



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

Güllü DEĞİRMENCİ<sup>1</sup>, Mehmet N. UĞURAL<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> OYAK İnşaat, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Bulanık CPM,  
İnşaat Mühendisliği,  
Lineer Programlama,  
Yapım Yönetimi,  
Proje Yönetimi.*

### Öz

İnşaat sektöründe karmaşık projelerin planlanması ve kontrolü için Kritik Yol Metodunun (KYM), yaygın olarak kullanılan yararlı bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, faaliyetlerin süresi net sayılarla temsil edildiğinden, kritik yol analizinde faaliyet sürelerini kesin olarak tahmin etmek zorlaşır. Buna ek olarak, vakaların çoğu, görev sürelerinin subjektif olarak hesaplanmasını gerektirir ve bu da faaliyetlerin süresi hakkında belirsizliğe neden olur. Bu makale, bulanık kümelerle dayalı bir yaklaşım önererek bu sorunları ele almaktadır. Bu çalışmanın amacı, bir inşaat projesinin kritik yolunu ve tamamlanma süresini hesaplamak için bulanık sayıların nasıl kullanılacağını göstermektir. Çalışma kapsamında proje faaliyetlerine üçgen bulanık süreler verilerek iki ayrı çözüm algoritması oluşturulmuştur. Örnek bir inşaat projesinin kritik yolu ve proje süresi ilk çözüm algoritmasında proje faaliyetlerine üçgen bulanık süreler atanarak ve doğrusal programlama modeli kullanılarak hesaplanırken, ikinci çözüm algoritmasında bulanık proje süresi ve kritik yol Alfa kesme yöntemi ( $\alpha$ -Kesme Yöntemi) kullanılarak hesaplanmış ve daha sonra Centroid yöntemi (Alanların Merkezi Yöntemi) kullanılarak netleştirilmiştir. Bu proje için kritik yol ve tamamlanma süresi önceden bilindiğinden, iki çözüm algoritması karşılaştırılmıştır. Kritik yol yöntemi yerine Bulanık kritik yol yönteminin kullanılmasının bu çalışmanın önemini vurgulayacağı umulmaktadır.

## LINEAR PROGRAMMING WITH FUZZY CPM: A CASE STUDY IN CONSTRUCTION SECTOR

### Keywords

*Fuzzy CPM (FCPM),  
Civil Engineering,  
Linear Programming,  
Construction Management,  
Project Management.*

### Abstract

The Critical Path Method (CPM) has been demonstrated to be a useful tool that is widely used in the construction industry for the planning and control of complex projects. However, because the duration of activities is represented as crisp numbers, it becomes difficult to precisely estimate the activity times in the critical path analysis. In addition, the majority of cases necessitate the subjective calculation of task duration times, resulting in ambiguity about the duration of the activities. This paper addresses these issues by proposing an approach based on fuzzy sets. The purpose of this study is to demonstrate how to use fuzzy numbers to calculate the critical path and completion time of a construction project. Two distinct solution algorithms were constructed by giving triangular fuzzy durations to the project activities within the scope of the study. The critical path and project duration of a sample construction project were calculated in the first solution algorithm by assigning triangular fuzzy durations to project activities and using the linear programming model, whereas the fuzzy project time and critical path were calculated in the second solution algorithm by using the Alpha cutting method ( $\alpha$ -Cutting Method) and then clarified using the Centroid method (COA- Center of Area). Because the critical path and completion time for this project are known ahead of time, the two solution algorithms were compared. It is hoped that using the FCPM method rather than the CPM method will highlight the significance of this study.

\* İlgili yazar / Corresponding author: m.ugural@iku.edu.tr, +90 506 598 11 00

**Alıntı / Cite**

Değirmenci, G., Uğural, M.N., (2022). Bulanık CPM ile Doğrusal Programlama: Türkiye İnşaat Endüstrisinde Bir Vaka Çalışması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 466-481.

**Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)**

G. Değirmenci, 0000-0003-0993-0960  
M.N. Uğural, 0000-0002-8037-7603

**Makale Süreci / Article Process**

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	09.06.2021
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	15.10.2021
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	29.12.2021
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.06.2022

**1. Giriş (Introduction)**

Günümüzün rekabetçi iş ortamında, şirketler kaynak kullanımını en üst düzeye çıkarmaya, zamanı en iyi şekilde yönetmeye ve maliyetleri en aza indirmeye çalışmaktadır. Rekabet ortamında sektörde kalıcı olabilmek için, yönetim sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Dolayısıyla proje yönetim sistemleri sürekli iyileştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Özellikle inşaat projeleri için, süre uzunluğu ve bu sürece eşlik eden riskler nedeniyle, faaliyetlerin süresini doğru veya net bir şekilde tahmin etmek genellikle zor veya neredeyse imkânsız oluşu proje yönetiminin önemini arttırmıştır (Kuriş, vd., 2014). Projelerde yönetim ihtiyacı, bir dizi faaliyetin bir amaca hizmet ederek sıralama ve bir an önce nihai ürüne ulaşma talebinden doğmuştur (Özköse ve Gencer, 2019). Ağ diyagramları, projenin kritik ve kritik olmayan faaliyetlerini açıkça göstererek yönetim sürecinin verimliliğinin artmasını sağlayabilmektedir (Temiz Kutlu, 2001). Etkili bir yönetim sistemi için 1950’lerde proje planlama yöntemlerinden CPM (Critical Path Method) ve PERT (Program Evaluation and Review Technique)’in kullanıldığı görülmektedir (Çolak, vd., 2018). Amerikan donanması için bir denizaltı projesi sırasında Booz Allen Hamilton tarafından program değerlendirme ve gözden geçirme tekniği (PERT) uygulanmış ve proje, iki yıl erken bitirilmiştir (Hajdu ve Isaac, 2017). Literatüre bakıldığında CPM ve PERT yöntemleri proje çizelgeleme ile proje kontrolü için popüler teknikler olmaya ve kullanılmaya devam etmektedir (Liberatore, 2008). Geliştirilen her iki tekniğin temelinde şebeke diyagramları kullanılmakta olup, şebeke diyagramları projenin bütünü oluşturarak faaliyetlerin ve bu faaliyetlerin aralarındaki mantıksal bağlantıların grafik şeklinde ifade edilmesine dayanmaktadır (Karahana ve Ezin, 2014). Her iki yöntem için temel amaç, kısıtlı kaynaklar kullanılarak istenilen zamanda projeyi tamamlamaktır (Karahana ve Ezin, 2014; Uğural ve Şahin, 2020). Toplam proje süresinin hesaplanması ve faaliyet sürelerinin belirlenmesi aşamaları iki teknik arasındaki en belirgin farktır (Karahana ve Ezin, 2014; Temiz Kutlu, 2001).

Faaliyetlerin süresi belirlenirken uzmanların deneyimlerinden, bilgilerinden ve tahminlerinden yararlanmak sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir. Aynı proje için pek çok uzman tarafından yapılan süre tahminleri farklılık gösterebilir (Durucasu vd., 2015). Bu tip öznelliğe sahip belirsizlik durumları için önerilen bir yaklaşım, bulanık küme teorisine dayanan bulanık mantık yaklaşımıdır. Temel fikir, Zadeh tarafından geliştirilen bulanık küme teorisinin klasik proje çizelgeleme yöntemlerine uygulanmasına dayanmaktadır (Chen, 2006). Böylece klasik yöntemlerle tam anlamıyla tanımlanamayan belirsizlik probleminin üstesinden gelinmeye çalışılır (Chanas ve Zielinski, 2001).

