilişkin, maksimum süreli yol: 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80, toplam proje süresi ise 321 gün olarak bulunmuştur. Belirlenmiş olan kısıtlar Şekil 3.1'de verilmiş olan ağ diyagramı kullanılarak elde edilmiştir. Projeye ait ağ diyagramı değişim göstermedikçe, uygulanacak kısıtlarda değişim göstermemektedir. Dolayısıyla uygulama adımlarında kullanılacak kısıtlamalar aynı olacaktır.

3.3. Projenin Bulanık CPM Yöntemi ile Kritik Yol Tespiti ve Tamamlanma Süresinin Hesaplaması

Bulanık kritik yol yönteminde proje faaliyet süreleri deterministik sayılarla temsil edilmezler (Durucasu vd., 2015). Çalışmada incelenmiş olan inşaat projesinin sahibi olan firmanın müteahhitlik işleri yapmakta olan bir firma olduğundan bahsedilmiştir. Bu sebeple uygulamaya konu olan proje daha çok ustabaşı, usta, inşaat işçileri gibi personellerle yürütülmüştür. Bu gibi durumlar küçük olarak nitelendirebildiğimiz inşaat projelerinin, planlama evrelerinde daha basit olarak görülen planlama yöntemlerinin kullanılmasına öyle ki bazı projeler için planlanma sürecinin dikkate alınmamasına sebep olmaktadır. Bu doğrultuda faaliyet sürelerinin net değerlerle ifade edilememesi durumuyla karşılaşılmaktadır. İncelemiş olduğumuz inşaat projesi içinde benzer durumların geçerli olduğu, proje sahibiyle yapılmış olan görüşmelerde rastlanmıştır.

Projenin toplam süresi ve kritik yolunun bulunmasına ilişkin iki farklı çözüm algoritması sunulmuş. Önerilen algoritmalar proje süresi ve kritik yolunun ilk olarak bulanıklaştırılmasını daha sonra elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümünün yapılmasını içermektedir. Çözüm algoritmaları şöyledir;

1. Bulanık Çözüm Algoritması

- Bulanık FCPM ile bulanık proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi
- Yager sıralama yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

2. Bulanık Çözüm Algoritması

- Alfa (α) kesim yöntemiyle bulanık proje sürelerinin ve kritik yolunun tespit edilmesi

-Alanların merkezi yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

Çözümlemelere ilişkin izlenmiş olan adımlar şöyledir;

1.Adım: Proje faaliyetlerinin belirlenmesi ve faaliyetlere üçgen bulanık sürelerinin atanması.

Projeye ait faaliyetler bölüm 3.2, 1.Adımda verildiği şekildedir. Optimal çözümde proje için üçgen bulanık sürelerin kullanılmasına karar verilmiştir ve faaliyet süreleri üçgen bulanık sayılarla ifade edilmiştir. Süreler en iyi, muhtemel ve en kötü durumları tanımlayacak şekilde proje yöneticisinin geçmiş deneyimlerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Faaliyetlere atanan süreler bulanık süreler olarak kabul edilmiştir ve ayrıca bulanıklaştırma işlemi yapılmamıştır. Klasik CPM yönteminde kullanılan faaliyet süreleri, muhtemel süreleri temsil etmektedir. Faaliyetlere ilişkin en iyi, muhtemel ve en kötü faaliyet süreleri Ek B.1’de verilmiştir.

2.Adım: Faaliyetler arası öncüllük ilişkilerinin belirlenmesi.

Klasik CPM yönteminde belirlenmiş olan öncüllük ilişkileri bulanık mantık bağlamında da aynı şekliyle kabul edilmiştir. t_{ij} : i ile j faaliyetleri arasındaki sürelerin temsili için kullanılmıştır.

3.Adım: Proje ağ diyagramının çizilmesi.

Klasik yöntemle oluşturulmuş olan şebeke diyagramı bu adım içinde geçerliliğini korumaktadır. Şekil 3.1’de verilmiş olan şebeke diyagramı aynı şekilde işleme alınarak hesaplamalara devam edilmiştir.

4.Adım: Projeye ait maksimum süreli yolun belirlenmesi.

Bulanık sürelerle proje kritik yolunun tespiti ve proje süresinin hesaplanmasında önerilen çözüm algoritmaları kullanılarak hesaplamalara devam edilecektir. Birinci çözüm algoritması; 4.a. adımda üçgen bulanık süreler kullanılarak bulanık çıkarım kümesi elde edilmiş ve 4.b. adım ile Yager sıralama yöntemi kullanılarak 4.a. adımda elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümleri yapılmıştır. İkinci çözüm algoritması; 4.c. adımda Alfa kesim yöntemi ile hesaplamalar yapılarak bulanık çıkarım kümesi elde edilmiş ve 4.d. adım ile durulaştırma metotlarından, alanların merkezi yöntemi kullanılarak 4.c. adımında elde edilmiş bulanık sonuçların net değer

dönüşümü yapılarak net değerin alfa kesim aralığı belirlenmiştir. Önerilen iki farklı çözüm algoritması kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

3.3.1. Birinci Çözüm Algoritması

Proje ait faaliyet süreleri 1. Adımda bahsedildiği gibi üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir. Faaliyetlere ilişkin en iyi, muhtemel ve en kötü faaliyet süreleri Ek B.1’de verilmiştir. Daha sonra 2. Adımda bahsedildiği gibi öncüllük ilişkileri kurulmuş ve 3. Adım ile projeye ait şebeke diyagramı (Şekil 3.1) çizilmiştir. Hesaplama adımlarına aşağıda belirtildiği gibi devam edilmiştir.

3.3.1.1. 4.a. Birinci Çözüm Algoritmasının Bulanık Sürelerle (FCPM) Hesaplanması

$\bar{A} = (a, m, b)$ üçgen bulanık sayılar kümesi olmak üzere, her faaliyet için $\bar{T}_{k_n}$, k_n . yolun süresini, k_n tane olası yola sahip bir ağ diyagramı için proje kritik yolu ve proje tamamlanma süresi $\max \bar{T}_{k_n} = \bar{D}$ olmaktadır. Problem çözümüne ilişkin doğrusal programlama modeli Model 2’de verildiği gibidir.

$$\bar{T}_{k_n} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij} \quad (n. \text{ yolun toplam süresi}) \quad (3.2)$$

Model 2, POM-QM for Windows programına yazılarak en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık faaliyet süreleri için proje kritik yolu ve süresi elde edilmiştir. Tablo 3.1’de görüldüğü gibi projeye ait tek bir kritik yol tespit edilmiştir. Değerlendirmeye alınan üç tip süre için proje toplam süresi değişim göstermiştir. Klasik metot için uygulanmış olan model kısıtları aynı şekilde POM-QM programında çalıştırılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Sırasıyla en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık sürelerle ait amaç fonksiyonları aşağıda verildiği gibidir;

$$\begin{aligned} \text{Max } \bar{D}_{(\text{en iyi})} = & 1.5x_{0-2} + x_{2-3} + 20x_{3-4} + 3x_{4-6} + x_{6-7} + x_{7-8} + x_{8-9} + 3x_{9-11} + 3x_{11-12} + 4x_{12-13} \\ & + x_{13-14} + x_{14-15} + 6x_{11-17} + 7x_{12-18} + 7x_{18-19} + 7x_{19-20} + 3x_{20-21} + 15x_{17-23} + 12x_{23-24} \\ & + 16x_{24-25} + 7x_{23-26} + 26x_{26-27} + 8x_{27-28} + x_{28-29} + 11x_{29-30} + 7x_{29-32} + 3x_{32-33} + 11x_{33-} \end{aligned}$$

$$34 + 15x_{23-36} + 12x_{36-37} + 16x_{37-38} + 7x_{38-39} + 26x_{39-40} + 8x_{40-41} + x_{41-42} + 14x_{42-43} + 4x_{43-45} + 3x_{45-46} + 11x_{46-47} + 21x_{36-49} + 15x_{49-50} + 22x_{50-51} + 10x_{51-52} + 35x_{52-53} + 11x_{53-54} + 4x_{54-55} + 20x_{55-56} + 10x_{56-58} + 6x_{58-59} + 14x_{59-60} + 19x_{19-62} + 18x_{62-63} + 57x_{63-64} + 17x_{64-65} + 7x_{65-66} + 13x_{66-67} + 31x_{67-68} + 12x_{49-70} + 17x_{70-71} + 8x_{71-72} + 13x_{52-74} + 12x_{74-75} + 8x_{75-76} + 8x_{76-78} + 11x_{68-79} + 23x_{79-80}$$

