

# Bulanık CPM Yöntemiyle Proje Çizelgeleme: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama

*Project Scheduling by means of Fuzzy CPM Method: An Implementation in Construction Sector*

Hasan DURUCASU<sup>1</sup>, Özgür İCAN<sup>2</sup>, Çağlar KARAMAŞA<sup>1</sup>,  
Gözde YEŞİLAYDIN<sup>3</sup>, Bayezid GÜLCAN<sup>4</sup>

## ÖZET

Bu çalışma; gerçek bir inşaat projesinin kritik yolunun ve tamamlanma süresinin bulanık faaliyet süreler söz konusu olduğunda nasıl hesaplanabileceğinin gösterilmesi ve literatürde sık kullanılan durulaştırma yöntemlerinden  $\alpha$ -kesim ve ağırlık merkezi yöntemlerinin bu problem özelinde karşılaştırılması amacını gütmektedir.

Çalışmada faaliyetlere ilişkin süreler, kesin sayılar yerine üçgen-sel bulanık sayılar şeklinde belirlenmiş, ağ diyagramı Graphviz yazılımı ile görselleştirilmiş, kritik yolun ve proje tamamlanma süresinin bulunması için AMPL cebirsel modelleme diliyle şebeke tipi matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Projeye ilişkin kritik yol ve tamamlanma süresi  $\alpha$ -kesim yaklaşımı ve yaygın kullanılan durulaştırma tekniklerinden olan ağırlık merkezi yöntemiyle bulunarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca bulanık sayıların sıralama yöntemlerinden olan Yager metoduyla sürenin doğruluğu sınanmıştır. İnsana bağlı faaliyetlere ilişkin sürelerin kesin olarak bilinmesinin mümkün olamayacağı düşüncesinden yola çıkılarak, literatürde sıklıkla kullanılan klasik CPM yöntemi yerine bulanık CPM yönteminin, kesin sayılar yerine bulanık sayıların kullanılması çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca gerçek bir inşaat projesinin analiz edilmesi çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Proje Yönetimi, Proje Çizelgeleme, Kritik Yol, Bulanık CPM, Bulanık Doğrusal Programlama

## ABSTRACT

This study aims to show how to calculate the critical path and completion time of a real construction project when there exists fuzzy times and aims to compare clarifications methods of  $\alpha$ -cut and centroid method concerning this construction problem.

In this study, durations related to the activities are specified as triangular fuzzy numbers instead of crisp numbers. Project network diagram depicted with Graphviz software after specifying precedence relationships. For the purpose of finding project completing duration, a network type mathematical programming model is developed with AMPL algebraic modeling language. To find critical path and duration, it is utilized from  $\alpha$ -cut method for different  $\alpha$  levels and centroid method which is one of the most widely used clarification method for fuzzy numbers in the literature. Otherwise with Yager's ordering method, verification of critical duration is done. It is not possible to know exactly durations of activities which depend on human. Thus, using fuzzy CPM method instead of classical CPM which commonly used in the literature and using fuzzy numbers instead of crisp numbers reveal the importance of this study. Furthermore analyzing a real construction project composed originality of the study.

**Keywords:** Project Management, Project Scheduling, Critical Path, Fuzzy CPM, Fuzzy Linear Programming

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda proje yönetimi, birçok iş kolunda rekabet avantajı olarak görülmektedir. Rekabet ortamında pazar payını arttırmak ve kalıcılığı sürdürebilmek adına işletmelerin projeleri iyi bir şekilde planlaması, faaliyetleri ve faaliyetlere ilişkin süreleri doğru belirlemesi önemli hale gelmektedir. Proje yönetiminde kullanılan en temel araçlardan biri proje çizelgelemedir. Proje çizelgeleme, faaliyetlerin izlenmesi ve kontrol edilmesi açısından yardımcı bir araçtır. Proje çizelgeleme ile faaliyetlerin mantıksal sıralaması yapılmakta, başka bir ifadeyle öncüllük ilişkilerine bakılarak bu

faaliyetlerin sürelerinden hareketle projenin kritik faaliyetleri ve tamamlanma süresi hesaplanmaktadır. Proje çizelgelemedeki ilk adım faaliyetlerin birbirleri ile olan öncüllük ilişkileri doğrultusunda projeyi bir bütün olarak ağ diyagramıyla gösterebilmektir. Ağ diyagramı sayesinde hangi faaliyetin önce veya sonra geleceği kolaylıkla takip edilebilmektedir. Bu aşamadan sonra projenin kritik yolunun belirlenmesi ve tamamlanma süresinin hesaplanması gerekmektedir.

Artan ürün çeşitliliği ve ürünlerin yaşam süresindeki kısalma, belirsizlik ortamında planlama ve dolaşımıyla çizelgelemeyi zorunlu kılmaktadır. Proje çizel-

<sup>1</sup> Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü,

<sup>2</sup> 19 Mayıs Üniversitesi İ.İ.B.F. Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü,

<sup>3</sup> Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Sağlık Yönetimi Bölümü,

<sup>4</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi İ.İ.B.F. İşletme Bölümü

geleme konusundaki çalışmalar çoğunlukla deterministik yapıdır. Proje çizelgeleme problemlerindeki belirsizliğin üstesinden gelebilmek amacıyla kullanılacak çözüm yöntemlerinden olan bulanık küme teorisi 1965 yılında Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bu teori bireyselliğin ve belirsizliğin üst düzeyde olduğu modele yönelik çözüm sunan bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında da faaliyet sürelerini klasik CPM'deki gibi kesin sayılar yerine bulanık sayılarla ele alan bulanık CPM yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada ele alınan proje çizelgeleme problemine ilişkin geliştirilen (Activity-On-Arc tipindeki) ağ diyagramında 69 düğüm ve 33 sanal faaliyet bulunmaktadır. Faaliyetlere ilişkin süreler, kesin sayılar yerine üçgensel bulanık sayılar olarak belirlenmiştir. Bu sayede her bir faaliyete ilişkin sürelerin tahminlemesinin daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirileceği düşünülmektedir. Çalışmanın amacı; bulanık sayıların kesin sayılara dönüştürülmesinde öncelikle Chen'in klasik CPM'e yönelik getirmiş olduğu  $\alpha$ -kesim yaklaşımının değişik  $\alpha$  seviyeleri için kullanılması, sonrasında literatürde yaygın olarak kullanılan durulaştırma tekniklerinden ağırlık merkezi yönteminden yararlanılarak karşılaştırmalı olarak projenin kritik yolunun ve tamamlanma süresinin bulunmasıdır.

Ele alınan proje gerçek bir inşaat projesi olup, çalışmanın birinci bölümünde proje çizelgeleme, bulanık proje çizelgeleme, bulanık küme teorisi ve bulanık doğrusal programlamaya ilişkin literatür bilgileri, ikinci bölümünde ele alınan inşaat projesine ilişkin uygulama bilgileri, üçüncü bölümde uygulamaya ilişkin çözümler ve son bölümde sonuç ve öneriler yer almaktadır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmanın bu bölümünde proje çizelgeleme, bulanık proje çizelgeleme, bulanık küme teorisi ve bulanık doğrusal programlama hakkındaki literatür taramasına yer verilmiştir.

### 2.1. Proje Çizelgeleme

Geçmişten günümüze dek iş dünyasında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri bir dizi faaliyetin bir amaç doğrultusunda uygun bir biçimde bir araya getirilmesi ve mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi problemidir. Proje kavramının ve proje yönetimi disiplininin ortaya çıkmasıyla sonuçlanan bu arayış, günümüzde hayli revaçta bir yaklaşım olan proje bazlı iş modeline dönüşmüştür. Öyle ki; işletmeler projeler yardımıyla inovasyon yapabilmekte; bu amaçla sektör ayrımı yapılmaksızın her alanda projeler önem kazanmaktadır. Söz konusu projelerin yönetiminde belli esasları temel alan yöntem ve teknikler de böylelikle popülerliğini korumaktadır.

Proje, bir amaca ulaşmak için insan kaynağının ve insan dışı kaynakların belirlenmiş sınırlı bir zaman aralığı ve bütçe içinde bir organizasyon dahilinde bir araya getirildikleri, projenin bitiminde ise başka yerlere tahsis edildikleri bir süreç olarak tanımlanabilir (Kurt, 2006; Sönmez, 2007; Kolaylıoğlu, 2006). Proje yönetimi literatüründe yer alan diğer yaygın bir tanıma göreyse, belirlenmiş bir hedefi ya da amacı gerçekleştirmek üzere belirli bir zaman kısıtı ve bütçe dahilinde, işletmenin ya da yönetimin istedikleri özellikler doğrultusunda tamamlanması gereken özgün, karmaşık, birbirleriyle bağlantılı faaliyetler bütünüdür. (Suvacı vd., 2013). Bu tanımlardan da anlaşılacağı üzere her proje bir ihtiyaca cevap veren ya da belirlenen bir amacı gerçekleştiren, belirli bir zaman aralığında başlangıç ve bitiş süreleri bulunan, geçici bir süre için gerçekleşen, kaynak tüketen ve kendine özgü özelliklere sahip olan bir süreçtir.

Projelerin en önemli amaçlarından biri işletmeye ya da yönetime fayda sağlamak, bir ihtiyacı gidermek ya da karşılaşılan mevcut bir probleme çözüm geliştirmektir (Kurt, 2006). Başarılı bir projenin belirlenen maliyet, zaman ve performans kısıtları içinde işletme yöneticilerini hedeflere ulaştırmış olması gerekmektedir.

Projeler birbirinden farklı pek çok faaliyeti içermektedir. Bu faaliyetlerin bazıları birbirinden bağımsız iken, bazı faaliyetlerin gerçekleşmesi ise bir başka faaliyetin başarıyla tamamlanmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Faaliyetlerin bahsedilen bu bağımlılık ilişkilerinin yanı sıra sınırlı kaynak kullanarak ve belirli bir zaman diliminde ve belirli bir bütçe ile gerçekleştirilmeleri gerekir.

Bu özelliklerinden dolayı başarılı bir projenin çok iyi bir planlama sürecinden geçmesi, faaliyetlerin ilişkilerinin ve sürelerinin belirlenmesi ve öncelik ilişkisi doğrultusunda sıraya konulması, uygulama aşamasında ve sonrasında kontrol edilmesi gerekmektedir. Kısacası projelerin doğru bir şekilde yürütülmesi oldukça önemlidir (Kurt, 2006; Vatansver, 2008).