Bu çalışmanın konusunu, bulanık CPM (FCPM- Fuzzy Critical Path Method) ve Yager sıralama yöntemlerinin LP (Linear Programming) modellemesi, Alfa kesim yöntemi ile durulaştırma yöntemlerinden Alanların merkezi yöntemi oluşturmaktadır. İncelenen ve değerlendirilen bulanık yöntemler ile iki farklı çözüm algoritması oluşturulmuştur. Algoritmalar proje süresi ile kritik yolunun bulanık olarak elde edilmesini daha sonra net değer dönüşümünü içermektedir. Proje faaliyet süreleri sıklıkla tercih edilmekte olan üçgen bulanık sayılarla temsil edilmiştir.

Birinci çözüm algoritmasında, FCPM-LP model kullanılarak proje süresi ve kritik yolu belirlenmiştir. Daha sonra 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 değere dönüştüğünde oluşan süre farkı ve proje kritik yolundaki değişim sınırlanmıştır. Üyelik fonksiyonları, “Bulanık kümeler, üyelik derecelerinin sürekliliği olan bir nesne sınıfıdır. Böyle bir küme, her bir nesneye sıfır ile bir [0,1] arasında değişen bir üyelik derecesi atayan bir üyelik (karakteristik) işlevi ile karakterize edilir” (Zadeh, 1965). Üyelik fonksiyonları küme elemanlarının kümeye olan aitlik derecelerinin atanması işlemidir. Özetle faaliyetlerin ve elemanların kümeye olan aitlik derecelerinin yani üyeliklerinin belirlenmesidir. Zadeh (1965) tarafından yapılmış olan tanım ışığında; bu çözüm algoritmasında Yager sıralama yöntemi kullanılmasının nedeni bu yöntemin üyelik fonksiyonlarının bilinmesini gerektirmemesidir.

İkinci çözüm algoritması olarak üyelik fonksiyonları atanmış proje için alfa ( $\alpha$ ) kesim yöntemiyle bulanık proje toplam süresi ve kritik yolu belirlenmiştir. Alfa ( $\alpha$ ) 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 ( $\alpha$ ) 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 dönüşümü yapılmıştır. Ayrıca net değer dönüşümü yapılan proje toplam süresinin net değer kesim aralığı belirlenmiştir. Her iki çözüm algoritması ile bulanık proje toplam süresinin, söz konusu net bir değerle temsil edilmesi gerektiğinde meydana geldiği belirlenmiştir.

Çalışmanın amacı, 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 kullanılmıştır. Önerilen çözüm algoritmaları yapımı tamamlanmış bir inşaat projesi üzerinde örneklendirilecek ve çalışmanın özgünlüğünü oluşturacaktır. Sonuç olarak çalışmada önerilen çözüm algoritmalarıyla elde edilecek sonuçların karşılaştırılması, bulanık yöntemlerin kıyaslanması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi amaçlanmakta, destekleyici sonuçların elde edilmesi ümit edilmektedir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Review)

Bulanık mantık yaklaşımı ilk defa Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenen bir konferansta 1956 yılında duyurulmuştur. Ancak bu yaklaşıma California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A. Zadeh'in 1965 tarihli "Fuzzy Sets (bulanık kümeler)" isimli makale çalışması öncülük etmiş ve Zadeh, yaklaşımın ilk kurucusu olarak kabul edilmiştir (Karasakal, 2012; Zadeh, 1965). Zadeh (1965), bu çalışmada insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. 1970'lerin ikinci yarısından itibaren bulanık PERT ve bulanık CPM olarak adlandırılan proje ağı analizi yaklaşımları geliştirilmiştir (Chanas ve Zielinski, 2001). 1975 yılında, bulanık kontrol sistemi ilk kez Mamdani ve Assilian tarafından modellenmiştir (Özcan, 2018). 1979'da Prade, "Zamanlama probleminde bulanık küme teorisini kullanma" adlı çalışmasıyla bulanık küme teorisini proje çizelgeleme problemine ilk kez uygulamıştır (Prade, 1979). Chanas ve Zielinski (2001), bulanık CPM problemi üzerine bir dizi çalışma önermişler ve kritik aktiviteler üzerinde çalışarak kritikliğin karmaşıklığını tartışmış; Zadeh (1965)'in genişleme ilkesinin, ağdaki etkinlik zamanlarının bir fonksiyonu olarak klasik kritiklik kavramına doğrudan uygulanabileceğini varsayarak kritik yolu hesaplamak için iki etkili yöntem önermişlerdir. Chanas ve Zielinski (2001), L-L tipi bulanık sayıları kullanarak, yolun kritiklik derecesinin projenin en uzun yolunu bulmak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır (Chanas ve Zielinski, 2001). Chen vd. (2006, 2007, 2008) FCPM hakkında farklı tarihlerde çeşitli çalışmalar yayınlamış ve çeşitli yaklaşımlar önermişlerdir. Chen 2006 yılında; çalışmalarını doğrusal programlama formülasyonu ve bulanık CPM problemini bir çift parametrik doğrusal programa dönüştürmek için Zadeh (1965)'in genişleme ilkesine dayandırmıştır. Bulanık sayılar ve alfa kesim aralıkları ile toplam proje süresinin L-R tipi bulanık sayıları ve alfa kesim yöntemini kullanarak toplam proje süresinin üyelik fonksiyonunu tanımlamıştır. Çözümü destekleyici bir yaklaşım olarak ise Yager sıralama yöntemini kullanmıştır. Sonuç olarak, proje toplam süresinin net değerler yerine üyelik fonksiyonlarıyla temsil edilmelerinin değerli sayılabilecek bilgi kayıplarını önlediğini savunmuştur (Chen, 2006). Chen ve Huang 2007 yılında; önceki çalışmalardan farklı olarak FPERT yöntemini kullanmışlar. Faaliyet zamanlarını üçgen bulanık sayılarla temsil ederek, etkinliklerin başlangıç ve bitiş zamanlarını hesaplamışlardır. Kritik aktivitelerin ve yolun belirlenmesinde alfa seviyeleri dışında ikinci bir indeks kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen model ile, proje ağının durumuna ilişkin bilgilerin anında kullanılabilir olduğunu ve kritik yoldaki faaliyetlerin süresi değiştirilerek duyarlılık analizi yapılabileceği tartışılmıştır (Chen ve Huang, 2007). Chen ve Hsueh 2008 yılında, üyelik fonksiyonları bilinmediğinde bulanık kritik yol problemini bir LP modeli olarak formüle ederek bu tür sorunların çözümüne yönelik yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Amaç, bulanık aktivite sürelerinin doğrusal bir kombinasyonu olan bulanık bir sayıyı maksimize etmektir. Bu çalışmada bulanık CPM probleminin net sayı dönüşümü için uygun bir bulanık sıralama yöntemi olan Yager'in sıralama yöntemi benimsenmiştir (Chen ve Hsueh, 2008). Tüm bu çalışmalarda önerilmiş olan lineer programlama 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) çalışmada gerçek bir inşaat projesinin kritik yolunun ve tamamlanma süresinin bulanık faaliyet süreleri söz konusu olduğunda nasıl hesaplanabileceği konusunda literatürde sık kullanılan yöntemlerden  $\alpha$ -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).

Kritik yol yöntemi, çalışmaya 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 program değerlendirme ve gözden geçirme yöntemidir. Her iki yöntemine ait çözüm modeli, ağdaki kritik yolların, kritik faaliyetlerin ve kritik olayların tanımlanmasından oluşmaktadır (Chanas ve Zielinski, 2001).

İncelenen çalışmalarda, CPM ile PERT yöntemleri arasındaki en temel fark faaliyet sürelerinin tahmin edilmesi aşamasında ortaya çıkmaktadır. CPM yönteminde kullanılan zaman değerleri belirlilik (deterministik) yaklaşımı içerirken, PERT yönteminde zaman (probabilistik) olasılıksaldır (Gencer ve Türkbey, 2001). CPM ve PERT yöntemleri kullanılarak belirlenen faaliyet sürelerindeki bazı eksiklikler, bulanık proje planlama yöntemleri kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Gerçek yaşamda karşılaşılan belirsizlik problemi, projelerin modellenmesinde çeşitli zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle bulanık küme teorisi, CPM ve PERT yöntemlerine yardımcı bir araç olarak kabul edilmiş ve bu yöntemlerle birlikte çeşitli araştırmalarda uygulanmıştır (Buckley, 1989; Madhuri vd., 2014; Chen ve Hsueh, 2008).