$$\text{Max } \bar{D} \text{ (muhtemel)} = 2x_{0-2} + x_{2-3} + 30x_{3-4} + 5x_{4-6} + 2x_{6-7} + x_{7-8} + 2x_{8-9} + 5x_{9-11} + 4x_{11-12} + 5x_{12-13} + 2x_{13-14} + x_{14-15} + 10x_{11-17} + 9x_{12-18} + 10x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5x_{20-21} + 20x_{17-23} + 15x_{23-24} + 24x_{24-25} + 10x_{23-26} + 33x_{26-27} + 10x_{27-28} + 3x_{28-29} + 18x_{29-30} + 10x_{29-32} + 5x_{32-33} + 15x_{33-34} + 20x_{23-36} + 15x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10x_{38-39} + 33x_{39-40} + 10x_{40-41} + 3x_{41-42} + 18x_{42-43} + 10x_{43-45} + 5x_{45-46} + 15x_{46-47} + 9x_{36-49} + 9x_{49-50} + 30x_{50-51} + 13x_{51-52} + 42x_{52-53} + 13x_{53-54} + 6x_{54-55} + 27x_{55-56} + 13x_{56-58} + 8x_{58-59} + 18x_{59-60} + 20x_{19-62} + 20x_{62-63} + 65x_{63-64} + 20x_{64-65} + 10x_{65-66} + 15x_{66-67} + 35x_{67-68} + 15x_{49-70} + 20x_{70-71} + 10x_{71-72} + 15x_{52-74} + 15x_{74-75} + 10x_{75-76} + 10x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80}$$

$$\text{Max } \bar{D} \text{ (en kötü)} = 4x_{0-2} + 2x_{2-3} + 45x_{3-4} + 8x_{4-6} + 4x_{6-7} + 2x_{7-8} + 3x_{8-9} + 9x_{9-11} + 7x_{11-12} + 11x_{12-13} + 4x_{13-14} + 3x_{14-15} + 19x_{11-17} + 13x_{12-18} + 18x_{18-19} + 5x_{19-20} + 8x_{20-21} + 28x_{17-23} + 20x_{23-24} + 32x_{24-25} + 15x_{23-26} + 45x_{26-27} + 15x_{27-28} + 5x_{28-29} + 29x_{29-30} + 15x_{29-32} + 9x_{32-33} + 18x_{33-34} + 28x_{23-36} + 20x_{36-37} + 32x_{37-38} + 15x_{38-39} + 45x_{39-40} + 15x_{40-41} + 5x_{41-42} + 32x_{42-43} + 12x_{43-45} + 9x_{45-46} + 18x_{46-47} + 34x_{36-49} + 23x_{49-50} + 38x_{50-51} + 18x_{51-52} + 54x_{52-53} + 18x_{53-54} + 8x_{54-55} + 38x_{55-56} + 18x_{56-58} + 12x_{58-59} + 21x_{59-60} + 32x_{19-62} + 24x_{62-63} + 75x_{63-64} + 24x_{64-65} + 15x_{65-66} + 20x_{66-67} + 41x_{67-68} + 19x_{49-70} + 24x_{70-71} + 15x_{71-72} + 19x_{52-74} + 19x_{74-75} + 14x_{75-76} + 13x_{76-78} + 15x_{68-79} + 29x_{79-80}$$

Tablo 3.1: Bulanık CPM-LP Model Çözümleri

	Proje Süresi	Proje Kritik Yol
En İyi Sürelerle	263,5 gün	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
Muhtemel Sürelerle	321 gün	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
En Kötü Sürelerle	480 gün	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80

Bu adımda yapılmış olan hesaplamalarda üyelik dereceleri işleme katılmamıştır. Aslında klasik CPM yöntemiyle bulanık süreler kullanılmıştır. Bu durum, yöntemi bulanıklaştırmış ve FCPM yaklaşımına giriş yapılmıştır. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi bulanık sistemlerde giriş değerlerinin bulanık olması, çıkış değerlerinin de bulanık olmasını sağlamıştır. Sonuç olarak yapılan hesaplamalarda faaliyetler için söz konusu

olabilecek durum farklılıkları, proje toplam süresinde değişime sebep olmaktadır. Bulanık sayılarla yapılan hesaplamalar proje toplam süresinin (263,5 321, 480 gün) arasında değişim gösterebilecek durumların dikkate alınabilmesine imkân vermektedir. Lineer problem çözücü programlar ise bu karmaşık yapıli problemlerde belirlediğimiz kısıtlar altında çözüme daha hızlı ulaşılmasını sağlamaktadır.

3.3.1.2. 4.b. Birinci Çözüm Algoritmasının Yager Sıralama Yöntemiyle Hesaplanması

Yager sıralama metodu, üyelik derecelerinin bilinmediğini durumlarda kullanılabilir olmasından dolayı literatürde çok sık tercih edilen hesaplama yöntemlerindendir (Atlı ve Kahraman, 2013). 4.a. adımda bulanık sürelerle yapılmış olan hesaplamalarda faaliyetlere ait üyelik dereceleri bilinemediği için Yager sıralama yöntemiyle net değer dönüşümü yapılmıştır. Hesaplamalara, faaliyetlerin sıralama endekslerinin bulunmasıyla başlanmıştır.

$\bar{A} = (a, m, b)$ üçgen bulanık sayılar kümesi olmak üzere, her faaliyet için sıralama endeksi (3.3) formülüyle hesaplanır (Atlı ve Kahraman, 2013).

$$I(\bar{T}_{ij}) = \frac{a + m + b}{3} \quad (3.3)$$

$\bar{T}_{ij}$: ij faaliyetinin bulanık süresini, x_{ij} : ij faaliyetinin karar değişkenini ifade etmektedir.

Çözümde, Microsoft Excel programı kullanılarak faaliyetlere ait $I(\bar{T}_{ij})$ değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.2). Daha sonra Model 3 kullanılarak POM-QM for Windows programına kısıtlar ve $I(\bar{T}_{ij})$ değerleri girilerek modelin lineer programla model çözümü yapılmıştır. Yönteme bulanık sürelerin net değer dönüşümlerini sağlamak için başvurulmuştur. Yöntem, alfa kesim seviyelerinden elde edilmiş olan yeni faaliyet süreleri içinde uygulanabilmektedir.

