

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Remzi ÇUBUKÇU

**PROJE YÖNETİMİNDE ZAMAN VE MALİYET RİSKLERİNİN
ÇİZELGELEME YÖNTEMİYLE MİNİMİZE EDİLMESİ**

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2008

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROJE YÖNETİMİNDE ZAMAN VE MALİYET RİSKLERİNİN
ÇİZELGELEME YÖNTEMİYLE MINİMİZE EDİLMESİ**

Remzi ÇUBUKÇU

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 31/10/2008 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile
Kabul Edilmiştir.

Doç. Dr. Rızvan EROL
DANIŞMAN

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU
ÜYE

Prof. Dr. Türkay DERELİ
ÜYE

Yrd.Doç. Dr. S.Noyan OĞULATA
ÜYE

Yrd. Doç. Dr. M. Oya ÇETİK
ÜYE

Bu tez Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

PROJE YÖNETİMİNDE ZAMAN VE MALİYET RİSKLERİNİN ÇİZELGELEME YÖNTEMİYLE MİNİMİZE EDİLMESİ

Remzi ÇUBUKÇU

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç.Dr. Rızvan EROL

Yıl : 2008, **Sayfa:**146

Jüri : Doç. Dr. Rızvan EROL

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU

Prof. Dr. Türkay DERELİ

Yrd. Doç. Dr. S.Noyan OĞULATA

Yrd. Doç. Dr. M.Oya ÇETİK

Bu çalışmada bulanık faaliyet süreli kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi (KKPÇ) problemi ele alınmıştır. Öncelikle, proje ağında yer alan faaliyetler için BIFPET (Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time) metodolojisine uygun olarak bulanık sayı üyelik fonksiyonları belirlenmiştir. Ele alınan KKPÇ problemi karışık tamsayı matematiksel model kullanılarak modellenmiş ve değişken maliyetli çoklu proje kaynakları modele dahil edilmiştir. Oluşturulan optimizasyon modeli için mevcut bulunan hesaplama karmaşıklığı sebebiyle başlangıç çözümü belirleyen sezgisel algoritma oluşturulmuş ve çözüm uzayının sınırlandırılması yaklaşımıyla farklı büyüklükteki problemler çözümlenmiştir. Önerilen yöntemin senaryo analizleri ve gerçek proje uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, projelerin planlanmasında zaman ve maliyet risklerinin en aza indirileceği ve bu risklerin proje yöneticisi tarafından denetlenmesini sağlayacak bir yöntem oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Proje Yönetimi, Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi Problemi, Optimizasyon

ABSTRACT

PhD THESIS

MINIMIZING TIME AND COST RISKS USING SCHEDULING IN PROJECT MANAGEMENT
--

Remzi ÇUBUKÇU

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF CUKUROVA

Supervisor : Assoc. Prof. Rızvan EROL

Year : 2008, **Pages:** 146

Jury : Assoc. Prof. Rızvan EROL

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU

Prof. Dr. Türkay DERELİ

Assistant Prof. S.Noyan OĞULATA

Assistant Prof. M.Oya ÇETİK

In this study the resource constrained project scheduling problem with fuzzy activity times is addressed. BIFPET (Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time) methodology has been employed to determine the appropriate fuzzy membership functions in modeling activity times. Multiple resources with variable usage costs have been used in the model in order to comply with real life projects' requirements. Heuristics for determining the initial solutions for the mixed integer programming mathematical optimization model have been used and various sizes of resource constrained project scheduling problems have been solved using the solution space limitation approach yielding project completion times and project costs. Scenario analysis and a case study were conducted to demonstrate the applicability of the method in practice. Thus, a method to minimize time and cost risks and to enable the project manager to control these risks in project planning has been proposed.

Key Words: Project Management, Resource Constrained Project Scheduling Problem, Optimization

ÖNSÖZ

Endüstri Mühendisliği alanında son yıllarda yapılan çalışmalarda gerçek hayatta varolan belirsizliğin modellenmesinde bulanık programlama yöntemlerinin çalışmalarda önemli bir yer tuttuğu gözlenmektedir. İlk olarak 1960'lı yılların ortalarında ortaya çıkan bulanık kümeler teorisi geçen yıllarla birlikte pek çok değişik alanda uygulanmaya başlanmıştır. Sistemlerde var olan belirsizliğin modellenmesinde yeni bir dönem başlatan bu önemli konu hakkındaki çalışmalar halen yoğun şekilde devam etmektedir.