Proje yönetimi; performans, kalite, maliyet ve zaman kısıtları altında hedeflere ulaşmak için faaliyetlerin planlanması ve mevcut kaynakların en verimli şekilde kullanılması sürecidir (Sönmez, 2007; Kurt, 2006; Kolaylıoğlu, 2006). Başka bir ifade ile proje yönetimi; projenin hedeflerine ulaşması, ilgili tarafların gereksinim ve beklentilerinin karşılanması için tüm kaynakların (bilgi, beceri, personel, araç, gereç, vb.) proje faaliyetlerine aktarılmasıdır (Liu, Yang ve Lin, 2010). Proje yönetimi; projenin fikir aşamasından itibaren başlamakta ve projenin tamamlanmasına kadar geçen tüm faaliyetlerin planlanması, uygulanması ve kontrolü faaliyetlerini kapsamaktadır (Suvacı vd.,

2013; Aydın vd., 2012).

Proje yönetimi alanındaki çalışmalar İkinci Dünya Savaşı sonrası hız kazanmıştır. Savaş sonrası özellikle savunma sanayisinde yaşanan büyük gelişmeler neticesinde silah sistemleri ile ilgili yürütülen projelerin en iyi şekilde yönetilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır (Çubukçu, 2008). İzleyen süreçte; yöneticiler için proje yönetimi yalnızca savunma sanayisinde değil, diğer sektörlerde de oldukça ilgi çeken bir yaklaşım haline gelmiştir.

Proje yönetiminin en önemli alanlarından biri projenin çizelgelenmesidir (Soltani ve Haji, 2007). Çizelgeleme, projelerin planlanması ve yönetim tarafından verilecek karar aşamalarında projenin etkinlik ve verimliliğini belirleyen önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır (Paksoy, 2007). Günümüzde her geçen gün ürün çeşitliliğinin artması dolayısıyla ürün ömürlerinin kısalması ile her projede farklı faaliyetler ve faaliyet süreleri ile uğraşmaktadır. Bu amaçla belirsizliklerle dolu bu sürecin planlanması, yönetilmesi ve doğru bir şekilde çizelgelenmesi çok önemlidir (Kökçam ve Engin, 2010).

Çizelgeleme problemlerinin başta üretim ve lojistik sistemlerinin planlanması olmak üzere geniş bir alanda ortaya çıktığı görülmektedir. Bu problemlerin birçoğu NP-zor (Nondeterministic Polynomial Time) problemlerdir. Projeler, çizelgeleme literatüründe  $P \infty | \text{prec} | C \text{max}$  notasyonu ile ifade edilen öncelik kısıtlarına maruz "sonsuz" paralel makine veya kaynağa sahip çizelgeleme problemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Pinedo, 2012).

Proje çizelgeleme; belirli amaçlar doğrultusunda mevcut olan kısıtlı kaynakların kullanımı ile yerine getirilmesi gereken faaliyetlerin gerçekleştirilmesi ve kaynakların faaliyetlere zamana bağlı olarak tahsisi için program yapılmasıdır (Paksoy, 2007; Kökçam ve Engin, 2010). Diğer bir deyişle; proje çizelgeleme problemi toplam maliyeti ve projenin tamamlanma süresini dengelemek amacıyla tahsis edilen kaynakların çizelgelenmesidir (Ke ve Liu, 2010; Zhang ve Chen, 2012; Liu, 2009).

Proje çizelgelemede; projede yer alan faaliyetler arasındaki öncelik ve sıra ilişkilerinin belirlenmesi, projenin geneline ya da projede yer alan her bir faaliyete tahsis edilecek bütçe ve kaynak kısıtlarının saptanması ve projedeki her bir faaliyetin süresinin hesaplanması işlemlerinin yapılması gerçekleşir (Kurt, 2006). Bu amaçla proje çizelgeleme faaliyetlerine öncelikle günlük çalışma saatlerinin, haftalık çalışma günlerinin, tatillerin vb. belirlenmesi yani çalışma takviminin hazırlanması ile başlanır. Projeye ilişkin faaliyetlerin ne kadar süreceği tahmin edilir, faaliyetlerin

arasına, öncelik ilişkilerine ve faaliyet sürelerine göre oluşturulan çalışma takviminin de katkısıyla projenin çizelgelenmesi yapılır (Kökçam ve Engin, 2010).

Projelerin çizelgelenmesindeki amaç; projenin tamamlanma süresinin belirlenmesi, projenin zamanında bitmesini sağlamak amacıyla hangi faaliyetlerin kritik olduğunun tespit edilmesi, gerektiğinde projenin tamamlama süresini geciktirmeden hangi faaliyetlerin ne kadar süre için ertelenebileceği, faaliyetlerin ne zaman başlayacağını ve ne zaman sonlanacağını belirlenmesi, projenin herhangi bir anında ne kadar para harcanması gerektiği ve bazı faaliyetlerin hızlandırılması için fazladan harcama yapmaya değer olup olmayacağını tespitidir (Kurt, 2006; Kolaylıoğlu, 2006). Proje ne kadar iyi çizelgelenirse, yöneticilerin vereceği kararların, yönetimin ve uygulayıcıların etkinlik ve verimliliği de o derece iyi olacaktır (Paksoy, 2007).

Projelerde yer alan faaliyetlerin çizelgelenmesinde genellikle üç yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar; Gantt Şeması, CPM-Kritik Yol Metodu (Critical Path Method), PERT- Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Metodudur (Program Evaluation and Review Technique) (Kurt, 2006; Vatansever, 2008; Kökçam ve Engin, 2010; Kolaylıoğlu, 2006; Sönmez, 2007; Soltani ve Haji, 2007). Bu yaklaşımların ortak amacı, projenin toplam süresinin en aza indirgenmesidir. Bunların dışında PEP-Proje Değerlendirme Prosedürü (Project Evaluation Procedure), LESS - En Düşük Maliyet Tahmini ve Programlaması Tekniği (Less Cost Estimating and Scheduling), GERT- Grafik Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (Graphical Evaluation and Review Technique) ve PDM- Öncelik Diyagram Yöntemi (Precedence Diagramming Method) de bu alanda ve özellikle iş süreçlerinin modellenmesinde kullanılabilir yaklaşımlardandır (Spinner, 1997).

Bahsedilen bu yaklaşımların hepsinde bulanık olmayan durumlar yani deterministik karar ortamları söz konusudur. Bulanık olan yaklaşımlarda ise bulanık proje çizelgeleme yöntemi kullanılmaktadır.

## 2.2. Bulanık Proje Çizelgeleme

Gerçek hayatta karşılaşılan olayların ya da durumların birçoğu çeşitli açılardan belirsiz olabilir. Özellikle bilgi eksikliği nedeniyle bir sistemin mevcut durumu net bir şekilde bilinemeyebilir veya ifade edilemeyebilir. Olayların ya da durumların ifade edilmesinde kullanılan kelimelerin, tanımlamaların, bilgilerin içerdiği belirsizlik literatürde "bulanıklık" (fuzziness) olarak isimlendirilir (Dönmez, 2007).

Gerçek hayat uygulamalarında projeye ilişkin faaliyetlerin tam olarak ne kadar sürede tamamlanabileceklerinin bilinmesi ya da tahmin edilmesi mümkün

olmayabilir. Diğer bir deyişle faaliyetler ya da faaliyetlere ilişkin sürelerle ilişkin tahminler belirsiz olabilir veya çok sayıda uzmandan aynı faaliyet için istenen tahminler farklılık gösterebilir. Dolayısıyla proje çizelgeleme problemlerinde faaliyet süresi tahminlerinden kaynaklanan belirsizlikler oluşabilir (Liu, 2009; Zhang ve Chen, 2012; Liu, Yang ve Lin, 2010; Ke ve Liu, 2010; Ke ve Liu, 2007). Böyle durumlarda belirsizliklerle dolu olan problemlerin çözümünde kullanılacak en iyi yaklaşımlardan biri olarak bulanık küme teorisinden faydalanılabilir (Herroelen ve Leus, 2005).

Zadeh tarafından 1965'te ortaya atılan bulanık küme teorisi birçok farklı bilimsel alanda yeni bir ufuk açmıştır. 20 yıldan daha uzun bir zaman önce ortaya çıkan bulanık küme teorisi beklenmeyen bir gelişme göstermiş (Yalaoui vd., 2010) ve o zamandan günümüze kadar karar verme, matematiksel programlama ve regresyon analizi gibi birçok teknikle melez bir biçimde uygulama alanı bulmuştur (Çubukçu, 2008). Bulanık küme teorisi, karar parametrelerindeki belirsizlik ve uzmanların zihinsel modelleri kullanımı ile çizelgeleme problemlerinin gerçek hayata adapte edildiği bir yaklaşım olarak kullanılmıştır (Soltani ve Haji, 2007). Bulanık küme teorisi belirsizlikler nedeniyle tanımlanması zor olan sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Kesin bilginin olmadığı ve öznelliğin bulunduğu bir modelin formüle edilmesi ile ilgili bir yöntemdir. Kısacası, belirsizliklerin olduğu bir problemin en uygun çözümünü bulmak için yardımcı olarak kullanılabilir bir tekniktir (Guiffreda ve Nagi, 1998; Pan ve Yeh, 2003). Bulanık küme teorisi ve bulanık sayıların kullanılması sonucu karar vericilerin hem iyimser hem de kötümser görüşlerinin alınması ile faaliyet sürelerinin daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesi sağlanabilir (Carlsson, 1984; aktaran Pan ve Yeh, 2003).

Bulanık küme teorisi, proje çizelgeleme problemleri için ilk kez 1979'da Prade tarafından uygulanmıştır (Prade, 1979; aktaran Pan ve Yeh, 2003). Proje çizelgeleme ile ilgili olarak yapılan çalışmalar çoğunlukla, problem ile ilgili tüm bilgilerin bilindiği, problemin deterministik ortamda çalıştığı varsayımına dayanmaktadır. Araştırmacılar, faaliyet süreleri belli olan proje çizelgeleme problemleri üzerine çalışmışlardır. 1961'de Kelley, bir proje çizelgeleme problemi için matematiksel bir temel oluşturmuş ve proje maliyeti ve faaliyet süreleri arasında fonksiyonel bir ilişki sunmuştur. 1963 yılında ise toplam maliyeti en aza indirmek amacıyla deterministik proje çizelgeleme problemlerine bir yaklaşım formüle etmiştir. Sonrasında birçok araştırmacı, belirli faaliyet süreleri ile proje çizelgeleme problemi çalışmalarına katılmışlardır (Ke ve Liu, 2010; Ke ve Liu, 2007; Zhang ve Chen, 2012).

Projelerde yer alan faaliyetler önceden birkaç kere

tekrarlandıysa ya da faaliyet sürelerine ilişkin veriler varsa faaliyet sürelerine ilişkin belirsizlik, olasılık dağılımları yardımıyla belirlenebilir (Ke ve Liu, 2010). Ancak istatistiksel verilerin olmadığı, bazı faaliyet sürelerine ilişkin olasılık dağılımlarının bilinmediği ya da kısmen bilindiği, projeye ilişkin bazı faaliyetlerin daha önce kullanılmadığı bazı durumlarda proje çizelgelemedeki faaliyet süreleri uzmanlar ya da proje yöneticilerinin deneyimleri tarafından bulanık değişkenler olarak belirlenebilir (Zhang ve Chen, 2012). Bulanık değişkenler kullanılarak faaliyet süresinin belirlenmesi durumunda olasılık teorisi yerine Zadeh tarafından tanımlanan bulanık küme teorisi kullanılabilir (Zadeh, 1965; aktaran Ke ve Liu, 2007).