Tablo 3.2: Proje Faaliyetleri Sıralama Endeksleri

FCCPM-FAALİYET ORTALAMA SÜRELERİ TABLOSU					
t_{ij}	Faaliyet No	I($\bar{T}_{ij}$)/gün	t_{ij}	Faaliyet No	I($\bar{T}_{ij}$)/gün
t ₀₋₂	2	2,50	t ₄₀₋₄₁	41	11,00
t ₂₋₃	3	1,33	t ₄₁₋₄₂	42	3,00
t ₃₋₄	4	31,67	t ₄₂₋₄₃	43	21,33
t ₄₋₆	6	5,33	t ₄₃₋₄₅	45	8,67
t ₆₋₇	7	2,33	t ₄₅₋₄₆	46	5,67
t ₇₋₈	8	1,33	t ₄₆₋₄₇	47	14,67
t ₈₋₉	9	2,00	t ₃₆₋₄₉	49	21,33
t ₉₋₁₁	11	5,67	t ₄₉₋₅₀	50	15,67
t ₁₁₋₁₂	12	4,67	t ₅₀₋₅₁	51	30,00
t ₁₂₋₁₃	13	6,67	t ₅₁₋₅₂	52	13,67
t ₁₃₋₁₄	14	2,33	t ₅₂₋₅₃	53	43,67
t ₁₄₋₁₅	15	1,67	t ₅₃₋₅₄	54	14,00
t ₁₁₋₁₇	17	11,67	t ₅₄₋₅₅	55	6,00
t ₁₂₋₁₈	18	9,67	t ₅₅₋₅₆	56	28,33
t ₁₈₋₁₉	19	11,67	t ₅₆₋₅₈	58	13,67
t ₁₉₋₂₀	20	3,00	t ₅₈₋₅₉	59	8,67
t ₂₀₋₂₁	21	5,33	t ₅₉₋₆₀	60	17,67
t ₁₇₋₂₃	23	21,00	t ₁₉₋₆₂	62	23,67
t ₂₃₋₂₄	24	15,67	t ₆₂₋₆₃	63	20,67
t ₂₄₋₂₅	25	24,00	t ₆₃₋₆₄	64	65,67
t ₂₃₋₂₆	26	10,67	t ₆₄₋₆₅	65	20,33
t ₂₆₋₂₇	27	34,67	t ₆₅₋₆₆	66	10,67
t ₂₇₋₂₈	28	11,00	t ₆₆₋₆₇	67	16,00
t ₂₈₋₂₉	29	3,00	t ₆₇₋₆₈	68	35,67
t ₂₉₋₃₀	30	19,33	t ₄₉₋₇₀	70	15,33
t ₂₉₋₃₂	32	10,67	t ₇₀₋₇₁	71	20,33
t ₃₂₋₃₃	33	5,67	t ₇₁₋₇₂	72	11,00
t ₃₃₋₃₄	34	14,67	t ₅₂₋₇₄	74	15,67
t ₂₃₋₃₆	36	21,00	t ₇₄₋₇₅	75	15,33
t ₃₆₋₃₇	37	15,67	t ₇₅₋₇₆	76	10,67
t ₃₇₋₃₈	38	24,00	t ₇₆₋₇₈	78	10,33
t ₃₈₋₃₉	39	10,67	t ₆₈₋₇₉	79	13,00
t ₃₉₋₄₀	40	34,67	t ₇₉₋₈₀	80	26,00
Kukla Faaliyetler					
t ₁₃₋₁₉	0	t ₃₀₋₄₃	0	t ₄₃₋₅₆	0
t ₁₅₋₂₁	0	t ₃₂₋₄₅	0	t ₄₅₋₅₈	0
t ₂₁₋₃₂	0	t ₃₃₋₄₆	0	t ₄₆₋₅₉	0
t ₂₅₋₃₈	0	t ₃₄₋₄₇	0	t ₄₇₋₆₀	0
t ₂₆₋₃₉	0	t ₃₉₋₅₂	0	t ₆₀₋₇₂	0
t ₂₇₋₄₀	0	t ₄₀₋₅₃	0	t ₇₂₋₇₄	0
t ₂₈₋₄₁	0	t ₄₁₋₅₄	0	t ₇₈₋₈₀	0
t ₂₉₋₄₂	0	t ₄₂₋₅₅	0		

Amaç fonksiyonu:

$$\begin{aligned} \text{Max}I(\bar{D}^*) = & 2.5x_{0-2} + 1.33x_{2-3} + 31.67x_{3-4} + 5.33x_{4-6} + 2.33x_{6-7} + 1.33x_{7-8} + 2x_{8-9} + \\ & 5.67x_{9-11} + 4.67x_{11-12} + 6.67x_{12-13} + 2.33x_{13-14} + 1.67x_{14-15} + 11.67x_{11-17} + 9.67x_{12-18} + \\ & 11.67x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5.33x_{20-21} + 21x_{17-23} + 15.67x_{23-24} + 24x_{24-25} + 10.67x_{23-26} + \\ & 34.67x_{26-27} + 11x_{27-28} + 3x_{28-29} + 19.33x_{29-30} + 10.67x_{29-32} + 5.67x_{32-33} + 14.67x_{33-34} + \\ & 21x_{23-36} + 15.67x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10.67x_{38-39} + 34.67x_{39-40} + 11x_{40-41} + 3x_{41-42} + \\ & 21.33x_{42-43} + 8.67x_{43-45} + 5.67x_{45-46} + 14.67x_{46-47} + 21.33x_{36-49} + 15.67x_{49-50} + 30x_{50-51} + \\ & 13.67x_{51-52} + 43.67x_{52-53} + 14x_{53-54} + 6x_{54-55} + 28.33x_{55-56} + 13.67x_{56-58} + 8.67x_{58-59} + \\ & 17.67x_{59-60} + 23.67x_{19-62} + 20.67x_{62-63} + 65.67x_{63-64} + 20.33x_{64-65} + 10.67x_{65-66} + 16x_{66-67} + \\ & 35.67x_{67-68} + 15.33x_{49-70} + 20.33x_{70-71} + 11x_{71-72} + 15.67x_{52-74} + 15.33x_{74-75} + \\ & 10.67x_{75-76} + 10.33x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80} \end{aligned}$$

$$\text{Max}I(\bar{D}^*) = 354,84 \approx 355 \text{ gün}$$

Maksimum süreli yol: 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak Yager sıralama yöntemiyle net sayı dönüşümü yapılan bulanık çıkarım kümesi (263.5,321,480 gün) için net proje toplam süresinin (355 gün) muhtemel ve en kötü süre aralığında kaldığı görülmektedir (Tablo 3.1). Proje kritik yolu ise bulanık CPM ile Yager sıralama yöntemleri için 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olarak tespit edilmiş ve değişim göstermediği gözlemlenmiştir.

Önerilen birinci bulanık çözüm algoritması sonuçları incelendiğinde bulanık CPM ile elde edilmiş olan bulanık çıkarım kümesi proje süresine ait minimum ve maksimum değer aralığının elde edilmesine imkân vermiştir. Böylece bulanıklığın korunması kötümser durumdan iyimser duruma kadar tüm durumların proje yönetimde değerlendirmeye alınabilmesini sağladığı ve olası bir değişim durumunun veya gecikmenin proje içerisindeki durumunu gösterebilmektedir. Böylece yeni yönetim planları için daha fazla bilgi sağlamaktadır.

Proje için diğer bir yorumlama faaliyetlerin üyelik sınıflarının belirlenmesi üzerine yapılabilir. Bu konuda alternatif teknikler olmasına karşın çoğunlukla geçmiş deneyimlerden yararlanılarak karar vericinin tercihinin ihtiyacı duyulmaktadır. Bu bağlamda Yager sıralama yöntemi faaliyetlerin projeye olan üyeliğinin bilinmediği durumlar için uygulanabilir bir yöntem olduğu söylenebilir. Fakat proje toplam süresi ve kritik yolu için net sonuçlardan bahsediyor oluşu yönetsel süreçte bilgi kayıplarına neden olabilir.

3.3.2. İkinci Çözüm Algoritması

İkinci çözüm algoritması içinde, 1. Adım, 2. Adım ve 3. Adım aynı şekilde kabul edilerek işlemlere devam edilmiştir. Hesaplama adımlarına aşağıda belirtildiği gibi devam edilmiştir.

3.3.2.1. 4.c. İkinci Çözüm Algoritmasının Alfa Kesim Yöntemiyle Hesaplanması

Alfa kesim yöntemi kullanılarak; net olmayan süreler 0 ile 1 arasında farklı seviyelerde güven aralıklarında temsil edilebilir. T_{ij} 'nin bulanık bir küme yerine net bir küme olduğunu unutmayın (Chen, 2006). 0,1 artırımlarla [0 1] arası değerler için tüm alfa kesim faaliyet süreleri (Ek C.1) hesaplanmıştır. Probleme ait doğrusal programla modeli aşağıda verilmiştir.

$\bar{A} = (a, m, b)$ üçgen bulanık sayılar kümesi olmak üzere,

(2.17) formülü kullanılarak bulanık faaliyet sürelerinin alfa kesim değerleri hesaplanmıştır. Bulanık sayılar konvekslik özelliğine sahip sayılardır (Zadeh, 1965). Alfa kesim bulanık süreleri, $1 = (m - a)\alpha + a$ ve $2 = (m - b)\alpha + b$ formülleriyle temsil edilmektedir. [0 1] aralığında alfaya 0,1 artırımlarla verilen kesim aralık değerleri için 1 değerleri sürekli artarken 2 değerleri sürekli azalandır. Bu durum bulanık sayıların konvekslik özelliğini kanıtlamış olmaktadır.

$$\bar{T}_{ij\alpha} = \frac{\bar{T}_{ij(1)}^{\alpha} + \bar{T}_{ij(2)}^{\alpha}}{2} \quad (3.4)$$

Alfa kesim net süreleri, alfa kesim aralık değerlerinin ortalaması (3.4) alınarak hesaplanmıştır. Ortalama değerler daha genel sonuçlar elde etmemizi sağlamıştır. Faaliyetlere ait ortalama alfa kesim değerleri Ek C.1'de verilmiştir. Ortalama alfa kesim faaliyet süreleri POM-QM for Windows programında proje yönetimi (CPM/PERT) modülü kullanılarak her bir kesim seviyesi için proje süresi ve proje kritik yolu hesaplanmıştır. Alfa kesim metodu kullanılarak her bir kesim seviyesi için elde edilen proje tamamlanma süresi ve proje kritik yolu Tablo 3.3'de listelenmiştir.