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Çalışma Hakkında Genel Bilgiler (General Information About the Study)

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 kattan oluşan projede 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 m<sup>2</sup>, toplam ortak kullanım alanları 192,10 m<sup>2</sup>, toplam inşaat alanı 723,00 m<sup>2</sup>'dir. Katlarda bulunan daireler, 2. bodrum kat 103,90 m<sup>2</sup>, 1. bodrum kat daireleri 68,53 m<sup>2</sup> ve 59,40 m<sup>2</sup>, zemin kat daireleri 68,53 m<sup>2</sup> ve 59,47 m<sup>2</sup>, 1. normal kat daireleri 142,07 m<sup>2</sup> ve 132,83 m<sup>2</sup>, brüt alanları üzerine projelendirilmiştir. Projeye ait tüm faaliyetler, faaliyet süreleri ve öncüllük ilişkileri proje yöneticisi 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.

#### 3.2. Çalışmanın Amacı (The Aim of the Study)

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. Böylece önerilen çözüm algoritmalarıyla bulanık yöntemlerin karşılaştırılması ve uygulanabilirliğinin test edilmesi amaçlanmıştır. Çözümde lineer programlama (LP) tekniği yardımcı araç olarak kullanılmıştır. Önerilen çözüm algoritmalarının tamamlanmış gerçek bir inşaat projesi üzerinde örneklendirilmesi çalışmanın özgünlüğünü sağlamıştır. Bu çalışma, Chen vd. (2006, 2008) tarafından yapılan çalışmaların devamı niteliğinde düşünülmüştür. Temel fikir, Zadeh (1965)'in genişleme prensibi ile uyumlu bir LP modeli oluşturulmasına dayanmaktadır. 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 sağlanacaktır.

#### 3.3. Bulanık Küme Teorisi (Fuzzy Set Theory)

Klasik mantık olarak bilinen Aristo mantığı, matematiksel yaklaşımda durumların 0 ve 1 değerlerinden biriyle temsilini içermektedir (Tiryaki ve Kazan, 2007). Zadeh (1965), bu noktada ikili üyelik fonksiyonu ile ifade edilen klasik kümeler yerine dereceli üyelik fonksiyonuyla ifade edilen bulanık kümelerin tanımlanmasını öne sürmüştür (Zadeh, 1965). Bulanık mantıkta bulanık küme elemanları  $[0, 1]$  aralığında herhangi bir değerle temsil edilebilir. Bu durum bulanık mantığı klasik mantıktan ayıran noktadır ve sınırlar klasik kümelerle göre daha esnek olmaktadır. Bulanık mantık bu esnekliği sayesinde uygulandığı her alanda çok daha hassas sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir (Koçak ve Yiğit, 2020). Klasik küme teorisini savunan Aristo mantığının aksine bulanık mantık yaklaşımı L.R. Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisine dayanmaktadır (Zhang ve Huang, 1994; Zadeh, 1965). Bulanık küme teorisi kesin bilginin olmadığı ve özelliğinin 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).

Bulanık sayılar,  $x$ 'de aralıklı süreklilik, dışbükeylik ve normallik koşullarını sağlayabilen sayılardır.  $X$ 'in en az bir eleman için üyelik işlevi 1'e eşitse ( $\mu_{\bar{A}}(x)=1$ ) normal bulanık küme olarak tanımlanır (Chen & Huang, 2007; Karasakal, 2012).  $\mu_{\bar{A}}(x)=1$  durumu  $x$ 'in gerçel sayı olması koşuluyla sağlanabilir (Chen & Hsueh, 2008; Durucasu vd., 2015).  $\bar{A}$  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.  $\bar{A}$  bulanık kümesine ait  $\alpha$  kesim kümesi  ${}^{\alpha}\bar{A} = \{x \in X : \mu_{\bar{A}} \geq \alpha\}$  ile tanımlanmaktadır (Dutta vd., 2011).

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 (Tiryaki ve Kazan, 2007).

### 3.3.1. Üçgen Bulanık Sayılar (Triangular Fuzzy Numbers)

Üçgen bulanık sayılar kümesi,  $\bar{A} = (a, m, b)$  şeklinde tanımlanmış bir bulanık kümede,  $m$  tam üyelikli küme elemanını göstermek üzere  $a$  değeri en küçük olası değer,  $b$  değerleri ise en büyük olası değeri temsil etmekte ve üyelik fonksiyonlarının aşağıdaki gibi tanımlandığı kümeler üçgen bulanık sayılar denilmektedir (Erdin, 2019).

Üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonu tanımı denklem (1)'de verildiği gibidir (Elizabeth & Sujatha, 2013);

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

### 3.3.2. Bulanık CPM ve Doğrusal Programlama (Fuzzy Critical Path Method and Linear Programming)

CPM, projenin planlanması ve kontrolüne yardımcı olmak için tasarlanmış ağ tabanlı bir yöntemdir. Amacı, proje için zaman çizelgesi oluşturmak, projeyi tamamlamak için gereken toplam süreyi ve kritik yolu belirlemektir. Bir projenin birden fazla kritik yola sahip olabileceği unutulmamalıdır. Toplam süreyi belirlemenin ve kritik yolları bulmanın alternatif bir yolu LP tekniğini kullanmaktır (Chen, 2006).

Genel olarak klasik CPM probleminin amacı, bazı kısıtlara maruz kalan faaliyet sürelerinin doğrusal bir kombinasyonunun sağlanmasıdır. Bunu işlemde, 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 belirleyebilmektir (Chen & Hsueh, 2008).

$N$  düğümlü bir şebeke diyagramına sahip klasik CPM problemi Model 1'de, bulanık CPM problemi ise Model 2'deki gibi formüle edilmektedir. Amaç, proje ağının 1 nolu düğümünden  $n$  nolu düğüme kadar proje ağının maksimum (en uzun) süresine ulaşmaktır.

$$D = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1 \quad (5)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in A \quad (6)$$

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

Burada;  
 $N = n$  düğümlerinin kümesi  
 $(i,j) \in A$  = klasik serim kümesi  
 $T_{ij} = (i,j) \in A$  kümesinde tanımlanmış deterministik faaliyet süresi,  
 $x_{ij}$  = Bağımsız değişken

$$\bar{D} = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} = 1, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{kn} = 1 \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i,j) \in \bar{A} \quad (11)$$

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

Burada;  
 $N = n$  düğümlerinin kümesi  
 $(i,j) \in \bar{A}$  = bulanık serim kümesini,  
 $\bar{T}_{ij} = (i,j) \in \bar{A}$  kümesinde tanımlanmış bulanık faaliyet sürelerini  
 $x_{ij}$  = Bağımsız değişken

#### 3.3.3. Yager Sıralama Yöntemi (Yager Ranking Method)

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 basittir ve bulanık etkinlik sürelerinin üyelik işlevlerinin açık biçimini bilmeyi gerektirmemektedir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008). Yager "alan telafisi" kavramına dayanarak, bulanık kümeleri temsil etmek için alfa kesiminden konveks bulanık  $\bar{t}$  sayısı için sıralama indeksi  $I(\bar{t})$  Denklem (12) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{t}) = \int_0^1 \frac{1}{2} (t_a^L + t_a^U) d\alpha, \quad (12)$$

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

Kritik yolun bulunması probleminde  $m$  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.