Bulanık proje çizelgeleme ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, Ke ve Liu, 2004 yılında bulanık proje çizelgeleme problemlerinin çözümü için bulanık beklenen maliyet azaltma modeli, bulanık alfa-maliyet azaltma modeli ve güvenilirlik maksimizasyon modeli olmak üzere üç çeşit bulanık model sunmuştur (Ke ve Liu, 2010). Chen ve Huang (2007), bulanık faaliyet sürelerinin olduğu bir proje ağındaki kritikliği ölçmek amacıyla bulanık faaliyet zamanının değerlendirilmesine yönelik analitik bir yöntem sunmuşlardır. Liang (2009), çok amaçlı proje yönetimi problemlerinin çözümü için iki aşamalı bir bulanık programlama yaklaşımı geliştirmiştir. Chen (2007), bulanık sayılar kullanılarak oluşturulan bir proje ağındaki kritik yolun bulunmasında proje süresinin alt ve üst sınırlarını hesaplamak için doğrusal programlama formülasyonu uygulamıştır. Wang ve Hao (2007), PERT tekniği için bulanık dilsel bağlam kullanmışlardır. Bu modelde her bir faaliyet süresi, bulanık dilsel tanımlamalar kullanılarak belirlenmiştir (Wang ve Hao, 2007). Dubois ve Prade (1988), bir proje ağındaki her bir faaliyetin en geç başlama süresini hesaplamak için bulanık aritmetik işlemler modeli geliştirmiştir (Shankar, Sireesha ve Rao, 2010). Yao ve Lin (2000), bir bulanık proje ağına ilişkin kritik yolu bulmak amacıyla bulanık sayıların sıralanması ile ilgili bilgileri kullanmışlardır.

Shankar, Sireesha, Rao ve Vani (2010) tarafından bulanık CPM ile ilgili yapılan çalışmada, faaliyetlere ilişkin süreler yamuk bulanık sayılar ile ifade edilmiş; bulanık proje ağına ilişkin kritik yolun bulunmasında Chen ve Cheng (2005) tarafından önerilen "metrik mesafe sıralaması (metric distance ranking)" analitik yöntemi kullanılmıştır. Belirli zamanda bulanık bir projenin tamamlanma olasılığı metrik uzaklık sıralama metodu ve işaretli uzaklık sıralama metodu kullanılarak farklı sayıda faaliyete sahip 12 değişik proje kümesi için hesaplanmış ve önerilen yöntemin faaliyetlerin kritikliğinin belirlenmesi, kritik yolun bulunması ve belirli zamanda bulanık projenin tamamlan-

masında daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Havaalanlarının yer hizmetlerine ilişkin kritik işletme süreçlerinde bulanık CPM yönteminin nasıl kullanıldığını göstermek amacıyla Han, Chung ve Liang (2006) tarafından yapılan çalışmada da benzer şekilde faaliyet süreleri yamuk bulanık sayılar ile ifade edilmiştir. Taiwan'ın Chiang Kai-Shek (CKS) uluslararası havaalanı kargo terminalinin yer işlem ağının bulanık kritik yol analizini gerçekleştirmek için Liang ve Han'ın (2004) önerdiği bulanık kritik yol algoritmasından yararlanmışlardır. Karar vericinin karar sürecine yönelik risk tutumunu ele alan bu yöntem sonucu havaalanının yer işlem modelinin karmaşıklığı azaltılarak havaalanı kargo taşıma süreçlerinin yeniden tasarlanmasıyla yük hizmet performansı artırılmıştır.

Hsiau ve Lin (2009), tesis inşaatına ilişkin proje çizelgeleme problemi ile ilgili yapmış oldukları çalışmada yamuk bulanık sayılar ile bulanık PERT yöntemini kullanmışlardır. Çok sayıda faaliyet içeren ve belirsiz kaynak kapasitesi nedeniyle bulanık faaliyet sürelerine sahip olan petrokimyasal tesis inşaat proje çizelgeleme problemine yönelik olarak geleneksel bulanık PERT'in zorluklarının üstesinden gelecek şekilde genişletilmiş bulanık PERT yönteminden yararlanmışlardır. Çalışma hacimleri, kaynak miktarı ve bulanık kaynak kapasitesi bağlamında işlemlerin bulanık süreleri değerlendirilmiş, her faaliyetin uygun en erken başlangıç zamanlarını belirlemek için bulanık öncül faaliyet zamanlarının kıyaslanmasında maksimum alfa kesim yönteminden yararlanılmış, bulanık en geç başlama zamanlarının hesaplanmasında bulanık cebir yöntemi kullanılmış ve proje çizelgeleme riskinin ölçülmesinde proje çizelgeleme risk indeksi geliştirilerek tesis inşaat proje çizelgeleme yönetimi desteklenmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

Atlı ve Kahraman (2012) bulanık kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemine yönelik bulanık paralel kanguru ve minsack çizelgeleme yönteminden yararlanmışlardır. Kaynak kısıtları altında minimum proje planlama zamanının amaçlandığı çalışmada yamuk bulanık sayılar kullanılmış, Activity-On-Arc gösteriminden yararlanılmış ve iki yöntemin karşılaştırması yapılmıştır.

Shankar, Sradhi ve Babu (2013) bulanık koşullar altında proje ağının kritik yolunu bulmak için bulanık sayıların orijinal noktasından uzaklığına göre merkezleri merkezi yöntemini kullanarak bulanık sayıları sıralamışlardır. Önerilen yöntem farklı üyelik fonksiyonlarına sahip kesin sayıları içerecek şekilde tüm bulanık sayı türlerini sıralayabilmektedir. Önerilen yöntem Liang ve Han'ın (2004) mevcut yönteminden alınan sayısal bir örnekle gösterilmiş ve mevcut yöntem ile

önerilen yöntemin eş sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Faaliyet sürelerinin tahmin edilmesinde kullanılan CPM, PERT ve GERT gibi metotlar gerçek hayatta yer alan projelerin modellenmesinde birtakım eksikliklere sahiptirler (Soltani ve Haji, 2007). Bu amaçla CPM ve PERT modelleri için bulanık zaman parametreleri kullanılarak bu eksiklikleri giderilmeye çalışılmıştır (Hapke ve Slowinski, 1996). Literatüre bakıldığında PERT metodu ile ilgili yüzlerce çalışmanın yapıldığı görülmektedir ancak 1970'lerin ikinci yarısından sonra proje analizlerinde bulanık PERT ya da bulanık CPM isimli yeni bir yaklaşımın doğduğu gözlemlenmektedir. Bulanık PERT ya da bulanık CPM yönteminde faaliyet sürelerinin modellenmesi için bulanık sayılar (bulanık küme teorisi) kullanılmaktadır (Chanas ve Zielinski, 2001). Chanas ve Kamburowski (1981) tarafından geliştirilen bulanık PERT (FPERT) tekniğinde projenin tamamlanma süresi zaman uzayında bulanık kümelerin bir şekli olarak sunulmuştur. FPERT tekniği dışında 1983 yılında Gazdik (1983) tarafından FNET ismi verilen bulanık bir ağ geliştirilmiştir. Bu ağda proje süresinin ve kritik yolun hesaplanması için bulanık cebirsel operatörler kullanılmıştır (Soltani ve Haji, 2007). Bu tekniklerin dışında kullanılan diğer bir yöntem de Bulanık Kritik Zincir (FCC) çizelgeleme yöntemidir. Bu yöntemde projenin tamamlanmasında hem öncelikler hem de kaynak bağımlılığı olan faaliyetler sıralanmaktadır (Liu, Yang ve Lin, 2010).

Görüldüğü gibi bulanık teoriye dayalı yöntemlerin temel avantajlarından biri bulanık teoremin önceden öngörülebilir düzenlilikler ya da frekans dağılımları gerektirmemesidir. Faaliyetlerin bulanık sayılar ile temsil edildiği ve kesin olmayan en son başlama zamanlarının olası değerlerine ilişkin aralıkların hesaplanmasına yönelik problemler geçmişten günümüze dek yoğun ilgi çekmekte ve bu konuda birçok yöntem geliştirilmektedir (Zielinski, 2005).

### 3. BULANIK SAYILAR

#### 3.1. Genel Bilgiler

Bir bulanık sayı,  $X$  söylem evreninde hem konveks hem normal olan ve şu koşulları tatmin eden bulanık bir alt kümedir.

- $\mu_{\tilde{A}}(X)$  aralıklı süreklidir
- $\mu_{\tilde{A}}(X)$  konvektir
- $\mu_{\tilde{A}}(X)$  normalleştirilmiş bulanık kümedir ve

$\mu_{\tilde{A}}(m) = 1$  durumu  $m$ 'nin gerçel sayı olması koşuluyla gerçekleşir.

$\tilde{A}$  bulanık sayısı bulanık bir kümedir ve üyelik

fonksiyonu  $\mu_{\tilde{A}}(X) : U \rightarrow [0,1]$  olmaktadır.

Üçgensel bir bulanık sayı (a,b,c) üçlüsü gibi tanımlanabilir. Üyelik fonksiyonu ise 1 nolu eşitliğe göre şöyledir:

$$\mu_{\tilde{A}}(X) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (1)$$

Sırasıyla  $(a_1, a_2, a_3)$  ve  $(b_1, b_2, b_3)$  üçlüleriyle parametrelendirilen  $\tilde{A}$  ve  $\tilde{B}$  gibi iki bulanık sayıyı ele aldığımızda üçgensel bulanık sayılara yönelik aritmetik işlemler 2 ve 3 nolu eşitliklere göre şöyledir:

- $\tilde{A} \oplus \tilde{B}$  toplama işlemi :

$$(a_1, a_2, a_3) \oplus (b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (2)$$

- $\tilde{A} \otimes \tilde{B}$  çarpım işlemi :

$$(a_1, a_2, a_3) \otimes (b_1, b_2, b_3) = (a_1 x b_1, a_2 x b_2, a_3 x b_3) \quad (3)$$

$\tilde{A}$  bulanık sayısının LR türü L(sol) ve R(sağ) ilişki fonksiyonları 4 nolu eşitlik biçiminde ortaya çıkmaktadır ( $\alpha, \beta > 0$  için).