Tablo 3.3: Alfa Kesim Yöntemi Hesaplamaları

α	Proje Süresi /gün	Proje Kritik yolu
0	374,75	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,1	366,68	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,2	361,60	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,3	356,53	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,4	351,45	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,5	346,38	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,6	341,30	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,7	336,23	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,8	331,10	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
0,9	326,08	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80
1	321,00	0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80

Model çözüm değerlerine bakıldığında [0 1] aralığında alfanın her 0.1 artırımında maksimum sürenin lineer olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca uygulama projemizde alfa kesim aralıkları için kritik yol değişim göstermemiştir. Bu durumlar her örnek vaka için değişkenlik gösterebilir. Her zaman aynı sonuçların elde edilmesi beklenemez. Çözümde, alfa kesim seviyelerindeki artırım oranları değiştirilerek daha hassas sonuçlar elde edilebilir.

3.3.2.2. 4.d. Adımı: İkinci Çözüm Algoritmasının Alanların Merkezi (Durulaştırma) Yöntemiyle Hesaplanması

n düğümlü bir şebeke diyagramında alanlar merkezi (ağırlık ortalaması) yöntemi kullanılarak proje tamamlanma süresi formül (2.10) kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3.4). Yöntem seçimi işlem kolaylığı yönünden tercih edilmiş olup, Bölüm 2 anlatılan diğer yöntemlerde kullanılabilir. Yöntem seçimi karar vericinin tercihinine göre değişebilmektedir. 4.c. adımda elde edilmiş, olasılık dereceleri (üyelik dereceleri) atanmış olan bulanık değerlerin net değer dönüşümleri Alanların merkezi yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 3.4: Alanların Merkezi (Durulaştırma) Yöntemi Hesaplamaları

$\mu_{T_{ij}}$	Proje Çıkış Süreleri /gün	$T_{ij}^* = \frac{\sum \mu_{T_{ij}}(t_{ij})T_{ij}}{\sum \mu_{T_{ij}}(t_{ij})}$
0	374,75	336,22 $\approx$ 336 gün
0,1	366,68	
0,2	361,60	
0,3	356,53	
0,4	351,45	
0,5	346,38	
0,6	341,30	
0,7	336,23	
0,8	331,10	
0,9	326,08	
1	321,00	

Tablo 3.4 ile verilmiş sonuçlar, net proje süresinin 336,22 $\approx$ 336 gün olduğunu ve bu değer alfa kesim aralıklarından $\alpha=0.70-0.80$ arasında kaldığını göstermektedir. Proje kritik yolu ise 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak alfa kesim yöntemiyle $\alpha \in [0,1]$ aralığında 0,1 artırımla yapılan çözümleme değerleri, α 0'dan 1'e doğru artarak ilerletilirken proje süresinin de azaldığı ve proje kritik yolunun değişmediği görülmektedir (Tablo 3.3). Net sayı dönüşümü yapılan bulanık çıkarım kümesi (Tablo 3.3) için net proje toplam süresi $\alpha=0.7-0.8$ aralığında kaldığını yani bu net sürenin %70-80 oranında projeye üyeliğinin olduğunu göstermiştir (Tablo 3.4). Proje kritik yolu 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 yolu olarak elde edilmiş ve değişim göstermemiştir.

Önerilen ikinci bulanık çözüm algoritması sonuçları incelendiğinde, alfa (α) kesim yöntemi üyelik değerlerinin karar verici tarafından atanmasına imkân vererek proje süresi ve kritik yolu için olasılıksal bir yaklaşım önermektedir. Alfa (α) kesim yöntemi, bulanıklığı koruyarak atanan her bir kesim seviyesinde projenin toplam süresi ile kritik yolunun durumunu açık olarak gösterebilen bir yöntemdir. Bu durumun yönetim sürecine daha fazla bilgi sağlayabilir olduğu düşünülmektedir. Alanların merkezi yöntemi durulaştırma yöntemlerinden biridir ve hesaplama formülünde görüldüğü gibi üyeliklerin (μ) bilinmesini gerektirmektedir. Üyelik dereceleri atanmış olan bulanık proje sürelerinin net değer dönüşümlerinde alternatif bir teknik olarak başarıyla uygulanmıştır. Her iki çözüm algoritması proje başarıyla uygulanmıştır ve tüm sonuçlar Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.5: Hesaplama Sonuçları

Klasik Çözüm Algoritması	1. Bulanık Çözüm Algoritması				2. Bulanık Çözüm Algoritması		
Klasik CPM-LP model /gün	Bulanık CPM-LP model / gün			Yager Sıralama Yöntemi- LP model /gün	Alfa Kesim Yöntemi /gün		Durulaştırma- Alanların Merkezi Yöntemi /gün
	En İyi Süre	En muhtemel Süre	En Kötü Süre		α	Proje Süresi	
321	263,5	321	480	354,84≈355	0	374,75	336,2≈336
					0,1	366,68	
					0,2	361,60	
					0,3	356,53	
					0,4	351,45	
					0,5	346,38	
					0,6	341,30	
					0,7	336,23	
					0,8	331,10	
					0,9	326,08	
					1	321,00	

Çalışma kapsamında incelenmiş olan Chen (2006), Chen ve Hsueh (2008) ve Durucasu vd. (2015) çalışmalarında kullanılmış yöntemlerin literatürde yaygın bir kullanıma sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda çözümlemeler bulanık değerlerin elde edilmesi ve net dönüşüm ile bulanık sonuçların desteklenmesi temeli üzerine kurulduğu tespit edilmişti. Bu bağlamda çalışmada oluşturulmuş olan bulanık çözüm algoritmaları bahsedilmiş olan çalışmalardan farklı olarak proje süre ile kritik yolun bulunması probleminde ilk olarak bulanık sonuçların elde edilmesi daha sonra net değerler sonuçlarının elde edilmesi üzerine kurulmuştur. Böylece bulanık sonuçların desteklenmesi dışında her iki durum için oluşabilecek süre farklılıkları ortaya konulmuştur. Ayrıca çözüm algoritmaları Durucasu vd. (2015) çalışmalarında yapmış oldukları gibi bir inşaat projesinde başarıyla uygulanmıştır.

450 günde yapımı tamamlanmış olan inşaat projesinde, proje kritik yolu her iki çözüm algoritmasıyla analiz edildiğinde aynı sonucu vermiş ve 0-2-3-4-6-7-8-9-11-17-23-36-49-50-51-52-53-54-55-56-58-59-60-72-74-75-76-78-80 yolu olarak elde edilmiştir. Bulanık proje süresinin maksimum 480 gün, net proje süresinin ise 336-355 gün arasında değişim gösterebileceği söylenebilir. Bu bağlamda proje yapım süresinin 480 güne daha yakın bir değerde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla uygulaması yapılan proje için bulanık CPM yöntem sonuçları geçerli olmuştur. Uygulamada klasik ve bulanık CPM yöntemleri, çözüm içerisinde faaliyet süreleri tanımları dışında benzer adımlar içerdiği ve bulanık CPM'in proje planlamasında tercih edilebilir bir yöntem olduğu söylenebilir. Planlanan proje toplam süresi için elde edilen sonuçlardan bulanık ve net proje süresi ile kritik yolu olarak iki şekilde söz edilebileceği görülmektedir. Yager sıralama yöntemi ve alanların merkezi yöntemi projesi süresini tek bir değerle temsil ederken, bulanık CPM ve Alfa kesim yöntemleri proje süresi için değer aralığı vermiştir. Üyelik sınıflarının atanması yönüyle alfa kesim yönteminin belirsizliği bulanık CPM' den daha iyi ifade edebilme özelliğine sahip olduğu düşünülmekte ve alfa kesim yöntemi ile elde edilen sonuçların projede daha fazla bilgi sağlayabilir niteliktedir. LP tekniğinin uygulanabildiği yöntemlerin çözüme daha basit bir çözüm sunduğu ve zaman alıcı işlemleri azımsadığı gözlemlenmiştir. Ancak belirsizliğin ve riskin yüksek olduğu projeler için belirsizliğin ve olası durumların daha iyi ifade edilebilmesi ile sağlanacak fayda göz önüne alındığında alfa kesim yönteminin kullanılması önerilmektedir.