Özetlemek gerekirse net formüller aşağıdaki gibi olacaktır.  $k$ . yola ait sıralama indeksi Denklem (13) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{D}^{(k)}) = I\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} x_{ij}^{(k)}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij})_{x_{ij}^{(k)}} \quad (13)$$

Proje tamamlanma süresine (maksimum süreli yol) ait yolun sıralama indeksi ise Denklem (14) ile elde edilmektedir.

$$I(\bar{D}^*) = \max_k \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij})_{x_{ij}^{(k)}} \right\} \quad (14)$$

Yager'in sıralama yöntemi kullanılarak bulanık sayıların net sayılara dönüşüm formülü LP ile modellendiğinde ise Model 2'de Denklem (14) yerine konularak Model 3 elde edilmektedir (Chen, 2006; Chen ve Hsueh, 2008).

$$I(\bar{D}^*) = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(\bar{T}_{ij})_{x_{ij}} \quad (15)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ki}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} = 1 \quad (18)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ veya } 1 \quad (i, j) \in \bar{A} \quad (19)$$

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

Burada;

$I(\bar{T}_{ij}) = \bar{T}_{ij}$  bulanık sayısının sıralama indeksi

$x_{ij}$  = Bağımsız değişken

$x_{ij}^{(k)}$  = k. yol bağımsız değişkeni

Not: k. yol üzerindeki faaliyetler için  $x_{ij} = 1$ , k. yola ait olmayan faaliyetler için  $x_{ij} = 0$  değerini almaktadır.

#### 3.3.4. Alfa Kesim Yöntemi (Alpha Cutting Method)

$\bar{T}_{ij} = (a, m, b)$  üçgen sayılı bulanık bir küme olsun.  $\alpha$ -kesim parametrelerinden elde edilecek yeni bulanık sayılar kümesi Denklem (20) ile tanımlanır (Elizabeth ve Sujatha, 2013; Chen, 2006).

$$(\bar{T}_{ij})_{\alpha} = [a^{\alpha}, b^{\alpha}] = [(m-a)\alpha + a, (m-b)\alpha + b], \quad \alpha \in [0, 1] \quad (20)$$

Proje süresi, her bir alfa kesim seviyesi için farklı şekilde tanımlanır. Bu nedenle, her bir kesim seviyesi için projenin toplam süresi de farklı olacaktır (Chen, 2006). Her bir belirsiz proje yolu  $\bar{D}$  için bu üyelik işlevi tanımı,  $\mu_{\bar{D}}((\bar{T}_{ij})_{\alpha}) \geq \alpha$  şeklinde ifade edilir (Chen, 2006).

#### 3.3.5. Alanların Merkezi Yöntemi (Center of Area Method)

Bulanıklaştırma biriminde giriş değişkenlerinin veya bulanık küme elemanlarının üyelik fonksiyonları 0 ile 1 aralığındaki üyelik dereceleri ile belirlenir (Kuzugüdenli, 2018). Bulanık değerlerin net değerlere dönüştürülmesi, durulama veya durulaştırma olarak tanımlanır. Durulaştırma biriminde kural tabanından çıkarım mekanizmasına gelen bulanık ifadeler, sayısal ifadelerle dönüştürülmektedir (Kuzugüdenli, 2018). Alanların merkezi yöntemiyle net sayı dönüşümü ise, Denklem (21) ile çıkarım biriminde elde edilen bulanık değerler ve üyelik fonksiyonları kullanılarak yapılmaktadır (Güvenç, vd., 2007).

$$z^* = \frac{\sum \mu_C(z).z}{\sum \mu_C(z)} \quad (21)$$

Burada;

$\mu_C(z)$  = üyelik derecesini,

$z$  = her bir etkinliğin bulanık süresi

$z^*$  = durulanan çıkarım değeri göstermektedir.

### 3.4. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

#### 3.4.1. Çözüm Algoritmaları ve Yöntemleri (Solution Algorithms and Methods)

İncelenen inşaat projesinde; projenin toplam süresi ve kritik yolunun bulunmasına ilişkin iki farklı çözüm algoritması sunulmuştur. Önerilen algoritmalar proje süresi ve kritik yolunun ilk olarak bulanıklaştırılmasını daha sonra elde edilen bulanık sonuçların net değer dönüşümünün yapılmasını içermektedir. 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. Aktivitelerin süreleri,  $(i, j) \in \bar{A}$  kümesinde üçgen tipi bulanık sayılarla tanımlanmıştır. Üçgen bulanık sayılarla temsil edilen faaliyetler kullanılarak projenin bulanık kritik yolu ve toplam süresi, bulanık CPM-LP modeli kullanılarak hesaplanacaktır. 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 ( $\alpha$ ) kesim yöntemi ( $\alpha$ -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 ( $\alpha$ ) 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 yolun 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 dönüşümü yapılacaktır. Böylece proje toplam süresi net bir değer olduğunda ne kadarlık bir süre farkı oluşturduğu ve proje kritik yolundaki değişimin sınılanması hedeflenmiştir.

Çözüm algoritmaları özetle şöyledir;

#### 1. Çözüm Algoritması

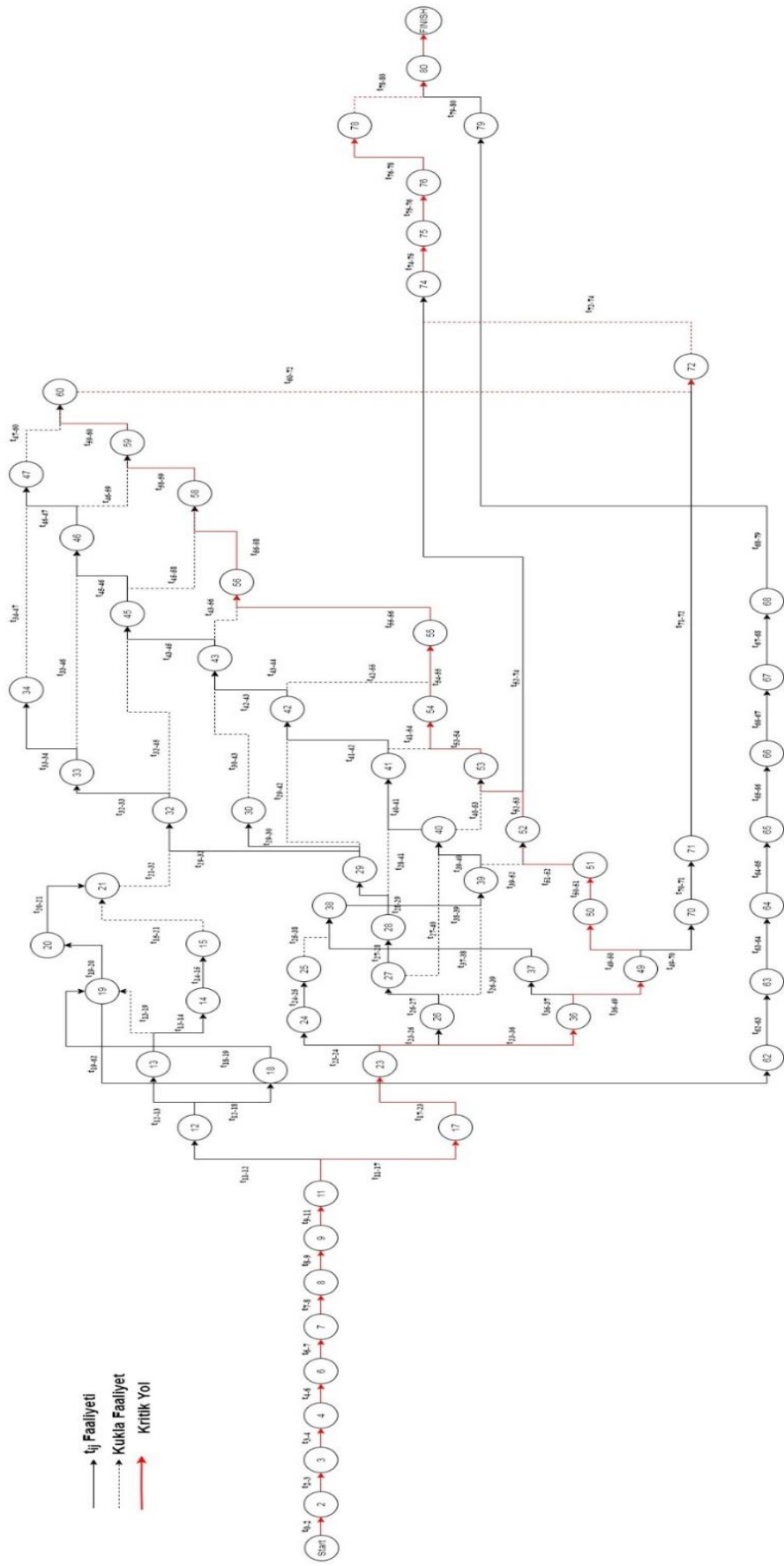
- Bulanık FCPM ile bulanık proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi
- Yager sıralama yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