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right), & x \leq m \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right), & x \geq m \end{cases} \quad (4)$$

m değeri  $\tilde{A}(x)$ 'in ortalaması,  $\alpha, \beta$  her ikisi de reel sayı ve orta noktadan olan sol ve sağ mesafeler olmakla birlikte,  $\tilde{A}$  bulanık sayısı  $(m, \alpha, \beta)_R$  olarak gösterilebilir (Chen ve Cheng, 2005).

$\tilde{A}$  gerçel bulanık sayısı aşağıdaki özellikleri sağlayan  $f_{\tilde{A}}$  üyelik fonksiyonlu ve R gerçel doğrusunun herhangi bir bulanık alt kümesi olarak tanımlanır.

- $f_{\tilde{A}}, R$ 'den  $[0, w]$  kapalı aralığına kadar sürekli gönderimdir,  $0 \leq w \leq I$ ;

- tüm  $x \in (-\infty, a]$  için  $f_{\tilde{A}}(x) = 0$  olmaktadır.

- $f_{\tilde{A}}, [a, b]$  üzerinde kesin artandır.

- tüm  $x \in [b, c]$  için  $f_{\tilde{A}}(x) = w$  olmaktadır; w sabit ve  $0 < w \leq I$ 'dir.

- $f_{\tilde{A}}, [c, d]$  üzerinde kesin azalandır.

- tüm  $x \in [d, +\infty)$  için  $f_{\tilde{A}}(x) = 0$  olmaktadır.

Burada a,b,c ve d gerçel sayılardır;  $a = -\infty, a=b, c=d$ , yada  $d = +\infty$  olmasına izin verilebilir.

Aksi belirtilmedikçe  $\tilde{A}$ 'nın konveks ve sınırlı olduğu varsayılır, başka bir deyişle  $-\infty < a, d < +\infty$  olmaktadır. Eğer d'deki durumda  $w=1$  olursa  $\tilde{A}$  normal bulanık sayıdır, d'deki  $0 < w < 1$  için  $\tilde{A}$  normal olmayan bulanık sayıdır. Kolaylık açısından bulanık sayı  $\tilde{A} = (a, b, c, d; w)$  olarak gösterilebilir.  $\tilde{A} = (a, b, c, d; w)$ 'in tersi ise  $-\tilde{A} = (-d, -c, -b, -a; w)$  şeklinde gösterilir.  $\tilde{A}$ 'nın üyelik fonksiyonu  $f_{\tilde{A}}$  5 nolu eşitlikteki gibidir:

$$f_{\tilde{A}} = \begin{cases} f_{\tilde{A}}^L(x) & a \leq x \leq b, \\ w, & b \leq x \leq c, \\ f_{\tilde{A}}^R(x) & c \leq x \leq d, \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases} \quad (5)$$

Burada  $f_{\tilde{A}}^L : [a, b] \rightarrow [0, w]$  ve  $f_{\tilde{A}}^R : [c, d] \rightarrow [0, w]$  olmaktadır.

$f_{\tilde{A}}^L : [a, b] \rightarrow [0, w]$  sürekli ve kesin artan olduğu için  $f_{\tilde{A}}^L$ 'nin ters fonksiyonu da bulunmaktadır. Benzer biçimde  $f_{\tilde{A}}^R : [c, d] \rightarrow [0, w]$  sürekli ve kesin azalan olduğu için  $f_{\tilde{A}}^R$ 'nin ters fonksiyonu da bulunmaktadır.  $f_{\tilde{A}}^L$  ve  $f_{\tilde{A}}^R$ 'nin ters fonksiyonu sırasıyla  $g_{\tilde{A}}^L$  ve  $g_{\tilde{A}}^R$  olarak gösterilebilir.  $f_{\tilde{A}}^L : [a, b] \rightarrow [0, w]$  sürekli ve kesin artan olduğu için  $g_{\tilde{A}}^L : [0, w] \rightarrow [a, b]$  da aynı zamanda sürekli ve kesin artandır. Benzer şekilde  $f_{\tilde{A}}^R : [c, d] \rightarrow [0, w]$  sürekli ve kesin azalan olduğu için  $g_{\tilde{A}}^R : [0, w] \rightarrow [c, d]$  de aynı zamanda sürekli ve kesin azalan olmaktadır bu yüzden bunlar  $[0, w]$  üzerinde integrallenebilir. Bu nedenle hem  $\int_0^w g_{\tilde{A}}^L dy$  hem de  $\int_0^w g_{\tilde{A}}^R dy$  olmaktadır (Parandin ve Araghi, 2008).

### 3.2. Bulanık Kritik Yol Problemi

Toplam süreyi belirlemek ve kritik yolları bulmak için kullanılacak alternatif yollardan birisi olan doğrusal programlama formülasyonunun temelinde birim akışın proje ağına başlangıç düğümünde girip, bitiş düğümünde çıkacağı varsayımı yatar.  $(i,j) \in A$  faaliyetindeki akışın miktarını belirten karar değişkeni  $x_{ij}$  olsun. Herhangi bir zamanda sadece bir birimlik akış herhangi bir yay üzerinde olacağından  $x_{ij}$  değişkeni sadece ikili değer (0 ya da 1) alabilir. n düğüme sahip kritik yol problemi 6 nolu eşitlikteki gibi gösterilebilir:

$$\begin{aligned}
 D &= \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \\
 \sum_{j=1}^n x_{1j} &= 1, \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{k=1}^n x_{ki}, i = 2, \dots, n-1, \\
 \sum_{k=1}^n x_{kn} &= 1, \\
 x_{ij} &= 0 \text{ ya da } 1, (i,j) \in A.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Yukarıdaki eşitlikte herhangi bir faaliyetin süresi olan  $t_{ij}$  bulanık olduğunda toplam süre olan D de bulanık olacaktır. Bu bağlamda geleneksel kritik yol problemi bulanık parametrelere sahip olacak biçimde değiştirilecektir. Bulanık kritik yol problemi 7 nolu eşitlikteki gibi gösterilecektir:

$$\begin{aligned}
 \tilde{D} &= \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{T}_{ij} x_{ij} \\
 \sum_{j=1}^n x_{1j} &= 1, \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{k=1}^n x_{ki}, i = 2, \dots, n-1, \\
 \sum_{k=1}^n x_{kn} &= 1, \\
 x_{ij} &= 0 \text{ ya da } 1, (i,j) \in A.
 \end{aligned} \tag{7}$$

İlk düğümden n. düğüme kadar proje ağının toplam süresinin maksimize edilmesi amacının her iki modelde de benzer olması dışında oluşan tek fark, toplam sürenin bulanık olmasıdır. Amaç fonksiyonunun kesin değere sahip olması proje yönetimi için bazı yararlı bilgilerin kaybolmasına yol açacağından,

bulanık kritik yol problemi için projenin kritik yollarının belirlenmesi amacıyla çözümler bu problemin bulanıklığını içerecek biçimde olmalıdır. Bunu sağlayacak şekilde Chen  $\alpha$  kesim ve iki düzeyli matematiksel programlamanın kombinasyonuna dayalı olarak bulanık toplam süre analizinin üyelik fonksiyonunu elde edecek bir yaklaşım geliştirmiştir.

Bulanık kritik yol probleminde amaç fonksiyonunun üst sınırını elde etmek için doğrudan  $t_{ij}$  değerlerini üst sınır olan  $(T_{ij})_{\alpha}^U \forall (i,j) \in A$ 'ye göre ayarlayarak maksimum amaç değeri bulunur. Böylece üst sınırı elde etmek için model 8 nolu eşitlik biçiminde yazılır:

$$\begin{aligned}
 D_{\alpha}^U &= \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (T_{ij})_{\alpha}^U x_{ij} \\
 \sum_{j=1}^n x_{1j} &= 1, \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{k=1}^n x_{ki}, i = 2, \dots, n-1, \\
 \sum_{k=1}^n x_{kn} &= 1, \\
 x_{ij} &\geq 0, (i,j) \in A.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Yukarıdaki modelden de anlaşılacağı üzere  $\alpha$ 'ya göre parametrize edilen maksimal amaç değeri  $\alpha$  olasılık düzeyinde proje ağının toplam süresinin üst sınırını gösterir. Benzer şekilde alt sınırı elde etmek için model 9 nolu eşitlik biçiminde yazılır:

$$\begin{aligned}
 D_{\alpha}^L &= \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (T_{ij})_{\alpha}^L x_{ij} \\
 \sum_{j=1}^n x_{1j} &= 1, \\
 \sum_{j=1}^n x_{ij} &= \sum_{k=1}^n x_{ki}, i = 2, \dots, n-1, \\
 \sum_{k=1}^n x_{kn} &= 1, \\
 x_{ij} &\geq 0, (i,j) \in A.
 \end{aligned} \tag{9}$$

8 ve 9 nolu modellerde  $D_{\alpha}^U$  ve  $D_{\alpha}^L$  üyelik fonksiyonunun  $\alpha$  kesiminin üst ve alt sınırlarını verir (Chen,2007).  $0 < \alpha_2 < \alpha_1 < 1$  koşulunu sağlayan

$\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  iki olasılık seviyesi için tüm  $\alpha$  kesimleri gömülü bir yapı oluşturur. Bu nedenle  $D_{\alpha_1}^L \geq D_{\alpha_2}^L$  ve  $D_{\alpha_1}^U \leq D_{\alpha_2}^U$  olmaktadır. Yani alt sınır kapsamında  $\alpha_2$ 'ye göre tanımlanan uygun bölge  $\alpha_1$ 'e göre tanımlanan uygun bölgeden daha küçüktür; üst sınır kapsamında  $\alpha_2$ 'ye göre tanımlanan amaç fonksiyonu  $\alpha_1$ 'e göre tanımlanan amaç fonksiyonundan daha büyüktür. Başka bir deyişle sol şekil fonksiyonu artan ve sağ şekil fonksiyonu azalandır. Bu durum  $\tilde{D}$ 'nin konveksliğini garanti eder (Chen, 2007).

### 3.3. Durulaştırma Yöntemleri

Plan, proje, tasarım gibi pratik uygulamalarda boyutlandırılmalar için kesin sayısal değerlere gerek duyulduğundan, bulanık değişken, küme, mantık ve sistemlerin bulanık olan çıkarımlarının kesin sayılarla ifade edilmesi gerekmektedir. Bulanık olan bilgilerin kesin sonuçlar haline dönüştürülmesi için yapılan işlemlere "durulaştırma" denir (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003; Dayık ve Kodaloğlu, 2007).

Literatür incelendiğinde çok çeşitli durulaştırma yöntemlerinin olduğu görülmektedir. Bu yöntemler arasında en bilinenler; en büyük üyelik ilkesi, ağırlık merkezi (centroid) yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi, ortalama en büyük üyelik derecesi yöntemi, toplamların merkezi yöntemi, en büyük ilk veya son üyelik derecesi yöntemidir (Şen, 2003; Dayık ve Kodaloğlu, 2007; Atacak ve Bay, 2004; Kataria, 2010; Naaz, Alam ve Biswas, 2011). Bu yöntemlerden hangisinin seçileceği eldeki problemin yapısına göre araştırmacı tarafından belirlenir (Şen, 2003).