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Çalışmada, proje süresi ve kritik yolunun bulunmasına ilişkin iki farklı çözüm algoritması sunulmuştur. Her bir çözüm algoritmasıyla proje toplam süresi ve kritik yolu; ilk olarak bulanık olarak hesaplanmış ikinci olarak bulanık değerlerin net değer dönüşü yapılmıştır. Önerilen çözüm algoritmaları bir inşaat projesi üzerinde uygulanarak yöntemler arasında karşılaştırılma yapılabilmiş ve elde edilen bulanık sonuçların net değerler ile temsil edilmesi gerektiği durumlarda oluşabilecek süre değişimleri ile kritik yoldaki olası değişimler gösterilmiştir.

Proje süresi ile kritik yolun belirlenmesi konusunda öncelikle literatürde yaygın olarak kullanılan teknikler ve uygulamaları incelenmiştir. İncelenmiş olan bulanık yaklaşımların değerlendirilmesi sonucunda, bulanık proje planlama; yöntem seçimlerini, faaliyetlere atanması gereken üyelik derecelerinin belirlenmesini ve faaliyet sürelerinin hangi bulanık sayı tipiyle temsil edilmesi gibi konuları karar vericinin seçimine bıraktığı tespit edilmiştir. Şöyle ki karar vericinin bulanıklığı yani belirsizliği projenin hangi aşamasında gördüğü bu bağlamda hangi tekniğe ihtiyaç duyulabileceği, hangi sayı tipiyle çalışması gerektiği gibi konular karar vericinin tercihi ile belirlenebilmektedir. Proje planlama alanında çok fazla tekniğin varoluşu optimal çözümde projeye en uygun tekniğin seçimini zorlaştırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca incelenmiş olan tekniklerin bulanıklığı koruması veya net değer dönüşümü sağlaması yönleriyle ayrıldığı, net değer dönüşümlerinin bulanık sonuçların desteklenmesi için kullanıldığı ve LP tekniğinin çözüme kısa zamanda ulaşılmasını sağladığı görülmüştür.

Çalışma kapsamında literatürde daha önce sıklıkla kullanılan, bulanık CPM, Yager sıralama yöntemi, Alfa kesim yöntemi ve durulaştırma yöntemlerinde alanların merkezi yöntemleri kullanılarak iki farklı çözüm algoritması oluşturulmasına ve bulanık sayıların üçgen bulanık sayılarla temsil edilmesine karar verilmiştir. Ayrıca klasik ve bulanık CPM yöntemleri arasındaki farklılıklar ile benzerlikler vurgulanarak klasik, bulanık CPM ve Yager sıralama yöntemlerine ait LP modelleriyle bulanık CPM konusunun bir örnek üzerinde açıklanması sağlanmıştır. Önerilen çözüm algoritmaları bir inşaat proje üzerinde uygulanmış ve elde edilen bulanık ve net proje süreleri ile kritik yolun değişimi izlenebilmiş, bulanık yöntemler karşılaştırılmıştır.

Uygulanmış olan çözüm algoritmaları Chen (2006), Chen ve Hsueh (2008) ve Durucasu vd. (2015) çalışmalarını destekleyici nitelikte olmuştur. Bir inşaat projesinde uygulanarak başarılı sayılabilecek nitelikte sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma ile de yapımı tamamlanmış bir inşaat projesinde önerilen çözüm algoritmaları başarıyla uygulanarak proje bulanık ve net süresine ilişkin farklar göz önüne çıkarılmıştır. Elde edilen bulgularda bulanık ve net değer ile temsil edilen proje süresi farkları dikkat çekici nitelikte olmuştur. Bu örnekte proje kritik yolu değişim göstermemiştir fakat bu her zaman beklenen bir durum değildir. Bulanık proje süresi, proje yönetim sürecinde olası değişim durumlarıyla ilgili bilgi sağlar nitelikte olmuştur. Uygulama sonucunda mevcut belirsizliğin analizde en iyi şekilde temsil edilebilmesi için bulanıklığın korunduğu proje planlama yöntemlerinin kullanılması gerektiği görülmüştür.

Bu kapsamda uygun yöntemin seçiminde ilk olarak uygulanacak proje düşünülmeli ve hangi yöntemin en uygun çözümlemeyi sağlayacağına karar verilmedir. Örneğin riskleri çok daha fazla olan bir proje için olasılıksal bir yaklaşım sunan alfa kesim yönteminin daha yararlı olabileceği düşünülmektedir. Alfa (α) kesim aralıkları değiştirilerek daha hassas bir çözümleme yapılabilir. Riskleri daha az olan ama belirsizliklerin olduğu projelerde bulanık kritik yol yönteminin klasik kritik yol yöntemine göre daha faydalı olabileceği söylenebilir. Görüldüğü gibi bulanık yaklaşımlar proje planlanmasında temel amaca yani nihai ürüne en kısa sürede ulaşabilme sürecine yardımcı olabilecek, uygulanabilir alternatif çözüm yolları sunmaktadır. Müteakip araştırmalarda bu çalışmada önerilen yaklaşım ve yöntemlerden farklı olarak yamuk, L-R, L-L tipi, gaussal vb. bulanık sayılar kullanılarak çalışmalar genişletilebilir.

5. KAYNAKÇA

- Akyel, D. R. (2009).** Yönetimin Kontrol Fonksiyonunun Uygulanmasındaki Güçlükler. *Türk İdare Dergisi*, 465, s. 11-25.
- Alpay, C. (2007).** Proje Yönetimi, Bir İnşaat Projesinin Primavera İle Planlanması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Kültür Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Altaş, İ. H. (1999a).** Bulanıklık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, s. 80-85.
- Altaş, İ. H. (1999b).** Bulanık Mantık: Bulanık Denetim. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, s. 76-81.
- Altuntop, S. (2014).** Temel Yönetim Fonksiyonları. F. M. Harmancı, M. Gözübenli, ve D. Murat içinde, *Güvenlik Sektöründe Taktiksel Yöneticilik* (s. 1-31). Ankara: Nobel Yayınevi.
- Atlı, Ö., ve Kahraman, C. (2013).** Fuzzy Critical Path Analysis. *Sigma* 31, 128-140.
- Aysun, E. T., ve Kazan, R. (2007).** Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık İle Modellemesi. *Mühendislik Ve Makina*, 48(565), s. 3-8.
- Barutçugil, İ. S. (1988).** Üretim Sistemi Ve Yönetim Teknikleri. Bursa : Uludağ Üniversitesi Yayınları.
- Bayoğlu, F. İ. (2005).** Yüklenici İnşaat Firmalarında İnşaat Proje Yönetim Sistemi Uygulama Yeterliliğini Belirleme Modeli Ve Bir Uygulama Örneği. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayraktar, T. (1995).** Şebeke Analizinin (Pert-CPM) Üretim Yönetimi Alanına Uygulaması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, İşletme Anabilimdalı, Sayısal Yöntemler Bilimdalı.
- Bircan, H., ve Kartal, Z. (2004).** Doğrusal Programlama Tekniği İle Kapasite Planlaması Yaklaşımı Ve Çimento İşletmesinde Bir Uygulaması. *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 5(1).
- Chanas, S., ve Zielinski, P. (2001).** Critical Path Analysis In The Network With Fuzzy Activity Times. *Fuzzy Sets And Systems*, 122(2), s. 195-204.
- Chen, C. T., ve Huang, S. F. (2007).** Applying Fuzzy Method For Measuring Criticality. *Information Sciences*, 177(12), s. 2448-2458.
- Chen, S. P. (2006).** Analysis Of Critical Paths In A Project Network With Fuzzy Activity Times. *European Journal of Operational Research*, 183, s. 442-459.