#### 2. Çözüm Algoritması

- Alfa ( $\alpha$ ) kesim yöntemiyle bulanık proje sürelerinin ve kritik yolunun tespit edilmesi
- Alanların merkezi yöntemiyle net proje süresi ve kritik yolun tespit edilmesi

İnşaat projesi için proje ağ şeması Drawio programı ile görselleştirilmiştir (Şekil 1). Proje ağ diyagramı, toplam 66 adet düğüm ve 23 adet kukla faaliyetten oluşmaktadır. Amaç fonksiyonları POM-QM for Windows programı kullanılarak çözümlenmiştir. Hesaplamalara her bir faaliyet için üçgen bulanık sürelerinin atanması, öncüllük ilişkilerinin kurulması ve ağ diyagramının görselleştirilmesi ile başlanmıştır. Daha sonra proje kısıtları belirlenmiştir. Ağ diyagramı değişim göstermediği için LP modellerine ilişkin kısıtlar Model 1, Model 2 ve Model 3 içinde değişim göstermemiştir.





Şekil 1. Proje Şebeke (Ağ) Diyagramı (Project Network Diagram)

**Tablo 1.** Proje Faaliyet Süreleri ve Öncüllük İlişkileri (Project Activity Times and Precedence Relationships)

<b>FCPM-FAALİYET TABLOSU</b>						
t <sub>ij</sub>	Faal. No	Faaliyet Adı	Öncüller	En İyi (a) gün	Muhtemel (m) gün	En Kötü (b) gün
	1	<b>Hafriyat Öncesi İşlemler</b>				
t <sub>0-2</sub>	2	Aplikasyon		1,50	2,00	4,00
t <sub>2-3</sub>	3	Zemin Etüdü	2	1,00	1,00	2,00
t <sub>3-4</sub>	4	Proje Çizim ve Onayı	3	20,00	30,00	45,00
	5	<b>Toprak ve Temel Altı İşleri</b>				
t <sub>4-6</sub>	6	Hafriyat alınması	4	3,00	5,00	8,00
t <sub>6-7</sub>	7	Toprak Sıkıştırma ve Dolgu	6	1,00	2,00	4,00
t <sub>7-8</sub>	8	Blokaj	7	1,00	1,00	2,00
t <sub>8-9</sub>	9	Grobeton 10 cm	8	1,00	2,00	3,00
	10	<b>Radye Temel</b>				
t <sub>9-11</sub>	11	Kalıp işleri (Çakılması+Söküm)	9	3,00	5,00	9,00
t <sub>11-12</sub>	12	Demir Bağlama işleri	11	3,00	4,00	7,00
t <sub>12-13</sub>	13	Beton işleri (Yapı Denetim+Beton Dökülmesi+Priz süresi)	12	4,00	5,00	11,00
t <sub>13-14</sub>	14	Su Yalıtımı (Kanalizasyon Bağlantıları)	13	1,00	2,00	4,00
t <sub>14-15</sub>	15	Şap (Hatıl+Beton)	14	1,00	1,00	3,00
	16	<b>2.Bodrum (Sığınak)</b>				
t <sub>11-17</sub>	17	Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü)	11	6,00	10,00	19,00
t <sub>12-18</sub>	18	Demir Bağlama işleri	12	7,00	9,00	13,00
t <sub>18-19</sub>	19	Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi)	13*;18	7,00	10,00	18,00
t <sub>20-19</sub>	20	Dolgu (Kenarların doldurulması)	19	1,00	3,00	5,00
t <sub>20-21</sub>	21	Zemin Kaplama	15*;20	3,00	5,00	8,00
	22	<b>1.Bodrum Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)</b>				
t <sub>17-23</sub>	23	Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü)	17	15,00	20,00	28,00
t <sub>23-24</sub>	24	Demir Bağlama işleri	23	12,00	15,00	20,00
t <sub>24-25</sub>	25	Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi)	24	16,00	24,00	32,00
t <sub>23-26</sub>	26	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	23	7,00	10,00	15,00
t <sub>26-27</sub>	27	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	26	26,00	33,00	45,00
t <sub>27-28</sub>	28	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	27	8,00	10,00	15,00
t <sub>28-29</sub>	29	Şap işleri	28	1,00	3,00	5,00
t <sub>29-30</sub>	30	Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması	29	11,00	18,00	29,00
t <sub>29-32</sub>	32	Kaplama (Zemin+Duvar)	29;21*	7,00	10,00	15,00
t <sub>32-33</sub>	33	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	32	3,00	5,00	9,00
t <sub>33-34</sub>	34	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	33	11,00	15,00	18,00
	35	<b>Zemin Kat (2 Daire, 2 oda+1 salon+1 banyo)</b>				
t <sub>23-36</sub>	36	Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü)	23	15,00	20,00	28,00
t <sub>36-37</sub>	37	Demir Bağlama işleri	36	12,00	15,00	20,00
t <sub>37-38</sub>	38	Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi)	37;25*	16,00	24,00	32,00
8-39	39	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	38;26*	7,00	10,00	15,00
t <sub>39-40</sub>	40	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	39;27*	26,00	33,00	45,00
t <sub>40-41</sub>	41	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	40;28*	8,00	10,00	15,00
t <sub>41-42</sub>	42	Şap işleri	41;29*	1,00	3,00	5,00
t <sub>42-43</sub>	43	Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması	42;30*	14,00	18,00	32,00
t <sub>43-45</sub>	45	Kaplama (Zemin+Duvar)	43;32*	4,00	10,00	12,00
t <sub>45-46</sub>	46	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	45;33*	3,00	5,00	9,00
t <sub>46-47</sub>	47	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	46;34*	11,00	15,00	18,00
	48	<b>Normal Kat (Çatı Piyeli 3 oda+1 salon+2 banyo)</b>				
t <sub>36-49</sub>	49	Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü)	36	21,00	9,00	34,00
t <sub>49-50</sub>	50	Demir Bağlama işleri	49	15,00	9,00	23,00
t <sub>50-51</sub>	51	Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi)	50	22,00	30,00	38,00
t <sub>51-52</sub>	52	Duvar Örülmesi (Ara bölücü duvarlar)	51;39*	10,00	13,00	18,00
t <sub>52-53</sub>	53	Tesisat İşleri (Su+Elektrik+Doğalgaz)	52;40*	35,00	42,00	54,00
t <sub>53-54</sub>	54	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	53;41*	11,00	13,00	18,00
t <sub>54-55</sub>	55	Şap işleri	54;42*	4,00	6,00	8,00
t <sub>55-56</sub>	56	Kapıların ve Pencerelemlerin Takılması	55;43*	20,00	27,00	38,00
t <sub>56-58</sub>	58	Kaplama (Zemin+Duvar)	56;45*	10,00	13,00	18,00
t <sub>58-59</sub>	59	Boya İşleri (Astar+2 kat boya)	58;46*	6,00	8,00	12,00
t <sub>59-60</sub>	60	Aksesuarlar (Kombi+Petekler+Banyo aksesuarları)	59;47*	14,00	18,00	21,00
	61	<b>Merdiven</b>				
t <sub>19-62</sub>	62	Kalıp işleri (Çakılması+Sökümü)	19	19,00	20,00	32,00
t <sub>62-63</sub>	63	Demir Bağlama işleri	62	18,00	20,00	24,00
t <sub>63-64</sub>	64	Beton işleri (Yapı Denetim+ Beton Dökülmesi+Priz süresi)	63	57,00	65,00	75,00
t <sub>64-65</sub>	65	İç Sıva işleri (Çimento+Alçı)	64	17,00	20,00	24,00
t <sub>65-66</sub>	66	Şap işleri	65	7,00	10,00	15,00