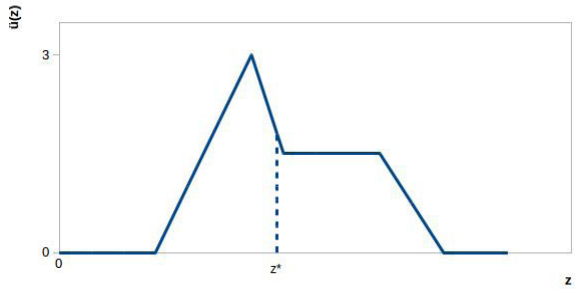
En büyük üyelik ilkesi yönteminin bir diğer adı "yükseklik yöntemidir". Bu yöntemin kullanılabilmesi için tepeleri olan çıkarım bulanık kümelerinin (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003); ağırlık ortalama yönteminin kullanılabilmesi için de simetrik üyelik fonksiyonun bulunması gerekmektedir. Ortalama en büyük üyelik yöntemine "en büyüklerin ortası yöntemi" de denilmektedir. Bu açıdan en büyük üyelik ilkesine benzerdir. Ancak, en büyük üyeliğin konumu tek olmayabilir. Toplamların merkezi yönteminde iki bulanık kümenin birleşimi yerine cebirsel toplamları kullanılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise örtüşen kısımların iki defa toplama işleminde yer almasıdır (Şen, 2003). En büyük alanın merkezi yönteminde çıkarım bulanık kümesi en az iki dış bükey alt bulanık kümeyi içermesi durumunda en büyük alanlı kümenin ağırlık merkezinin durulaştırılması ele alınır. En büyük ilk veya en büyük son üyelik derecesi yönteminde ise çıkarım bulanık kümesindeki en büyük üyelik derecesine sahip olan en küçük veya en büyük bulanık küme

değeri seçilir (Şen, 2004).

Durulaştırma işlemlerinde en sık kullanılan yöntem, "ağırlık merkezi"(centroid) yöntemidir (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003; Atacak ve Bay, 2004; Polat ve Özel, 2012; Karadavut ve Akkaptan, 2012; Şen, 2003). Bu yöntemle ilişkin matematiksel işlemler 10 nolu eşitlik ile yapılmaktadır. Denklemde  $\int$  simgesi integral işareti göstermektedir (Şen, 2003).

$$z^* = \frac{\int \tilde{u}_c(z) \cdot z dz}{\int \tilde{u}_c(z) dz} \quad (10)$$

Bu formülde,  $\tilde{u}_c(z)$  çıkarım işlemi neticesinde elde edilmiş üyelik ağırlığını,  $z$  her bir kuraldaki çıkış değerini ve  $z^*$  durulaştırılmış çıkışı temsil etmektedir. Ağırlık merkezi yönteminin gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1: Ağırlık Merkezi Yönteminin Gösterimi

Kıyak ve Kahvecioğlu (2003), Atacak ve Bay (2004), Subaşı, Beycioğlu ve Emiroğlu (2009), Polat ve Özel (2012) yapmış oldukları çalışmalarda durulaştırma yöntemlerinden "ağırlık merkezi (centroid)" yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca Kataria (2010) ve Naaz, Alam ve Biswas (2011), durulaştırma yöntemlerinden ağırlık merkezi yöntemi (Center of Area), iki bölge yöntemi (Bisector of Area), maksimumun ortalaması (Mean of Maksimum), maksimumun en küçüğü (Smallest of Maksimum) ve maksimumun en büyüğü (Largest of Maksimum) yöntemlerini kullanarak yöntemler arasında karşılaştırma yapmışlar ve benzer şekilde ağırlık merkezi, iki bölge yöntemi ve maksimumun ortalaması yöntemlerinin, diğer iki yöntemle göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada da durulaştırma işlemlerinde ağırlık merkezi (centroid) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni yapılan hesaplamaların diğer yöntemlere göre basit olması ve durulaştırma sonucu elde edilecek temsili değerlerin eldeki verilere göre problemin çözümüne iyi denebilecek cevaplar vermesi olarak ifade edilebilir.



### 3.4. Yager'in Kıyaslama (Göreceli Kritiklik Derecesi) Yöntemi

Gürbüz olmasının yanı sıra doğrusallık ve toplanabilirlik özelliklerine sahip olan takasına dayalı olan Yager sıralama indeksi  $I(\tilde{t})$  11 nolu eşitliğe göre  $\alpha$  kesim,  $t_\alpha = [t_\alpha^L, t_\alpha^U]$ 'dan  $\tilde{t}$  konveks bulanık sayısı için hesaplanır.

$$I(\tilde{t}) = \int_0^1 \frac{1}{2} (t_\alpha^L + t_\alpha^U) d\alpha \quad (11)$$

Yukarıdaki formülde  $I(\tilde{t})$ ,  $\tilde{t}$ 'nin ortalama değerinin merkezidir.  $\tilde{D}_1$  ve  $\tilde{D}_2$  iki bulanık sayı olarak varsaydığımızda  $I(\tilde{D}_1) \geq I(\tilde{D}_2)$  durumunda  $\tilde{D}_1 \geq \tilde{D}_2$  ve  $\max\{\tilde{D}_1, \tilde{D}_2\} = \tilde{D}_1$  olmaktadır. Bu indekste üyelik fonksiyonu yerine  $\alpha$  kesim  $t_\alpha^L$  ve  $t_\alpha^U$ 'nin uç değerlerinden  $\tilde{t}$  konveks bulanık sayısı hesaplanır. Sıralanacak tüm bulanık sayıların üyelik fonksiyonlarının bilinmesini gerektiren çoğu sıralama yöntemlerinden farklı olarak Yager'in sıralama indeksi bulanık faaliyet sürelerinin üyelik fonksiyonunun belirgin biçimlerinin bilinmediği durumlarda da uygulanabilir.  $\tilde{B}$  ve  $\tilde{C}$  gibi iki konveks bulanık sayının doğrusal kombinasyonunun  $\tilde{A}$  konveks bulanık sayısının olduğunu varsaydığımızda  $\tilde{A} = u\tilde{B} + v\tilde{C}$  eşitliğinde  $u$  ve  $v$  sabitlerdir. Buradan ise  $I(\tilde{A}) = uI(\tilde{B}) + vI(\tilde{C})$  elde edilir. Sonuçta Yager'in sıralama yöntemi, bulanık kritik yol problemini kesin faaliyet süreli geleneksel kritik yol problemine dönüştürme temeline dayalı bir yöntemdir (Chen ve Hsueh, 2008).

Bulanık faaliyet süreli bir proje ağındaki en kritik yol en büyük Yager sıralama indeksine sahip olacaktır.  $m$  farklı bulanık kritik yol  $fcp_k, k=1,2,\dots,m$  ile birlikte kritik faaliyetler kümesinin  $FCA_k, k=1,2,\dots,m$  olduğunu varsayarsak en kritik yolun uzunluğu 12 nolu eşitliğe göre şöyle bulunur:

$$L_{mcp}^{max} = \max_k \left\{ \sum_{\forall (i,j) \in FCA_k, k=1,2,\dots,m} I(\tilde{T}_{ij}) \right\} \quad (12)$$

Proje ağının  $G$  yoldan oluştuğunu düşünelim. En kritik yolun  $p_{fg} \in P_{fg}, g \in \{1,2,\dots,G\}$  kritiklik derecesini 1.0 olarak düzenlersek, bir yolun kritikliğinin göreceli derecesi 13 nolu eşitliğe göre bu yolun Yager sıralama indeksinin en kritik yolun sahip olduğu indekse oranlanmasıyla bulunur (Chen, 2007):

$$R \deg(p_{fg}) = \frac{\sum_{\forall (i,j) \in P_{fg}} I(\tilde{T}_{ij})}{\max_k \left\{ \sum_{\forall (i,j) \in FCA_k, k=1,2,\dots,m} I(\tilde{T}_{ij}) \right\}} = \frac{\sum_{\forall (i,j) \in P_{fg}} I(\tilde{T}_{ij})}{L_{mcp}^{max}} \quad (13)$$

Bu çalışmada dışbükey bulanık sayının ortalama değerinin merkezinin bulunmasını esas alan ve  $\alpha$  kesim aralıklarından yararlanan Yager kıyaslama yönteminden faydalanarak projenin kritik yolu ve tamamlanma süresinin doğruluğu sınanmıştır.

## 4. PROJEYE İLİŞKİN UYGULAMA BİLGİLERİ

### 4.1. Proje Tanıtımı

Uygulamanın gerçekleştirildiği şirket 1995 yılında Karaman ilinde kurulmuş bir aile işletmesi sayılabilecek bir inşaat müteahhitlik şirkettir. Şirket kurulduğu yıldan bu zamana kadar Karaman'da, çalışmaya konu son proje ile birlikte, toplam 586 daire üretmiştir. Son projedeki dairelerin sahiplerine teslimi sonrası yeni ve Karaman ölçeğinde büyük sayılabilecek, 120-150 dairelik, çok bloklu ve 11-12 katlı olarak planlanan yeni bir proje hedefleyen ve ön çalışmalarına başlayan firma aynı zamanda gıda ve otel işletmeciliği alanlarında faaliyetlerine devam etmektedir.

Çalışmaya konu olan proje, ilgili firmanın ilk site tarzı ve sosyal donatılı projesidir ve iki bloktan oluşmaktadır. Bloklardan birisi 24 diğeri 21 daireden oluşmaktadır ve her katta 3'er daire konumlandırılmıştır. Projeye 2012 yılının Kasım ayında başlanmıştır. Daireler brüt 170 m<sup>2</sup>'den oluşmaktadır. Proje gelişime açık olan, Karaman-Konya ve Karaman-Ereğli-Adana çevre yolları üzerinde konumlanmıştır.

Çalışmaya ilişkin sonuçların firma açısından da yararlı olabileceği düşünülmektedir. Çalışma ile öncelikle tüm faaliyetlerin ve faaliyetlere ilişkin önceliklerin belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu ölçekte bir inşaatın gerçekte kaç günde tamamlanabileceği analiz edildiğinden, firmanın benzer başka projelerinde de isabetli kararlar verebilmesi ve taahhütte bulunabilmesi söz konusu olacaktır.