Chen, S. P., ve Hsueh, Y. J. (2008). A Simple Approach To Fuzzy Critical Path Analysis In Project Networks. *Applied Mathematical Modelling*, 32(7), s. 1289-1297.

Cicioğlu, M., Cicioğlu, S., ve Yücedağ, İ. (2018). Bulanık Mantık İle Çamaşır Kurutma Makinesi Modellemesi. XX. Akademik Bilişim Konferansı, Karabük Üniversitesi.

Çimen, S. (1994). Projelerde Başarıyı Belirleyen Faktörler Ve Kamu Kuruluşlarında Bu Faktörlere Yaklaşımın Belirlenmesi. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.

Çoşkun, O., ve Ekmekçi, İ. (2011). Bir İnşaat Projesinin Evreleri İle Zaman Ve Maliyet Analizinin Proje Yönetim Teknikleri Vasıtasıyla İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(20), s. 39-53.

Doğanay, B. (2001). Doğrusal Programlama Modeli Ve Bir Çözümlü Örme İşletmesinde Uygulaması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Durucasu, H., İcan, Ö., Yeşilaydın, G., Gülcan, B., ve Karamaşa, Ç. (2015). Bulanık CPM Yöntemiyle Proje Çizelgeleme: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama. *Ege Akademik Bakış Dergisi*, 15(4), s. 449-466.

Dutta, P., Boruah, H., ve Ali, T. (2011). Fuzzy Arithmetic With And Without Using α -Cut Method: A Comparative Study. *International Journal of Latest Trends in Computing*, 2(1), s. 99-107.

Elizabeth, S., ve Sujatha, L. (2013a). Critical Path Problem Under Fuzzy Environment. *International Journal of Computer Applications*, 75(1), s. 7-11.

Elizabeth, S., ve Sujatha, L. (2013b). Fuzzy Critical Path Problem For Project Network. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 85(2), s. 223-240.

Hacaloğlu, E. M. (2007). ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sisteminin Kurumsal Kaynak Planlaması Sürecine Etkilerinin. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü.

ISO 21500, I. S. (2012). Guidance On Project Management. ISO.

Karahan, Y. D., ve Ezin, Ö. G. (2014). PERT-CPM Tekniğiyle Bir İnşaatın Yapım Süresi ve Maliyetlerinin Optimizasyonu. *Bartın Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, 10(5), s. 73-88.

Karasakal, O. (2012). Bulanık Pıd Kontrolörleri İçin Çevrim İçi Kural Ağırlıklandırma Yöntemleri. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı.

Keskenler, M., ve Keskenler, E. (2017). Bulanık Mantığın Tarihi Gelişimi. *Takvim-i Vekayi*, 5(1), 1-10.

Konakcı, C. (2006). İnşaat Planlama Teknikleri Ve Yeni Yaklaşımlar- Türk Yüklenici Firmaları Alan Çalışması. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Proje ve Yapım Yönetimi Programı.

Kömürlü, R., ve Toltar, L. (2018). İnşaatta Proje Yönetimi; Projenin Başarısına Etkisi. Mimarlık ve Yaşam, 3(2), 249-258.

Kurij, K. V., Mıljaić, A. V., ve Beljaković, D. D. (2014). Analysis Of Construction Dynamic Plan Using Fuzzy Critical Path Method. Tehnika – Naše Gradevinarstvo, 69(2).

Kutlu, N. T. (2001). Proje Planlama Teknikleri Ve PERT Tekniğinin İnşaat Sektöründe Uygulanması Üzerine Bir Çalışma. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 3(2), s. 164-193.

Mazlum, M. (2014). CPM, Pert Ve Bulanık Mantık Teknikleriyle Proje Yönetimi Ve Bir İşletmede Uygulanması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı.

Naylor, H. F. (1995). Construction Project Management: Planning And Scheduling. Canada: Delmar Publishers.

Ökmen, D. Ö., ve Öztaş, P. D. (2014). A CPM-Based Scheduling Method For Construction Projects With Fuzzy Sets And Fuzzy Operations. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 56(2), s. 02-08.

Özköse, D. Ö., ve Gencer, P. D. (2019). Proje Planlama Ve Çizelgelemede Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yöntem ile Kritik Yolun-Proje Tamamlanma Zamanının Tespiti Ve Zaman-Maliyet Analizi. Bartın Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10(20), s. 278-300.

Peşkircioğlu, N. (1989). Proje Yönetimi Ve Gelişmekte Olan Ülkelerdeki Uygulama Özellikleri. Ankara: PMP Yayınları, 4. Baskı.

Prade, H. (1979). Using Fuzzy Set Theory In A Scheduling Problem: A Case Study. Fuzzy Sets And Systems, 2(2), s. 153-165.

Project Management Institute (PMI), G. S. (2008). A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guide) Fourth Edition: https://www.works.gov.bh/English/ourstrategy/Project%20Management/Documents/Other%20PM%20Resources/PMBOKGuideFourthEdition_protected.pdf adresinden alındı.

TDK. (2019). Türk Dil Kurumu Sözlükleri "Proje". Türk Dil Kurumu: <https://sozluk.gov.tr/> adresinden alındı

Tekin, M. (2010). Sayısal Yöntemler . M. Tekin içinde, Sayısal Yöntemler (s. 190). Konya: Günay Ofset, 7. Baskı.

Tektaş, P. D., ve Tektaş, D. D. (2020). Bulanık Kümeler: <http://tektasi.net/wp-content/uploads/2014/01/Bulanik-Kumeler.pdf> adresinden alındı

Toprak, H. S. (2010). Otomotiv Sektöründe Proje Yönetimi Ve Proje İşgücü Planlaması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Yönetimi.

Tuncel, S. Ö. (1997). Bulanık Doğrusal Programlama. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tuş, A. (2006). Bulanık Doğrusal Programlama Ve Bir Üretim Planlamasında Uygulama Örneği. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Üretim Yönetim ve Pazarlama Bilim Dalı.

Türköz, N. (2001). Doğrusal Programlama Metodu İle Üretim Planlaması (Isparta Mensucat Aş'nda Uygulama). (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı.

Winston, W. (2004). Operation Research –Applications and Algorithms. Brooks / Cole –Thomson Learning Inc.

Yang, Z., ve Wang, Z. (2010). Comparison Between AON And AOA Network Diagrams. IEEE 17Th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1507-1509.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. Information And Control, 8(3), 338-353.

6. EKLER

EK A.1: Proje Faaliyet Süreleri ve Öncüllük İlişkileri

CPM-FAALİYET TABLOSU				
		1.Adım	2.Adım	1.Adım
t _{ij}	Faal .No	Faaliyet Adı	Öncüller	Süreler t _{ij} / gün
	1	Hafriyat Öncesi İşlemler		
t ₀₂	2	Aplikasyon		2,00
t ₂₃	3	Zemin Etüdü	2	1,00
t ₃₄	4	Proje Çizim ve Onayı	3	30,00
	5	Toprak ve Temel Altı İşleri		
t ₄₆	6	Hafriyat alınması	4	5,00
t ₆₇	7	Toprak Sıkıştırma ve Dolgu	6	2,00
t ₇₈	8	Blokaj	7	1,00
t ₈₉	9	Grobeton 10 cm	8	2,00
	10	Radye Temel		
t ₉₋₁₁	11	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	9	5,00
t ₁₁₋₁₂	12	Demir Bağlama işleri	11	4,00
t ₁₂₋₁₃	13	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	12	5,00
t ₁₃₋₁₄	14	Su Yalıtımı (Kanalizasyon Bağlantıları)	13	2,00
t ₁₄₋₁₅	15	Şap (Hatıl+Beton)	14	1,00
	16	2.Bodrum (Sığınak)		
t ₁₁₋₁₇	17	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	11	10,00
t ₁₂₋₁₈	18	Demir Bağlama işleri	12	9,00
t ₁₈₋₁₉	19	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	13*;18	10,00
t ₂₀₋₁₉	20	Dolgu (Kenarların doldurulması)	19	3,00
t ₂₀₋₂₁	21	Zemin Kaplama	15*;20	5,00
	22	1.Bodrum Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)		
t ₁₇₋₂₃	23	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	17	20,00
t ₂₃₋₂₄	24	Demir Bağlama işleri	23	15,00
t ₂₄₋₂₅	25	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	24	24,00
t ₂₃₋₂₆	26	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	23	10,00
t ₂₆₋₂₇	27	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	26	33,00