Proje Yönetimi dalındaki çalışmalar ise 1950'li yıllarda başlamış ve konunun ayrı bir alan olarak değerlendirilmesi bu yıllarda gerçekleşmiştir. Özellikle büyük ölçekli projelerin artmasıyla, bu projelerin en iyi şekilde yönetilmesi gerekliliği ortaya çıkmış ve CPM ve PERT gibi ağ tabanlı teknikler 1950'lerin sonunda ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeleri takiben alana büyük bir ilgi yoğunluğu oluşmuş ve çok sayıda çalışma yapılmıştır. Daha sonra 1970'li yıllardan sonra çalışmalarda bir yavaşlama görülmüştür. Son dönemlerde ise proje yönetimi tekniklerine yeniden yoğun bir ilgi oluşmuştur ve bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır.

Proje Yönetimi çalışmaları yapısı gereği belirsizliklerin klasik sistemlere göre daha yüksek olduğu sistemlerin yönetimiyle ilgilenmektedir. Bu noktada belirsizlikleri modellemede farklı bir yaklaşım getiren bulanık kümeler metodolojisinin kullanılmasıyla verimli sonuçlar elde etmek mümkün olabilecektir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki değerli katkıları için başta tez danışmanım Doç. Dr. Rızvan EROL olmak üzere, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU ve Prof. Dr. Türkay DERELİ ile Yrd. Doç. Dr. S. Noyan OĞULATA ve Yrd. Doç. Dr. M. Oya ÇETİK'e; ayrıca gösterdikleri destek için aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
TABLolar DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.3. Varsayımlar	5
1.4. Çalışmanın Adımları	6
1.5. Özgün Katkılar	6
1.6. Tezin Organizasyonu	9
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
2.1. Bulanık Kümeler Teorisi	12
2.2. Proje Yönetimi	15
2.3. Proje Yönetiminde Bulanık Programlama	17
2.4. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi (KKPÇ) Problemi	24
2.5. Çözüm Yöntemleri	30
2.6. Literatürün Taksonomisi	32
3. MATERYAL VE METOD	37
3.1. Materyal	37
3.2. Metod	37
3.2.1. Problemin Formülasyonu	38
3.2.1.1. Sistem Karakteristikleri	38
3.2.1.2. Varsayımlar	40
3.2.1.3. Girdi Değişkenler ve Parametreler	42
3.2.1.4. Performans Değişkenleri	43

3.2.2.	Matematik Programlama Modeli.....	44
3.2.2.1.	Notasyon	44
3.2.2.2.	Matematiksel Model.....	45
3.2.3.	Çözüm Yaklaşımları.....	47
3.2.3.1.	Analitik Çözüm.....	48
3.2.3.2.	Sezgisel Yaklaşım.....	51
3.2.3.3.	Başlangıç Çözümünün Sezgisel Yaklaşım ile Belirlenmesi	52
3.2.4.	Deneyisel Tasarım	53
3.2.5.	Modelin Bilgisayar Kodlaması	55
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	57
4.1.	Örnek Uygulama	57
4.2.	Hesaplama Karmaşıklığının İncelenmesi	60
4.3.	Model Çözümlerinin İncelenmesi.....	68
4.3.1.	Problem Büyüklüğü.....	68
4.3.2.	Kaynak Kısıtları.....	69
4.3.3.	Öncelik İlişkileri	70
4.4.	Çözüm Yöntemlerinin İncelenmesi	71
4.4.1.	Optimizasyon Yöntemiyle Çözümleme	71
4.4.2.	Başlangıç Çözümünün Sezgisel Algoritma ile Belirlenmesi	73
4.4.3.	Çözüm Uzayının Sınırlandırılması Yöntemi	74
4.5.	Senaryo Analizleri	76
4.5.1.	Farklı Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonlarının Kullanımı	77
4.5.2.	Farklı Türde Proje Kaynaklarının Kullanımı.....	85
4.6.	Gerçek Proje Uygulaması.....	91
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	104
5.1.	Çalışmanın Özeti.....	104
5.2.	Sonuçlar.....	106
5.3.	Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler	109
	KAYNAKLAR.....	111
	ÖZGEÇMİŞ	115
	EKLER.....	116