Tablo 1. Devam (Continued)

t <sub>66-67</sub>	67	Boya İşleri	66	13,00	15,00	20,00
t <sub>67-68</sub>	68	Basamak Kaplama+Korkuluk	67	31,00	35,00	41,00
	69	<b>Çatı</b>				
t <sub>49-70</sub>	70	Karkas İmalatı	49	12,00	15,00	19,00
t <sub>70-71</sub>	71	İzolasyon	70	17,00	20,00	24,00
t <sub>71-72</sub>	72	Kaplama	71;60*	8,00	10,00	15,00
	73	Dış Cephe				
t <sub>52-74</sub>	74	Sıva İşleri	52;72*	13,00	15,00	19,00
t <sub>74-75</sub>	75	Yalıtım işleri	74	12,00	15,00	19,00
t <sub>75-76</sub>	76	Boya işleri	75	8,00	10,00	14,00
	77	<b>Bitim İşleri</b>				
t <sub>76-78</sub>	78	Korkuluklar (Balkon)	76	8,00	10,00	13,00
t <sub>68-79</sub>	79	Dış Kapılar	68	11,00	13,00	15,00
t <sub>79-80</sub>	80	Çevre Düzenlemesi	79;78*	23,00	26,00	29,00

Projeye ait kısıtlar aşağıdaki gibidir ve denklemler yukarıda Şekil 1'de gösterilen ağ diyagramı kullanılarak elde edilmiştir.

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

Çözümlemelere ilişkin izlenmiş olan adımlara şöyle devam edilmiştir;

#### Adım 1: Bulanık CPM-LP model çözümü

Kısıtları belirlenmiş olan proje için, POM-QM for Windows programında Model 2 çalıştırılarak en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık faaliyet süreleri kullanılarak proje kritik yolu ve süresi elde hesaplanmıştır. Daha sonra tüm veri girişleri lineer programlama modülü üzerinden girilerek ve modül çalıştırılmıştır. Model çözümünde kritik yol üzerinden bulunan faaliyetler için  $x_{ij}=1$ , kritik yol üzerinde olmayan faaliyetler için  $x_{ij}=0$  olmaktadır. Sırasıyla en iyi, muhtemel ve en kötü bulanık süreler için amaç fonksiyonları aşağıda verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Max } \bar{D}(\text{en iyi}) &= 1.5x_{0-2} + x_{2-3} + 20x_{3-4} + 3x_{4-6} + x_{6-7} + x_{7-8} + x_{8-9} + 3x_{9-11} + 3x_{11-12} + 4x_{12-13} + x_{13-14} + x_{14-15} + 6x_{11-17} + 7x_{12-18} \\
&+ 7x_{18-19} + 7x_{19-20} + 3x_{20-21} + 15x_{17-23} + 12x_{23-24} + 16x_{24-25} + 7x_{23-26} + 26x_{26-27} + 8x_{27-28} + x_{28-29} + 11x_{29-30} + 7x_{29-32} \\
&+ 3x_{32-33} + 11x_{33-34} + 15x_{23-36} + 12x_{36-37} + 16x_{37-38} + 7x_{38-39} + 26x_{39-40} + 8x_{40-41} + x_{41-42} + 14x_{42-43} + 4x_{43-45} + 3x_{45-46} \\
&+ 11x_{46-47} + 21x_{36-49} + 15x_{49-50} + 22x_{50-51} + 10x_{51-52} + 35x_{52-53} + 11x_{53-54} + 4x_{54-55} + 20x_{55-56} + 10x_{56-58} + 6x_{58-59} \\
&+ 14x_{59-60} + 19x_{19-62} + 18x_{62-63} + 57x_{63-64} + 17x_{64-65} + 7x_{65-66} + 13x_{66-67} + 31x_{67-68} + 12x_{49-70} + 17x_{70-71} + 8x_{71-72} + 13x_{52-74} \\
&+ 12x_{74-75} + 8x_{75-76} + 8x_{76-78} + 11x_{68-79} + 23x_{79-80}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Max } \bar{D}(\text{muhtemel}) &= 2x_{0-2} + x_{2-3} + 30x_{3-4} + 5x_{4-6} + 2x_{6-7} + x_{7-8} + 2x_{8-9} + 5x_{9-11} + 4x_{11-12} + 5x_{12-13} + 2x_{13-14} + x_{14-15} + 10x_{11-17} \\
&+ 9x_{12-18} + 10x_{18-19} + 3x_{19-20} + 5x_{20-21} + 20x_{17-23} + 15x_{23-24} + 24x_{24-25} + 10x_{23-26} + 33x_{26-27} + 10x_{27-28} + 3x_{28-29} + 18x_{29-30} \\
&+ 10x_{29-32} + 5x_{32-33} + 15x_{33-34} + 20x_{23-36} + 15x_{36-37} + 24x_{37-38} + 10x_{38-39} + 33x_{39-40} + 10x_{40-41} + 3x_{41-42} +
\end{aligned}$$

$18x_{42-43} + 10x_{43-45} + 5x_{45-46} + 15x_{46-47} + 9x_{36-49} + 9x_{49-50} + 30x_{50-51} + 13x_{51-52} + 42x_{52-53} + 13x_{53-54} + 6x_{54-55} + 27x_{55-56} + 13x_{56-58} + 8x_{58-59} + 18x_{59-60} + 20x_{19-62} + 20x_{62-63} + 65x_{63-64} + 20x_{64-65} + 10x_{65-66} + 15x_{66-67} + 35x_{67-68} + 15x_{49-70} + 20x_{70-71} + 10x_{71-72} + 15x_{52-74} + 15x_{74-75} + 10x_{75-76} + 10x_{76-78} + 13x_{68-79} + 26x_{79-80}$

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

Tablo 2' de görüldüğü gibi her üç süreye ilişkin projeye ait tek bir kritik yol tespit edilmiş ve proje süreleri (263,5, 321, 480 gün) olarak elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Bulanık CPM-LP Model Çözümleri (Fuzzy CPM-LP Model Solutions)

	Proje Süresi	Proje Kritik Yolu
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

## Adım 2: Yager sıralama LP model çözümlemesi

Yöntem, bulanık sürelerin net değer dönüşümlerini elde etmek amacıyla uygulanmıştır.  $\bar{A} = (a, m, b)$  üçgen bulanık sayılar kümesi olmak üzere, her faaliyet için sıralama endeksi Denklem (22) ile hesaplanır (Atlı ve Kahraman, 2013). Tablo 1'de verilmiş olan faaliyetlere ait sıralama endeksi  $I(\bar{T}_{ij})$  değerleri, Microsoft Excel programı kullanılarak tüm faaliyetler için hesaplanmıştır.

$$I(\bar{T}_{ij}) = \frac{a + m + b}{3} \quad (22)$$

Burada;

$\bar{T}_{ij}$  = ij faaliyetinin bulanık süresi

$x_{ij}$  = ij faaliyetinin karar değişkenini ifade etmektedir.