t27-28	28	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	27	10,00
t28-29	29	Şap işleri	28	3,00
t29-30	30	Kapıların ve Pencerelelerin Takılması	29	18,00
t29-32	32	Kaplama (Zemin+Duvar)	29;21*	10,00
t32-33	33	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	32	5,00
t33-34	34	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	33	15,00
	35	Zemin Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)		
t23-36	36	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	23	20,00
t36-37	37	Demir Bağlama işleri	36	15,00
t37-38	38	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	37;25*	24,00
t38-39	39	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	38;26*	10,00
t39-40	40	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	39;27*	33,00
t40-41	41	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	40;28*	10,00
t41-42	42	Şap işleri	41;29*	3,00
t42-43	43	Kapıların ve Pencerelelerin Takılması	42;30*	18,00
t43-45	45	Kaplama (Zemin+Duvar)	43;32*	10,00
t45-46	46	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	45;33*	5,00
t46-47	47	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	46;34*	15,00
	48	Normal Kat (Çatı Piyeli 3 oda+1 salon+2 banyo)		
t36-49	49	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	36	9,00
t49-50	50	Demir Bağlama işleri	49	9,00
t50-51	51	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	50	30,00
t51-52	52	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	51;39*	13,00
t52-53	53	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	52;40*	42,00
t53-54	54	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	53;41*	13,00
t54-55	55	Şap işleri	54;42*	6,00
t55-56	56	Kapıların ve Pencerelelerin Takılması	55;43*	27,00
t56-58	58	Kaplama (Zemin+Duvar)	56;45*	13,00
t58-59	59	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	58;46*	8,00
t59-60	60	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	59;47*	18,00
	61	Merdiven		
t19-62	62	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	19	20,00
t62-63	63	Demir Bağlama işleri	62	20,00
t63-64	64	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	63	65,00

t ₆₄₋₆₅	65	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	64	20,00
t ₆₅₋₆₆	66	Şap işleri	65	10,00
t ₆₆₋₆₇	67	Boya İşleri	66	15,00
t ₆₇₋₆₈	68	Basamak Kaplama+Korkuluk	67	35,00
	69	Çatı		
t ₄₉₋₇₀	70	Karkas İmalatı	49	15,00
t ₇₀₋₇₁	71	İzolasyon	70	20,00
t ₇₁₋₇₂	72	Kaplama	71;60*	10,00
	73	Dış Cephe		
t ₅₂₋₇₄	74	Sıva İşleri	52;72*	15,00
t ₇₄₋₇₅	75	Yalıtım işleri	74	15,00
t ₇₅₋₇₆	76	Boya işleri	75	10,00
	77	Finish İşleri		
t ₇₆₋₇₈	78	Korkuluklar (Balkon)	76	10,00
t ₆₈₋₇₉	79	Dış Kapılar	68	13,00
t ₇₉₋₈₀	80	Çevre Düzenlemesi	79;78*	26,00

Not: *kukla faaliyetleri temsil etmektedir.

EK B.1: Bulanık Faaliyet Süreleri (Üçgen Sayılarla)

FCPM-FAALİYET TABLOSU						
		1.Adım	2.Adım	1.Adım		
t _{ij}	Faal . No	Faaliyet Adı	Öncüller	En İyi (a) gün	Muhtemel (m) gün	En Kötü (b) gün
	1	Hafriyat Öncesi İşlemler				
t ₀₋₂	2	Aplikasyon		1,50	2,00	4,00
t ₂₋₃	3	Zemin Etüdü	2	1,00	1,00	2,00
t ₃₋₄	4	Proje Çizim ve Onayı	3	20,00	30,00	45,00
	5	Toprak ve Temel Altı İşleri				
t ₄₋₆	6	Hafriyat alınması	4	3,00	5,00	8,00
t ₆₋₇	7	Toprak Sıkıştırma ve Dolgu	6	1,00	2,00	4,00
t ₇₋₈	8	Blokaj	7	1,00	1,00	2,00
t ₈₋₉	9	Grobeton 10 cm	8	1,00	2,00	3,00
	10	Radye Temel				
t ₉₋₁₁	11	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	9	3,00	5,00	9,00
t ₁₁₋₁₂	12	Demir Bağlama işleri	11	3,00	4,00	7,00
t ₁₂₋₁₃	13	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	12	4,00	5,00	11,00
t ₁₃₋₁₄	14	Su Yalıtımı (Kanalizasyon Bağlantıları)	13	1,00	2,00	4,00
t ₁₄₋₁₅	15	Şap (Hatıl+Beton)	14	1,00	1,00	3,00
	16	2.Bodrum (Sığınak)				
t ₁₁₋₁₇	17	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	11	6,00	10,00	19,00
t ₁₂₋₁₈	18	Demir Bağlama işleri	12	7,00	9,00	13,00
t ₁₈₋₁₉	19	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	13*;18	7,00	10,00	18,00
t ₂₀₋₁₉	20	Dolgu (Kenarların doldurulması)	19	1,00	3,00	5,00
t ₂₀₋₂₁	21	Zemin Kaplama	15*;20	3,00	5,00	8,00
	22	1.Bodrum Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)				
t ₁₇₋₂₃	23	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	17	15,00	20,00	28,00
t ₂₃₋₂₄	24	Demir Bağlama işleri	23	12,00	15,00	20,00
t ₂₄₋₂₅	25	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	24	16,00	24,00	32,00
t ₂₃₋₂₆	26	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	23	7,00	10,00	15,00
t ₂₆₋₂₇	27	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	26	26,00	33,00	45,00
t ₂₇₋₂₈	28	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	27	8,00	10,00	15,00
t ₂₈₋₂₉	29	Şap işleri	28	1,00	3,00	5,00
t ₂₉₋₃₀	30	Kapıların ve Pencerelelerin Takılması	29	11,00	18,00	29,00
t ₂₉₋₃₂	32	Kaplama (Zemin+Duvar)	29;21*	7,00	10,00	15,00
t ₃₂₋₃₃	33	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	32	3,00	5,00	9,00
t ₃₃₋₃₄	34	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	33	11,00	15,00	18,00
	35	Zemin Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)				
t ₂₃₋₃₆	36	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	23	15,00	20,00	28,00
t ₃₆₋₃₇	37	Demir Bağlama işleri	36	12,00	15,00	20,00
t ₃₇₋₃₈	38	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	37;25*	16,00	24,00	32,00
t ₃₈₋₃₉	39	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	38;26*	7,00	10,00	15,00

t39-40	40	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	39;27*	26,00	33,00	45,00
t40-41	41	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	40;28*	8,00	10,00	15,00
t41-42	42	Şap işleri	41;29*	1,00	3,00	5,00
t42-43	43	Kapıların ve Pencereilerin Takılması	42;30*	14,00	18,00	32,00
t43-45	45	Kaplama (Zemin+Duvar)	43;32*	4,00	10,00	12,00
t45-46	46	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	45;33*	3,00	5,00	9,00
t46-47	47	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	46;34*	11,00	15,00	18,00
	48	Normal Kat (Çatı Piyeli 3 oda+1 salon+2 banyo)				
t36-49	49	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	36	21,00	9,00	34,00
t49-50	50	Demir Bağlama işleri	49	15,00	9,00	23,00
t50-51	51	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	50	22,00	30,00	38,00
t51-52	52	Duvar Örülməsi (Ara bölücü duvarlar)	51;39*	10,00	13,00	18,00
t52-53	53	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	52;40*	35,00	42,00	54,00
t53-54	54	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	53;41*	11,00	13,00	18,00
t54-55	55	Şap işleri	54;42*	4,00	6,00	8,00
t55-56	56	Kapıların ve Pencereilerin Takılması	55;43*	20,00	27,00	38,00
t56-58	58	Kaplama (Zemin+Duvar)	56;45*	10,00	13,00	18,00
t58-59	59	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	58;46*	6,00	8,00	12,00
t59-60	60	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	59;47*	14,00	18,00	21,00
	61	Merdiven				
t19-62	62	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	19	19,00	20,00	32,00
t62-63	63	Demir Bağlama işleri	62	18,00	20,00	24,00
t63-64	64	Beton işleri (Yapı Denetim+Dökülmesi+Priz süresi)	63	57,00	65,00	75,00
t64-65	65	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	64	17,00	20,00	24,00
t65-66	66	Şap işleri	65	7,00	10,00	15,00
t66-67	67	Boya İşleri	66	13,00	15,00	20,00
t67-68	68	Basamak Kaplama+Korkuluk	67	31,00	35,00	41,00
	69	Çatı				
t49-70	70	Karkas İmalatı	49	12,00	15,00	19,00
t70-71	71	İzolasyon	70	17,00	20,00	24,00
t71-72	72	Kaplama	71;60*	8,00	10,00	15,00
	73	Dış Cephe				
t52-74	74	Sıva İşleri	52;72*	13,00	15,00	19,00
t74-75	75	Yalıtım işleri	74	12,00	15,00	19,00
t75-76	76	Boya işleri	75	8,00	10,00	14,00
	77	Finish İşleri				
t76-78	78	Korkuluklar (Balkon)	76	8,00	10,00	13,00
t68-79	79	Dış Kapılar	68	11,00	13,00	15,00
t79-80	80	Çevre Düzenlemesi	79;78*	23,00	26,00	29,00