Söz konusu projeye ait olan kat planları Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2: Kat Planı

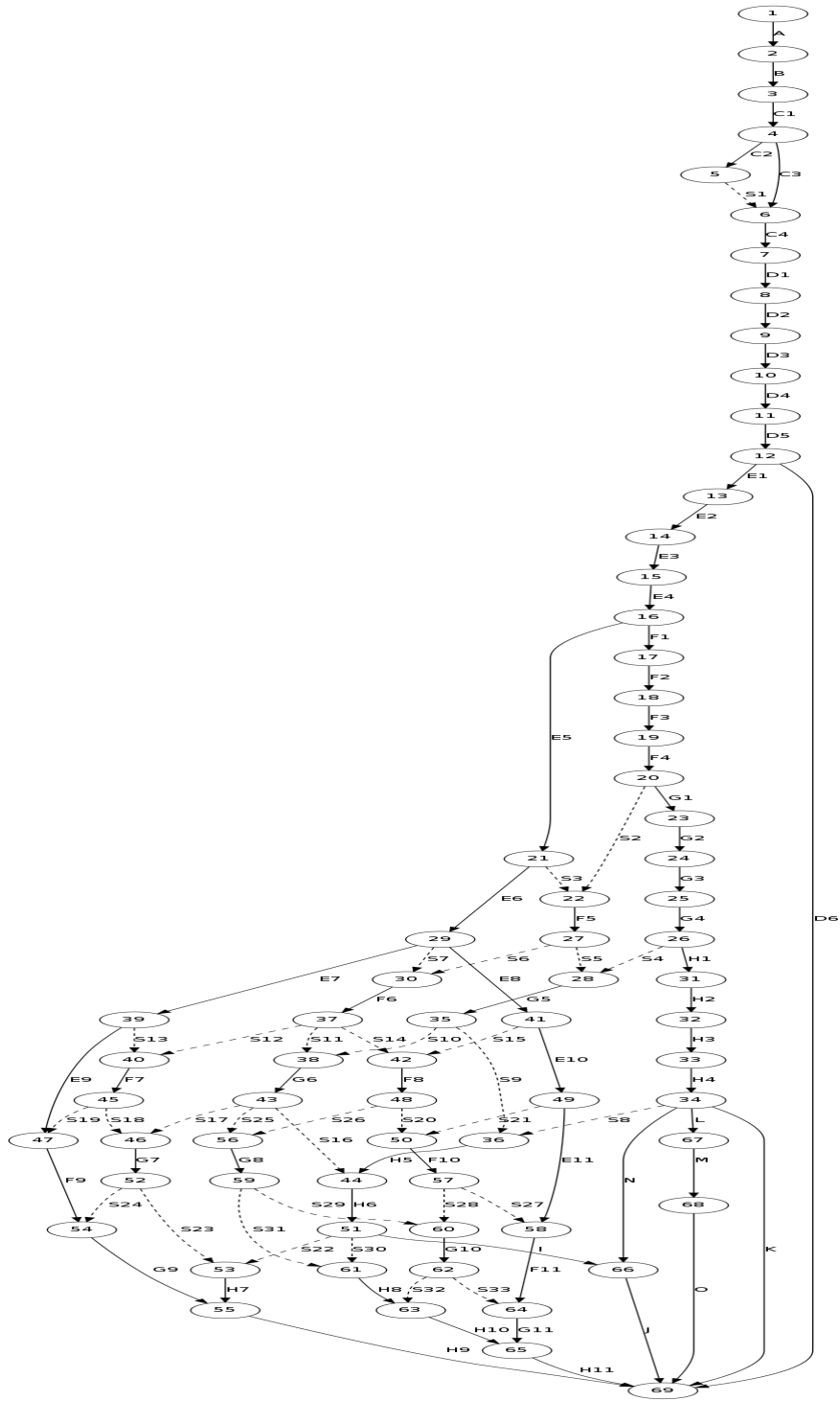
#### 4.2.Problem Tanımı

Projedeki faaliyetlerin süreleri deterministik değildir. Çünkü bu tür projeler emek yoğun oldukları için ve faaliyetler büyük çoğunlukla usta, ustabaşı ve inşaat işçileri gibi personelle yürütüldüğü için net süreler verilememiş bunun yerine geçmiş tecrübelerle dayalı aralıklar ifade edilmiştir. Bu sebeple belirsiz faaliyet sürelerinin oluşturduğu bu durumda bulanıklık kav-

ramından yararlanılacaktır. Şirket tarafından ele alınan projeye yönelik 63 faaliyet ve üçgensel bulanık sayı bağlamında ifade edilen süreler Tablo 1'de gösterilmiştir. Proje ağ diyagramı, Activity On Arc (AOA) stiline çizilmiş olup 69 düğüm ve 33 tane sanal faaliyet bulunmaktadır. Elde edilen proje ağ diyagramı Şekil 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Projeyi Oluşturan Faaliyetler ve Üçgensel Bulanık Sayı Bağlamındaki Süreler

Faaliyet kodu	Faaliyet tanımı	Öncüller		Süresi		
				En iyi	En olası	En kötü
A	hafriyat öncesi işlemler (aplikasyon, zemin etüdü, proje çizimi ve onayı)	yok		27 gün	35 gün	45 gün
B	Hafriyat (1 Blok için)	A		1 gün	2 gün	8 gün
C	Temel atma (1 Blok için)					
C1	Grobeton	B		2 saat	3 saat	4 saat
C2	Su işi-elektrik işi-topraklama	C1		2 saat	4 saat	6 saat
C3	Kalıp çakılması-demir işi	C1		3 gün	5 gün	7 gün
C4	Yapı denetimi	C2	C3	1 saat	2 saat	3 saat
D	Su basman					
D1	Kalıp çakılması-demir işi	C4		6 gün	8 gün	10 gün
D2	Elektrik işi (Boru döşeme, kablo geçirme)	D1		4 saat	5 saat	6 saat
D3	Yapı denetimi	D2		1 saat	2 saat	3 saat
D4	Beton işi (Beton atma ve dinlendirme)-Laboratuar analizi	D3		9 gün	11 gün	30 gün
D5	Kalıp sökümü-Duvar örülmesi (dolu tuğla ile)	D4		4 gün	6 gün	8 gün
D6	Su yalıtımı-kenarların doldurulması-binanın kanalizasyon bağlantısı yapılması	D5		2 gün	3 gün	4 gün
E	Zemin kat					
E1	Kalıp çakılması-demir işi	D5		5 gün	7 gün	8 gün
E2	Yapı denetimi	E1		1 saat	2 saat	3 saat
E3	Beton işi (Beton atma ve dinlendirme)-Laboratuar analizi	E2		9 gün	11 gün	30 gün
E4	Kalıp sökülmesi-Duvar örülmesi	E3		6 gün	8 gün	10 gün
E5	Su tesisatı ve elektrik tesisatı	E4		6 gün	8 gün	10 gün
E6	İç sıva-alçı-kartonpiyer	E5		10 gün	17 gün	21 gün
E7	Doğalgaz ve kalorifer tesisatı	E6		1 gün	2 gün	3 gün
E8	PVC, çerçeve ve cam takılması	E6		2 gün	3 gün	4 gün
E9	Taban şapı-taban ve duvar fayansları	E7		3 gün	4 gün	5 gün
E10	İç boya	E8		5 gün	6 gün	7 gün
E11	İç boya sonrası faaliyetler (kombi-kalorifer petekleri-mobilyalar-banyo aksesuarları-laminant-kapılar)	E10		6 gün	12 gün	14 gün
F	1. kat					
F1	Kalıp çakılması-demir işi	E4		5 gün	7 gün	8 gün
F2	Yapı denetimi	F1		1 saat	2 saat	3 saat
F3	Beton işi (Beton atma ve dinlendirme)-Laboratuar analizi	F2		9 gün	11 gün	30 gün
F4	Kalıp sökülmesi-Duvar örülmesi	F3		6 gün	8 gün	10 gün
F5	Su tesisatı ve elektrik tesisatı	F4	E5	6 gün	8 gün	10 gün
F6	İç sıva-alçı-kartonpiyer	F5	E6	10 gün	17 gün	21 gün
F7	Doğalgaz ve kalorifer tesisatı	F6	E7	1 gün	2 gün	3 gün
F8	PVC, çerçeve ve cam takılması	F6	E8	2 gün	3 gün	4 gün
F9	Taban şapı-taban ve duvar fayansları	F7	E9	3 gün	4 gün	5 gün
F10	İç boya	F8	E10	5 gün	6 gün	7 gün
F11	İç boya sonrası faaliyetler (kombi-kalorifer petekleri-mobilyalar-banyo aksesuarları-laminant-kapılar)	F10	E11	6 gün	12 gün	14 gün
G	2. kat					
G1	Kalıp çakılması-demir işi	F4		5 gün	7 gün	8 gün
G2	Yapı denetimi	G1		1 saat	2 saat	3 saat
G3	Beton işi (Beton atma ve dinlendirme)-Laboratuar analizi	G2		9 gün	11 gün	30 gün
G4	Kalıp sökülmesi-Duvar örülmesi	G3		6 gün	8 gün	10 gün
G5	Su tesisatı ve elektrik tesisatı	G4	F5	6 gün	8 gün	10 gün
G6	İç sıva-alçı-kartonpiyer	G5	F6	10 gün	17 gün	21 gün
G7	Doğalgaz ve kalorifer tesisatı	G6	F7	1 gün	2 gün	3 gün
G8	PVC, çerçeve ve cam takılması	G6	F8	2 gün	3 gün	4 gün
G9	Taban şapı-taban ve duvar fayansları	G7	F9	3 gün	4 gün	5 gün
G10	İç boya	G8	F10	5 gün	6 gün	7 gün
G11	İç boya sonrası faaliyetler (kombi-kalorifer petekleri-mobilyalar-banyo aksesuarları-laminant-kapılar)	G10	F11	6 gün	12 gün	14 gün
H	3. kat					
H1	Kalıp çakılması-demir işi	G4		5 gün	7 gün	8 gün
H2	Yapı denetimi	H1		1 saat	2 saat	3 saat
H3	Beton işi (Beton atma ve dinlendirme)-Laboratuar analizi	H2		9 gün	11 gün	30 gün
H4	Kalıp sökülmesi-Duvar örülmesi	H3		6 gün	8 gün	10 gün
H5	Su tesisatı ve elektrik tesisatı	H4	G5	6 gün	8 gün	10 gün
H6	İç sıva-alçı-kartonpiyer	H5	G6	10 gün	17 gün	21 gün
H7	Doğalgaz ve kalorifer tesisatı	H6	G7	1 gün	2 gün	3 gün
H8	PVC, çerçeve ve cam takılması	H6	G8	2 gün	3 gün	4 gün
H9	Taban şapı-taban ve duvar fayansları	H7	G9	3 gün	4 gün	5 gün
H10	İç boya	H8	G10	5 gün	6 gün	7 gün
H11	İç boya sonrası faaliyetler (kombi-kalorifer petekleri-mobilyalar-banyo aksesuarları-laminant-kapılar)	H10	G11	6 gün	12 gün	14 gün
I	Merdiven ( 1 blok için) (merdiven basamakları ve korkuluklar)	H6		18 gün	22 gün	28 gün
J	Asansör (1 Blok için) (Ray ve kapı kasalarının takılması, kabin, kapı ve düğmelerin konulması)	N	I	8 gün	9 gün	10 gün
K	Çatı (1 blok için) (kiremit, izolasyon ve oluklar)	H4		6 gün	7 gün	9 gün
L	Dış sıva (1 blok için)	H4		17 gün	20 gün	25 gün
M	Dış cephe, yalıtım, dış boya (1 blok için)	L		20 gün	30 gün	35 gün
N	Balkon korkuluklarının takılması	H4		1 gün	2 gün	3 gün
O	Çevre düzenlemesi (1 Blok için)(kaldırım, oyun parkı, otopark, havuz, güvenlik sistemi, aydınlatma, çimlendirme ve sulama sistemi)	M		10 gün	20 gün	30 gün



Şekil 3: Proje Ağ Diyagramı

### 4.3. Problem Formülasyonu

Problem klasik bir ağ modeli olarak 14 nolu eşitlikteki gibi modellenenmektedir. Her  $(i,j)$  kenarı için bir  $c_{ij}$  maliyeti tanımlı bir ağda s kaynak düğümü, t nihai düğümü ifade etmek üzere;

$$Z_{\max} = \sum_i c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = 1, \text{ eğer } i=s \text{ ise}$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = 0, \text{ diğer } \quad (14)$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = -1, \text{ eğer } i=t \text{ ise}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ya da } 1$$

modeli yardımıyla kritik yol hesaplanabilir.