Model 3 kullanılarak POM-QM for Windows programına kısıtlar ve  $I(\bar{T}_{ij})$  değerleri girilerek devam edilmiş modelin lineer programla model çözümü yapılmıştır. Modele ait amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

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

$\text{Max } I(\bar{D}^*) = 354,84 \approx 355$  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 faaliyetleri kapsayacak şekilde oluşmuştur. Adım 2' de elde edilmiş olan (263,5 321, 480 gün) bulanık değer aralığına bakıldığında, net dönüşüm değeri olan 356 günün muhtemel ve en kötü süre aralığında kaldığı görülmektedir. Yöntem, alfa kesim seviyelerinden elde edilecek yeni faaliyet süreleri içinde uygulanabilmektedir.

**Adım 3:** Alfa kesim yöntemi çözümlemesi

Alfa kesim yöntemi kullanılarak net olmayan süreler 0 ile 1 arasında farklı seviyelerdeki güven aralıklarında temsil edilebilir.  $T_{ij}$ 'nin bulanık bir küme yerine net bir küme olduğu unutulmamalıdır (Chen, 2006). 0,1 artırımlarla [0 1] arası değerler için tüm alfa kesim faaliyet süreleri Denklem (20) ile hesaplanmıştır. Daha sonra her bir faaliyet için ortalama kesim süreleri Denklem (23) ile elde edilmiştir.

$$\bar{T}_{ij\alpha} = \frac{\bar{T}_{ij(1)}^\alpha + \bar{T}_{ij(2)}^\alpha}{2} \quad (23)$$

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 hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Model çözüm değerlerine bakıldığında [0 1] aralığında alfanın her 0.1 artırımında maksimum sürenin lineer olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca uygulama projesinde alfa kesim aralıkları için kritik yol değişim göstermemiştir. Bu durumlar her örnek vaka için değişkenlik gösterebilir. Her zaman aynı sonuçların elde edilmesi beklenemez (Chen, 2006). Çözümde, alfa kesim seviyelerindeki artırım oranları değiştirilerek daha hassas sonuçlar elde edilebilir.

**Tablo 3.** Alfa Kesim Yöntemi Hesaplamaları (Alpha Cut Method Calculations)

$\alpha$	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

**Adım 4:** Alanların merkezi yöntemiyle durulaştırma

Tablo 4'te üyelik dereceleri yani olasılık düzeyleri atanmış olan bulanık süreli proje tamamlanma sürelerinin durulaştırma işlemi Denklem (20) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen veriler Tablo 4'te sunulmuştur. Proje tamamlanma süresi  $336,22 \approx 336$  gün olarak elde edilmiştir. Bu değer alfa kesim aralıklarından 0,70-0,80 değeri arasında yer almaktadır. Proje kritik yolu aynı şekilde 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 olmaktadır.

**Tablo 4.** Durulaştırma Yöntemi Hesaplamaları (Defuzzification Methods Calculation)

$\mu_{T_{ij}}$ (Üyelik dereceleri)	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	

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Elde edilen bulgular ışığında bulanık ve net değer ile temsil edilen proje süre farkları dikkat çekici nitelikte olduğu görülmüştür. Ele alınan projede proje kritik yolu değişim göstermemiştir fakat bu durum her zaman beklenen bir durum değildir. Araştırma sonuçları incelendiğinde 450 günde yapımı tamamlanmış olan proje için; proje kritik yolunun 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 numaralı faaliyet adımlarından oluştuğu, bulanık proje süresinin maksimum 480 gün olduğu, net proje süresinin ise 336-355 gün arasında değişim gösterebileceği söylenebilir. Bu bağlamda proje yapım süresinin 480 güne daha yakın bir değerde olduğu görülmektedir.

Bulanık yaklaşımların eksik kaldığı noktalardan bazıları; yöntem seçimlerini, faaliyetlere atanması gereken üyelik derecelerinin belirlenmesini ve faaliyet sürelerinin hangi bulanık sayı tipiyle temsil edilmesi gerektiğini karar vericinin seçimine bırakmış olmasıdır. Yöntemin bu tür eksikliklere kesin cevaplar içermiyor oluşu yöntemin geliştirilmeye ihtiyaç duyabileceği gelişimlere açık olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen alternatif tekniklerle bu tür sorunların üstesinden gelinmeye çalışıldığı görülmektedir. Proje planlama alanında çok fazla tekniğin oluşu, optimal çözüm modelinin oluşturulmasında uygun tekniğin seçimi konusunun önemini ortaya koymaktadır. Çalışmada önerilmiş olan çözüm algoritmaları ışığında;

Birinci çözüm algoritması, bulanık CPM-LP için proje süresi 263,5,321,480 gün, kritik yolun 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 numaralı faaliyetlerden oluştuğu görülmüştür. Yager sıralama yöntemi belirsizliğin üyelik derecelerinin bilinmediği durumlarda net değer dönüşüne imkân vermektedir. Yager yöntemiyle net sayı dönüşümü yapılan bulanık çıkarım kümesi için proje süresi 355 gün, 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 olarak elde edilmiştir. Net sayı dönüşüm değerinin muhtemel ve en kötü süre aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Faaliyetlerin proje içerisinde üyeliğinin belirlenmesi konusunda alternatif teknikler olmasına karşın çoğunlukla geçmiş deneyimlerden yararlanılarak karar vericinin tercihi ihtiyacı duyulmaktadır. Bu bağlamda Yager sıralama yönteminin 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.

İkinci çözüm algoritması, Alfa kesim yöntemiyle [0,1] aralığında 0,1 artırımla yapılan çözümleme değerleri,  $\alpha$ , 0'dan 1'e doğru artarak ilerletilirken proje süresinin de azaldığı görülmektedir. Alfa kesiminden elde edilen bulanık çıkarım kümesine Alanların Merkezi yöntemi uygulanarak net değer dönüşümü yapılmış ve proje süresi 336 gün, 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 olarak elde edilmiştir. Bu değer  $\alpha = 0,7-0,8$  arasında kaldığı tespit edilmiştir. Alfa ( $\alpha$ ) 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 birisidir ve hesaplama formülünde görüldüğü gibi üyeliklerin ( $\mu$ ) bilinmesini gerektirmektedir. Üyelik dereceleri atanmış olan bulanık proje sürelerinin net değer dönüşümlerinde alternatif bir teknik olarak başarıyla uygulanmıştır.

**Tablo 5.** Hesaplama Sonuçları (Calculation Results)

1. Çözüm Algoritması			2. Çözüm Algoritması		
Bulanık CPM-LP model / gün		Yager Sıralama Yöntemi- LP model /gün	Alfa Kesim Yöntemi /gün		Durulaştırma- Alanların Merkezi Yöntemi /gün
En İyi Süre	Muhtemel	En Kötü Süre	$\alpha$	Proje Süresi	
263,5	321	480	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	

Uygulanmış olan tüm yöntemlere ait hesaplanan proje toplam süreleri yukarıda Tablo 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yöntemler arasında karşılaştırma yapabilmeye imkân sağlamaktadır. Tablo 5'te farklı yöntemler kullanılarak proje süresindeki değişimler gösterilmiştir. Farklı yöntemler kullanılarak en optimal proje süresinin hesaplanması proje yönetiminin ana kısıtlarından olan zamanı etkileyerek proje başarısına etki etmektedir. Proje toplam zamanın (en uzun yol süresi) daha gerçekçi hesaplanmasının projeye olan katkısı düşünüldüğünde proje süre ve maliyetini olumlu yönde etkileyebileceği söylenebilir.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Proje yönetiminin temel alanlarından birisi olan proje zaman yönetimi, faaliyetlerin (görevlerin) mümkün olan en kısa sürede tamamlanabilecek şekilde programlanması, uygulanması ve kontrolü ile ilgilidir (Karahana ve Ezin, 2014). İnşaat projelerinde her geçen gün artan belirsizlik ve karmaşıklık proje zaman planlamasının da kullanılan klasik yöntemlerin (CPM ve PERT) yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Günümüzde proje yöneticileri, projeler için etkinlik sürelerinin kesin (determinist) bir şekilde belirlenemediği, hatta üç farklı olasılığa dayalı hesaplama yapmaya imkân sağlayan, program değerlendirme ve gözden geçirme tekniğinin bile yetersiz kaldığı birçok durum ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu bağlamda proje yöneticileri gelişebilecek durumları değerlendirebilecekleri alternatif ve gelişmiş planlama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde yaşanan problemlerdeki zaman parametrelerinin belirsizliği, klasik yöntemlerin yerine bulanık CPM yani FCPM ve bulanıklığı konu alan yöntemlerin gelişmesine yol açmıştır (Elizabeth ve Sujatha, 2013).