EK C.1: Alfa Kesim Faaliyet Süreleri (0,1 artırımla)

t_{ij}	α	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	Faal . No	$\bar{T}_{ij\alpha} / \text{gün}$										
	1											
t0-2	2	2,75	2,68	2,60	2,53	2,45	2,38	2,30	2,23	2,15	2,08	2,00
t2-3	3	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00
t3-4	4	32,50	32,25	32,00	31,75	31,50	31,25	31,00	30,75	30,50	30,25	30,00
	5											
t46	6	5,50	5,45	5,40	5,35	5,30	5,25	5,20	5,15	5,10	5,05	5,00
t6-7	7	2,50	2,45	2,40	2,35	2,30	2,25	2,20	2,15	2,10	2,05	2,00
t7-8	8	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00
t8-9	9	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	10											
t9-11	11	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,00
t11-12	12	5,00	4,90	4,80	4,70	4,60	4,50	4,40	4,30	4,20	4,10	4,00
t12-13	13	7,50	7,25	7,00	6,75	6,50	6,25	6,00	5,75	5,50	5,25	5,00
t13-14	14	2,50	2,45	2,40	2,35	2,30	2,25	2,20	2,15	2,10	2,05	2,00
t14-15	15	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
	16											
t11-17	17	12,50	12,25	12,00	11,75	11,50	11,25	11,00	10,75	10,50	10,25	10,00
t12-18	18	10,00	9,90	9,80	9,70	9,60	9,50	9,40	9,30	9,20	9,10	9,00
t18-19	19	12,50	12,25	12,00	11,75	11,50	11,25	11,00	10,75	10,50	10,25	10,00
t20-19	20	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
t20-21	21	5,50	5,45	5,40	5,35	5,30	5,25	5,20	5,15	5,10	5,05	5,00
	22											
t17-23	23	21,50	21,35	21,20	21,05	20,90	20,75	20,60	20,45	20,30	20,15	20,00
t23-24	24	16,00	15,90	15,80	15,70	15,60	15,50	15,40	15,30	15,20	15,10	15,00
t24-25	25	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
t23-26	26	11,00	10,90	10,80	10,70	10,60	10,50	10,40	10,30	10,20	10,10	10,00
t26-27	27	35,50	35,25	35,00	34,75	34,50	34,25	34,00	33,75	33,50	33,25	33,00
t27-28	28	11,50	11,35	11,20	11,05	10,90	10,75	10,60	10,45	10,30	10,15	10,00
t28-29	29	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
t29-30	30	20,00	19,80	19,60	19,40	19,20	19,00	18,80	18,60	18,40	18,20	18,00
t29-32	32	11,00	10,90	10,80	10,70	10,60	10,50	10,40	10,30	10,20	10,10	10,00
t32-33	33	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,00
t33-34	34	14,50	14,55	14,60	14,65	14,70	14,75	14,80	14,85	14,90	14,95	15,00
	35											
t23-36	36	21,50	21,35	21,20	21,05	20,90	20,75	20,60	20,45	20,30	20,15	20,00
t36-37	37	16,00	15,90	15,80	15,70	15,60	15,50	15,40	15,30	15,20	15,10	15,00
t37-38	38	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
t38-39	39	11,00	10,90	10,80	10,70	10,60	10,50	10,40	10,30	10,20	10,10	10,00
t39-40	40	35,50	35,25	35,00	34,75	34,50	34,25	34,00	33,75	33,50	33,25	33,00
t40-41	41	11,50	11,35	11,20	11,05	10,90	10,75	10,60	10,45	10,30	10,15	10,00
t41-42	42	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
t42-43	43	23,00	22,50	22,00	21,50	21,00	20,50	20,00	19,50	19,00	18,50	18,00
t44-45	45	8,00	8,20	8,40	8,60	8,80	9,00	9,20	9,40	9,60	9,80	10,00
t45-46	46	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,00
t46-47	47	14,50	14,55	14,60	14,65	14,70	14,75	14,80	14,85	14,90	14,95	15,00
	48											
t36-49	49	27,50	25,65	23,80	21,95	20,10	18,25	16,40	14,55	12,70	10,85	9,00
t49-50	50	19,00	18,00	17,00	16,00	15,00	14,00	13,00	12,00	11,00	10,00	9,00
t50-51	51	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
t51-52	52	14,00	13,90	13,80	13,70	13,60	13,50	13,40	13,30	13,20	13,10	13,00
t52-53	53	44,50	44,25	44,00	43,75	43,50	43,25	43,00	42,75	42,50	42,25	42,00
t53-54	54	14,50	14,35	14,20	14,05	13,90	13,75	13,60	13,45	13,30	13,15	13,00
t54-55	55	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

t55-56	56	29,00	28,80	28,60	28,40	28,20	28,00	27,80	27,60	27,40	27,20	27,00
t56-58	58	14,00	13,90	13,80	13,70	13,60	13,50	13,40	13,30	13,20	13,10	13,00
t58-59	59	9,00	8,90	8,80	8,70	8,60	8,50	8,40	8,30	8,20	8,10	8,00
t59-60	60	17,50	17,55	17,60	17,65	17,70	17,75	17,80	17,85	17,90	17,95	18,00
	61											
t19-62	62	25,50	24,95	24,40	23,85	23,30	22,75	22,20	21,65	21,10	20,55	20,00
t62-63	63	21,00	20,90	20,80	20,70	20,60	20,50	20,40	20,30	20,20	20,10	20,00
t63-64	64	66,00	65,90	65,80	65,70	65,60	65,50	65,40	65,30	65,20	65,10	65,00
t64-65	65	20,50	20,45	20,40	20,35	20,30	20,25	20,20	20,15	20,10	20,05	20,00
t65-66	66	11,00	10,90	10,80	10,70	10,60	10,50	10,40	10,30	10,20	10,10	10,00
t66-67	67	16,50	16,35	16,20	16,05	15,90	15,75	15,60	15,45	15,30	15,15	15,00
t67-68	68	36,00	35,90	35,80	35,70	35,60	35,50	35,40	35,30	35,20	35,10	35,00
	69											
t49-70	70	15,50	15,45	15,40	15,35	15,30	15,25	15,20	15,15	15,10	15,05	15,00
t70-71	71	20,50	20,45	20,40	20,35	20,30	20,25	20,20	20,15	20,10	20,05	20,00
t71-72	72	11,50	11,35	11,20	11,05	10,90	10,75	10,60	10,45	10,30	10,15	10,00
	73											
t52-74	74	16,00	15,90	15,80	15,70	15,60	15,50	15,40	15,30	15,20	15,10	15,00
t74-75	75	15,50	15,45	15,40	15,35	15,30	15,25	15,20	15,15	15,10	15,05	15,00
t75-76	76	11,00	10,90	10,80	10,70	10,60	10,50	10,40	10,30	10,20	10,10	10,00
	77											
t76-78	78	10,50	10,45	10,40	10,35	10,30	10,25	10,20	10,15	10,10	10,05	10,00
t68-79	79	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
t79-80	80	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00