AMPL cebirsel modelleme dilinde Ek-1'de verilen modelde alpha parametresi geliştirilen bir betik yardımıyla otomatik olarak güncellenerek alpha 0'dan 1'e kadar 0.1 adım değeri olmak üzere  $[0,0.1,\dots,1]$  için 11 defa çalıştırılarak proje tamamlama süresi hesaplanmış ve kritik yol üzerindeki faaliyetler belirlenmiştir.

### 5. BULGULAR

Tüm doğrusal programlar için kritik yol A-B-C1-C3-C4-D1-D2-D3-D4-D5-E1-E2-E3-E4-F1-F2-F3-F4-G1-G2-G3-G4-H1-H2-H3-H4-L-M-O olmaktadır. 0'dan

1'e kadar farklı  $\alpha$  değerleri için maksimizasyon bağlamında elde edilen amaç fonksiyonu değerleri şöyle olmaktadır:

$$\alpha = 0 \text{ için } \max z = 384,04202$$

$$\alpha = 0,1 \text{ için } \max z = 369,321219$$

$$\alpha = 0,2 \text{ için } \max z = 354,600418$$

$$\alpha = 0,3 \text{ için } \max z = 339,879617$$

$$\alpha = 0,4 \text{ için } \max z = 325,158816$$

$$\alpha = 0,5 \text{ için } \max z = 310,438015$$

$$\alpha = 0,6 \text{ için } \max z = 295,717214$$

$$\alpha = 0,7 \text{ için } \max z = 280,996413$$

$$\alpha = 0,8 \text{ için } \max z = 266,275612$$

$$\alpha = 0,9 \text{ için } \max z = 251,554811$$

$$\alpha = 1 \text{ için } \max z = 236,83401$$

Durulaştırma yöntemlerinden ağırlık merkezine göre oluşturulan modelin çözüm yolu da benzer biçimde A-B-C1-C3-C4-D1-D2-D3-D4-D5-E1-E2-E3-E4-F1-F2-F3-F4-G1-G2-G3-G4-H1-H2-H3-H4-L-M-O olmaktadır. Kritik yolun süresi ise  $269.9936 \cong 270$  gündür. Bu süre maksimizasyon açısından  $\alpha=0,1$  artırımına göre 0,7 ile 0,8 alfa değerleri arasında kalırken ;  $\alpha=0,01$  artırımına göre yaklaşık olarak 0,78 (269,22 maksimizasyon değeri) değerine denk gelmektedir. Alfanın 0,01 adım değeri olarak arttırılması sonucu tüm modülün 101 defa çalıştırılmasıyla elde edilen maksimizasyon bağlamında amaç fonksiyonu değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2:**  $\alpha = 0,01$  artırımına göre elde edilen maksimizasyon bağlamında amaç fonksiyonu değerleri

$\alpha$	Max z	$\alpha$	Max z
0	384,04202	0,51	308,9659349
0,01	382,5699399	0,52	307,4938548
0,02	381,0978598	0,53	306,0217747
0,03	379,6257797	0,54	304,5496946
0,04	378,1536996	0,55	303,0776145
0,05	376,6816195	0,56	301,6055344
0,06	375,2095394	0,57	300,1334543
0,07	373,7374593	0,58	298,6613742
0,08	372,2653792	0,59	297,1892941
0,09	370,7932991	0,6	295,717214
0,1	369,321219	0,61	294,2451339
0,11	367,8491389	0,62	292,7730538
0,12	366,3770588	0,63	291,3009737
0,13	364,9049787	0,64	289,8288936
0,14	363,4328986	0,65	288,3568135
0,15	361,9608185	0,66	286,8847334
0,16	360,4887384	0,67	285,4126533
0,17	359,0166583	0,68	283,9405732
0,18	357,5445782	0,69	282,4684931
0,19	356,0724981	0,7	280,996413
0,2	354,600418	0,71	279,5243329
0,21	353,1283379	0,72	278,0522528
0,22	351,6562578	0,73	276,5801727
0,23	350,1841777	0,74	275,1080926
0,24	348,7120976	0,75	273,6360125
0,25	347,2400175	0,76	272,1639324
0,26	345,7679374	0,77	270,6918523
0,27	344,2958573	0,78	269,2197722
0,28	342,8237772	0,79	267,7476921
0,29	341,3516971	0,8	266,275612
0,3	339,879617	0,81	264,8035319
0,31	338,4075369	0,82	263,3314518
0,32	336,9354568	0,83	261,8593717
0,33	335,4633767	0,84	260,3872916
0,34	333,9912966	0,85	258,9152115
0,35	332,5192165	0,86	257,4431314
0,36	331,0471364	0,87	255,9710513
0,37	329,5750563	0,88	254,4989712
0,38	328,1029762	0,89	253,0268911
0,39	326,6308961	0,9	251,554811
0,4	325,158816	0,91	250,0827309

0,41	323,6867359	0,92	248,6106508
0,42	322,2146558	0,93	247,1385707
0,43	320,7425757	0,94	245,6664906
0,44	319,2704956	0,95	244,1944105
0,45	317,7984155	0,96	242,7223304
0,46	316,3263354	0,97	241,2502503
0,47	314,8542553	0,98	239,7781702
0,48	313,3821752	0,99	238,3060901
0,49	311,9100951	1	236,83401
0,5	310,438015		

Burada  $\alpha$  'nın her 0,1 artırımında modelin çözüm değerinin lineer olarak azaldığı fark edilmektedir. Bu her zaman karşılaşılabilen bir durum olmayabilir. Örneğimizde her  $\alpha$  -kesim için kritik yol aynı olduğu için sonuçta kritik yol üzerindeki faaliyetlerin toplam zamanı da benzer bir oranla her  $\alpha$  artışında azalma olacak şekilde ortaya çıkmıştır. Fakat  $\alpha$  'daki değişimin her örnek olayda aynı kritik yolu vermesi beklemez.

Aynı zamanda A-B-C1-C3-C4-D1-D2-D3-D4-D5-E1-E2-E3-E4-F1-F2-F3-F4-G1-G2-G3-G4-H1-H2-H3-H4-L-M-O yolu projenin diğer olası tüm yollarıyla Yager'in kıyaslama metoduna göre kıyaslandığında en yüksek kritiklik derecesini vermektedir. Projede toplam olası 210 yol bulunmakta olup kıyaslamalardan sonra projedeki kritik yolun süresi yaklaşık olarak 265 gün olmaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçek hayatta karşılaşılan projelerde kesin olarak bilinmeyen ve önceden öngörülemeden belirsizlik durumları ile karşılaşılmaktadır. Birçok farklı disiplinde görülen bu belirsizlik durumu L.A.Zadeh tarafından bulunan bulanık mantık tekniklerinin kullanımı ile belirginlik kazanabilir. Bulanık küme teorisinde gerçek yaşamdaki belirsizlik durumları matematiksel kapsamda fonksiyonlarla ifade edilir. Bulanık sayılar, kesin olmayan bilginin sayısal biçimde gösterilmiş halidir.

Bu makalede Karaman'daki bir inşaat projesine ait süreler klasik sayılara göre daha gerçekçi olan bulanık sayılar ile ele alınmış olup, projenin bulanık bağlamda kritik yolunun bulunmasında Chen'in alfa kesim yaklaşımı ele alınmıştır. Ayrıca en fazla kullanılan durulaştırma yöntemlerinden olan ağırlık merkezi (centroid) yöntemi ile de projenin kritik süresinin aynı çıktığı bulunmuştur.

Projenin kritik yolunu garantileyen bir sıralama yöntemi olan Yager'in metodundan yararlanılarak projenin kritik süresi yaklaşık olarak 265 gün olarak bulunmuştur. Bu bağlamda projenin kritik yolunun

A-B-C1-C3-C4-D1-D2-D3-D4-D5-E1-E2-E3-E4-F1-F2-F3-F4-G1-G2-G3-G4-H1-H2-H3-H4-L-M-O olduğu ve kritik süresinin 265-270 gün arasında değişeceği söylenebilir.

Söz konusu projede ilgili firma çalışmamız çerçevesinde öngördüğümüz süreler dâhilinde projesini tamamlamıştır. Bu vesile ile firma için bekleme süreleri en aza indirilmiş ve hak sahiplerine taahhüt edilen sürenin aşılması nedeniyle oluşabilecek maliyet arttırıcı risklerden korunulmuştur. Bu tür projelere daha

bilimsel yaklaşıldığı zaman ortaya çıkacak avantajlar firmaları bu çalışmaya konu olan projedeki gibi olası maliyet arttırıcı nedenlerden koruyacaktır.

Bu projede kritik yolun bulunmasında kullanılan üçgensel bulanık faaliyet süreleri dışında L-R tipi, yamuksal, gaussal vb. bulanık sayılardan da yararlanılabilir. Ayrıca bulanık proje çizelgeleme problemlerine kaynak kısıtı dahil edilerek daha etkili ve optimal çözümler elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

Atacak, İ. ve Bay, Ö.F. (2004), “ Bulanık Mantık Denetimli Seri Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik Gerilimlerin Bastırılması ”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2) : 205-215.

Atlı, Ö. ve Kahraman, C. (2012), “Minslack and Kangaroo Algorithms for Fuzzy Project Scheduling Problems”, *Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, 20(1-2): 189-219.