Çalışma kapsamında incelenen Chen (2006), Chen ve Hsueh (2008) ve Durucasu vd. (2015)'nin çalışmalarında kullandıkları çözümlemelerin bulanık değerlerin elde edilmesi ve net dönüşüm ile bulanık sonuçların desteklenmesi temeli üzerine kurulduğu görülmüştür. Bu çalışmada öngörülen ve uygulanan bulanık çözüm algoritmaları bahsedilmiş olan çalışmalardan farklı olarak proje süre ile kritik yolun bulunması probleminde ilk olarak bulanık sonuçların elde edilmesi, daha sonra net değer sonuçlarının elde edilmesi yöntemi üzerine kurulmuştur. Böylece bulanık sonuçların desteklenmesi dışında her iki durum için oluşabilecek süre farklılıkları ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada maksimizasyon bağlamında çalıştırılan LP modelleri ve önerilen algoritma çözümlerinden elde edilen proje süre sonuçları; net ve bulanık sayılar söz konusu olduğunda proje süresinde oluşabilecek süre farklılığı, proje için söz konusu olabilecek belirsizlik durumlarını açıklayıcı nitelikte olduğu görülmüştür. 450 günde yapımı tamamlanmış olan inşaat projesinde, proje kritik yolu her iki çözüm algoritmasıyla analiz edildiğinde aynı sonucu vermiştir. Kritik yolda bir değişim olmaksızın bulanık proje süresinin maksimum 480 gün, net proje süresinin ise 336-355 gün arasında değişim gösterebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda proje yapım süresinin gerçekte 480 güne daha yakın bir değerde olduğu görülmektedir.

Önerilen çözüm algoritmalarında belirsizlik durumları ile baş edebilmek için kullanılan ve 3'lü süre tahminin yapıldığı klasik yöntemlerden olan PERT tekniğinin yerine daha fazla belirsizlik ve riske sahip olabileceği değerlendirilen inşaat projelerinde daha geniş bir olasılıksal yaklaşım sunan alfa kesim yönteminin daha yararlı olabileceği düşünülmüştür. Müteakip araştırmalarda daha hassas çözümlemeler elde edilebilmesi için Alfa ( $\alpha$ ) kesim aralıklarının değiştirilerek proje zaman planlamasının yeniden yapılabileceği ve önerilen yaklaşım ve yöntemlerde bulanık sayıların belirsizliğini temsil etmek için üçgen bulanık sayılardan farklı olarak yamuk, Gauss, L-R tipi, farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak araştırma alanının genişletilebileceği düşünülmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Altaş, İ.H., 1999. Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı. Enerji, Elektrik, Elektromekanik3e, Vol: 62, s.80-85.
- Athi, Ö., Kahraman, C., 2013. Fuzzy Critical Path Analysis, YTÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Journal of Engineering and Natural Sciences, Vol. 31, No. 2, pp. 128-140,
- Buckley, J.J., 1989. Fuzzy PERT, in Applications of Fuzzy Set Methodologies in Industrial Engineering, Elsevier, 115-125, Amsterdam
- Chanas, S., Zielinski, P., 2001. Critical Path Analysis in the Network with Fuzzy Activity Times. Fuzzy Sets and Systems, 122(2), pp. 195-204.
- Chen, C. T., Huang, S. F., 2007. Applying Fuzzy Method for Measuring Criticality. Information Sciences, 177(12), pp. 2448-2458.
- Chen, S. P., 2006. Analysis Of Critical Paths in A Project Network with Fuzzy Activity Times. European Journal of Operational Research, 183, pp. 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), pp. 1289-1297.
- Çolak, M., Kesik, Ş., Mutman, U. Aydın K., G., 2018. A Project Management Model for Investigation of a Construction Project

- International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 4(2), pp. 32-36.
- Durucasu, H., İcan, Ö., Yeşilaydın, G., Gülcan, B., Karamaşa, C., 2015. Bulanık CPM Yöntemiyle Proje Çizelgeleme: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama. Ege Akademik Bakış Dergisi, 15(4), s. 449-466.
- Dutta, P., Boruah, H., Ali, T., 2011. Fuzzy Arithmetic with And Without Using  $\alpha$ -Cut Method: A Comparative Study. International Journal of Latest Trends in Computing, 2(1), pp. 99-107.
- Elizabeth, S., Sujatha, L., 2013. Critical Path Problem Under Fuzzy Environment. International Journal of Computer Applications, 75(1), s. 7-11.
- Erdin, C., 2019. Bulanık Topsis Yöntemiyle Yönetici Seçimi. Yıldız Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 3(1), s. 37-50.
- Gencer, C. ve Türkbey, O., 2001. "Proje Tamamlanma Zamanının Bulunmasında İstatistiksel Analiz Yardımıyla Bulanık PERT, Klasik PERT ve Gerçek Dağılım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi,3:29-39
- Güvenç, U., Sönmez, Y., Birgül, S., 2007. Bulanık Mantık Denetimli DA-DA Çeviricileri İçin Geliştirilen Bir Eğitim Seti. Politeknik Dergisi, 10(4), s. 339-346.
- Hajdu, M., Isaac S., 2017."Sixty years of project planning: history and future," Organization, Technology and Management in Construction an International Journal vol 8(1), pp.1-12,
- Karahan, Y. D., 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.
- Koçak, Ç., Yiğit, T., 2020. Teknoloji Bağımlılığının Bulanık Mantık ile Sınıflandırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Special Issue: International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2020), s. 126-132.
- Kurij, K. V., Milajić, A. V., Beljaković, D. D., 2014. Analysis Of Construction Dynamic Plan Using Fuzzy Critical Path Method. Tehnika-Naše Građevinarstvo, 69(2), pp. 209-215
- Kuzugüdenli, E., 2018. Bulanık Mantık Yöntemiyle Kızılçamda Verimliliğin Modellenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6 (3), s. 426-434.
- Liberatore, M. J., 2008. Critical Path Analysis with Fuzzy Activity Times. IEEE Transactions on Engineering Management, 55(2), pp. 329-337.
- Madhuri, U., Saradhi, P. ve Shankar, R., 2014. "Fuzzy Linear Programming Model for Critical Path Analysis", International Journal of Contemporary Mathematical Sciences, 8:93-116
- Özcan, M., 2018. Bulanık Çıkarım Sistemi ile Bireysel Personel Performansının Değerlendirilmesinde Bir Uygulama. Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 19(2), s. 372-388.
- Özköse, H., Gencer, C., 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.
- Prade, H., 1979. Using Fuzzy Set Theory in a Scheduling Problem: A Case Study. Fuzzy Sets and Systems, 2(2), pp. 153-165.
- Temiz Kutlu, N., 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.
- Tiryaki, A. E., Kazan, R., 2007. Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellemesi. Mühendislik ve Makina, 48(565), s. 3-8.
- Uğural, M. N., Çağrı, Ş. (2020). İnşaat Sektöründe Kalite Maliyeti Entegre Edilmiş Kazanılmış Değer Analizi Üzerine Bir Uygulama. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 42-49.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, 8(3), 338-353.
- Zhang, H. C., Huang, S. H., 1994. A Fuzzy Approach to Process Plan Selection. The International Journal of Production Research, 32(6), 1265-1279.