Aydın, Ö., Ulucan, A., Narcı, H.Ö., Şahin, İ., Erigüç, G. ve Tengilimoğlu, D. (2012), *Sağlık Kurumlarında Operasyon Yönetimi*, Anadolu Üniversitesi Açık öğretim Yayınları.

Carlsson, C., (1984), “On the Relevance of Fuzzy Sets in Management Science Methodology”, Zimmermann vd. (eds.) *Times Studies in the Management Sciences* içinde, Netherlands, Elsevier : 11-28.

Chanas, S. ve Kamburowski, J. (1981), “ The use of fuzzy variables in PERT ”, *Fuzzy Sets and Systems*, 5(1) : 11-19.

Chanas, S. ve Zielinski, P. (2001), “ Critical Path Analysis in the Network With Fuzzy Activity Times ”, *Fuzzy Sets and Systems*, 122: 195-204.

Chen, C.T. ve Huang, S.F. (2007), “ Applying Fuzzy Method For Measuring Criticality In Project Network ”, *Information Sciences*, 177 (12) : 2448-2458.

Chen, L.S, Cheng, C.H. (2005), “Selecting IS Personnel Using Ranking Fuzzy Number By Metric Distance Method”, *European Journal of Operational Research*, 160(3): 803- 820.

Chen, S.P. (2007), “ Analysis Of Critical Paths in a Project Network With Fuzzy Activity Times ”, *European Journal of Operational Research* , 183 (1) : 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: 1289-1297.

Çubukçu, R. (2008), “Proje Yönetiminde Zaman ve Maliyet Risklerinin Çizelgeleme Yöntemiyle Minimize Edilmesi” ,Yayınlanmamış Doktora Tezi, Adana, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dayık, M. ve Kodaloğlu, M. (2007), “Kondisyonlama Şartlarının İplik Rutubetine Etkisinin Yapay Zeka Yardımıyla Tespiti ”, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 : 25-32.

Dönmez, N. (2007) , “Tedarik Zinciri Planlama İçin Bir Bulanık Çok Amaçlı Doğrusal Programlama Modeli ” ,Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Guiffrida A. L. ve Nagi, R. (1998), “Fuzzy Set Theory Applications in Production Management Research: A Literature Survey”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9: 39-56.

Han, T.C., Chung, C.C. ve Liang, G.S. (2006) “Application Of Fuzzy Critical Path Method To Airport’s Cargo Ground Operation Systems”, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14(3): 139-146.

Hapke, M. ve Slowinski, R. (1996) , “ Fuzzy priority heuristics for project scheduling ”, *Fuzzy Sets and Systems*, 83 : 291- 299.

Herroelen, W. ve Leus, R. (2005) , “Project Scheduling Under Uncertainty: Survey And Research Potentials”, *European Journal of Operational Research* : 289–306.

Hsiau, H. J. ve Lin, C. W. R. (2009), “A Fuzzy Pert Approach to Evaluate Plant Construction Project Scheduling Risk Under Uncertain Resources Capacity”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2(1): 31-47.

Karadavut, U. ve Akkaptan, A. (2012) , “ Bitkisel Üretimde Bulanık Mantık Uygulamaları ”, *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 5 (2) : 77-82.

Kataria, N. (2010), “ A Comparative Study of the Defuzzification Methods in an Application ”, *The IUP Journal of Computer Sciences*, 4(4) : 48-54.

Ke, H. ve Liu, B. (2007), “Project Scheduling Problem With Mixed Uncertainty of Randomness And Fuzziness” , *European Journal of Operational Research* ,183: 135–147.

Ke, H. ve Liu, B. (2010) , “ Fuzzy Project Scheduling Problem and its Hybrid Intelligent Algorithm” , *Applied Mathematical Modelling*, 34: 301–308.

Kıyak, E. ve Kahvecioğlu, A. (2003), “Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması ” , *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2) : 63-72.

Kolaylıoğlu, Ö. (2006), “ İnşaat Sektöründe Proje Yönetimi ve Proje Yöneticisi”, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Kökçam, H.A. ve Engin, O. (2010), “ Solving The Fuzzy Project Scheduling Problems With Meta-Heuristic Methods”, *Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma* , 28: 86-101.

Kurt, Ö. (2006), “Proje Planlama ve Programlama Teknikleri ve İnşaat Sektörüne Ait Bir Uygulaması”, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Antalya, Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Liang, G.S. ve Han, T.C. (2004) “Critical Path Analysis Based on Fuzzy Concept ”, *International Journal of Information and Management Sciences*, 15 (4): 29-40.

Liang, T.F. (2009), “ Fuzzy Multi-Objective Project Management Decisions Using Two-Phase Fuzzy Goal Programming Approach ”, *Computer and Industrial Engineering*, 57 (4): 1407-1416.

Liu, B. (2009), *Theory and Practice of Uncertain Programming*, 3rd Edition , UTLAB, China.

Liu, Y., Yang, S.M. ve Lin, Y. (2010) , “Fuzzy Finish Time Modeling for Project Scheduling”, The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference.

Naaz, S., Alam, A. ve Biswas, R. (2011), “Effect of Different Defuzzification Methods In A Fuzzy Based Load Balancing Application ” , *International Journal of Computer Science Issues*, 8(1) : 261-267.

Paksoy, S. (2007) , “Genetik Algoritma ile Proje Çizelgeleme ” , Yayınlanmamış Doktora Tezi, Adana, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Pan, H. ve Yeh, C.H. (2003), “Fuzzy Project Scheduling” , *The 12th IEEE International Conference Journal*, (Volume:1).

Parandin, N. ve Araghi, M.A.F. (2008) , “ Ranking of Fuzzy Numbers by Distance Method ” , *Journal of Applied Mathematics*, 5 (19) : 47-55.

Pinedo, M.L. (2012). *Scheduling – Theory, Algorithms and Systems*, New York, Springer.

Prade, H. (1979), “Using Fuzzy Set Theory In A Scheduling Problem: A Case Study” , *Fuzzy Sets and Systems* , (2) :153–165.

Polat, H. ve Özel, C. (2012), “ TS EN 206-1’e göre Tasarlanan ve Zararlı Kimyasal Ortamlara Maruz Kalacak Betonların Basınç Dayanımın Bulanık Mantık Yöntemiyle Tahmini ” , *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1) : 26-35.

Shankar, N.R., Saradhi, B.P. ve Babu, S.S. (2013) “Fuzzy Critical Path Method Based on a New Approach of Ranking Fuzzy Numbers using Centroid of Centroids”, *International Journal of Fuzzy System Applications*, 3(2):16-31.

Shankar, R., Sireesha, V. ve Rao, P.P.B. (2010) , “ An Analytical Method for Finding Critical Path in a Fuzzy Project Network ” , *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, 5(20): 953 – 962.

Shankar, N. R., Sireesha, V., Rao, K.S. ve Vani, N. (2010), “Fuzzy Critical Path Method Based on Metric Distance Ranking of Fuzzy Numbers”, *International Journal of Mathematical Analysis*, 4(20): 995-1006.

Soltani, A. ve Haji, R. (2007), “ A Project Scheduling Method Based on Fuzzy Theory” , *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(1): 70-80.

Sönmez, E. (2007), “Neden Proje Yönetimi?”, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Spinner, M. (1997), *Project Management, Principles and Practices*, New Jersey, Prentice-Hall.

Subaşı, S., Beycioğlu, A. ve Emiroğlu, M. (2009), “ Mineral Katkı İçeren Betonların Sertleşme Sürelerinin Belirlenmesinde Bulanık Mantık Yaklaşımı ” , 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs, Karabük.

Suvacı, E., Lezki, Ş., Uysal, O., Önce, S., Er, F. ve Şıklar, E. (2013), *Proje Yönetimi*, Anadolu Üniversitesi Açık öğretim Yayınları.

Şen, Z. (2003), *Modern Mantık*, Bilge Kültür Sanat Yayınevi.

Şen, Z. (2004), *Mühendislikte Bulanık (Fuzzy) Mantık ile Modelleme Prensipleri*, İstanbul, Su Vakfı Yayınları.

Tuş, A. (2006), “Bulanık Doğrusal Programlama ve Bir Üretim Planlamasında Uygulama Örneği ” , Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Denizli, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Vatansever, R. (2008), “ Proje Planlamasında Bulanık Hedef Programlama Yaklaşımı ” , Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wang, J.H. ve Hao, J. (2007), “Fuzzy Linguistic PERT”, *Fuzzy Systems* , 15 (2): 133-144.

Yalaoui, N., Dugardin, F., Yalaoui, F., Amodeo, L. ve Mahdi, H. (2010), *Production Engineering and Management Under Fuzziness, Fuzzy Project Scheduling*, Springer.



Yao, J.S. ve Lin, F.T. (2000), “ Fuzzy Critical Path Method Based on Signed Distance Ranking of Fuzzy Numbers ”, *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems And Humans*, 30(1).

Zadeh, L.A. (1965) “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, 8(3) : 338-353.

Zhang, X. ve Chen, X. (2012), “A New Uncertain Programming Model for Project Scheduling Problem ” , *Information: An International Interdisciplinary Journal*, 15(10): 3901-3910.

Zielinski, P. (2005), “ On Computing The Latest Starting Times and Floats Of Activities in a Network With Imprecise Durations” , *Fuzzy Sets and Systems*, 150 : 53–76.

### EK 1. Problemin AMPL Cebirsel Modelleme Dilinde Gösterimi

```
# düğüm sayısı
param n, integer, > 0;

# alfa kesim seviyesi
param alpha;

# kenar kümesi
set E, within {i in 1..n, j in 1..n};
# kenar değerinin hesaplanmasında kullanılan parametreler
param d{(i,j) in E}, >= 0; # U+RS
param coeff{(i,j) in E}, >= 0;

# (i,j) kenarının değeri c[i,j]
param c{(i,j) in E} := d[i,j] - coeff[i,j] * alpha;

# kaynak düğüm
param s, in {1..n};

# hedef düğüm
param t, in {1..n};

# x[i,j] ikili bir değişken olmak üzere;
# x[i,j] = 1 olduğunda (i,j) kenarı kritik yola dahilken;
# x[i,j] = 0 olduğunda (i,j) kenarı kritik yola dahil değildir.
var x{(i,j) in E} binary;

# s düğümünden t düğümüne kadar birim akışın korunmasını sağlayan kısıt
ifadesi;
# böylelikle her uygun çözüm s düğümünden t düğümüne giden bir yol olması
sağlanabilir
s.t. r{i in 1..n}: sum{(j,i) in E} x[j,i] + (if i = s then 1) =
        sum{(i,j) in E} x[i,j] + (if i = t then 1);

# amaç fonksiyonu
maximize Z: sum{(i,j) in E} c[i,j] * x[i,j];
end;
```