EK 1. Proje Çizelgeleme Problemi Taksonomisi	117
EK 2. Matematiksel Model Kodu.....	118
EK 3. Matematiksel Model Çözümleri	122
EK 4. Başlangıç Çözümü Belirlenmiş Matematiksel Model	132
EK 5. Çözüm Uzayı Sınırlandırılmış Matematiksel Model.....	138

TABLolar DİZİNİ**SAYFA**

Tablo 3.1.	Deneyisel Tasarım Tablosu	54
Tablo 4.1.	Model Sonuçları.....	59
Tablo 4.2.	Çözüm Matrisi Bileşenleri	61
Tablo 4.3.	Çözüm Uzayı Büyüklüğü	62
Tablo 4.4.	Çözüm Süreleri	65
Tablo 4.5.	Tamsayı Değişkenler ve Çözüm Süreleri.....	67
Tablo 4.6.	Problem Büyüklüğüne Bağlı Model Çözümleri	69
Tablo 4.7.	Kaynak Sayısına Bağlı Model Çözümleri.....	69
Tablo 4.8.	Öncelik İlişkilerine Bağlı Model Çözümleri.....	70
Tablo 4.9.	Optimizasyon yöntemiyle elde edilen çözümler.....	71
Tablo 4.10.	Sezgisel Algoritma Kullanılarak Elde Edilen Problem Çözümleri	73
Tablo 4.11.	Çözüm uzayının sınırlandırılmasıyla elde edilen çözümler	75
Tablo 4.12.	Üçgen Bulanık Sayı Kullanıldığında Elde Edilen Model Sonuçları	79
Tablo 4.13.	Yamuk Bulanık Sayı Kullanıldığında Elde Edilen Model Sonuçları	80
Tablo 4.14.	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerin Karşılaştırılması.....	81
Tablo 4.15.	Proje Çizelgelemesi Probleminde Kaynak Türleri	85
Tablo 4.16.	Yenilenebilir Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi Problemi Sonuçları.....	86
Tablo 4.17.	Yenilenemeyen Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi Problemi Sonuçları.....	88
Tablo 4.18.	Yenilenebilir, Yenilenemeyen ve Çift Kısıtlı Kaynak Kısıtlı KKPC Sonuçları.....	89
Tablo 4.19.	Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyetler ve Teknik Kısıtlar	92
Tablo 4.20.	Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyetlere Ait Kaynak İhtiyaçları	94
Tablo 4.21.	Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyet Süreleri.....	95

Tablo 4.22. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Planlama Modeli Sonuçları.....	96
Tablo 4.23. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Proje Kritik Yolları	98
Tablo 4.24. Proje Kaynakları Dağılımı Tablosu	98
Tablo 4.25. Toplam Proje Süresi ve Maliyeti Tahminleri ve Gerçekleşmeleri	102
Tablo 4.26. Toplam Proje Kaynakları Kullanımlarının Karşılaştırılması	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 2.1.	Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu.....	26
Şekil 2.2.	Yamuk Bulanık Proje Sonu Üyelik Fonksiyonu.....	27
Şekil 4.1.	Örnek Bulanık Faaliyet Süreli Proje Ağı (Liu,2003)	59
Şekil 4.2.	Proje Çizelgelemesi	60
Şekil 4.3.	Çözüm Uzayı Büyüklüğü	62
Şekil 4.4.	Proje Faaliyetleri Sayısı ve Problem Büyüklüğü (Kullanılan Bellek, MB).....	64
Şekil 4.5.	Tamsayı Değişkenlerin Sayısına Bağlı Model Çözüm Süreleri	67
Şekil 4.6.	Optimizasyon Yöntemiyle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri.....	72
Şekil 4.7.	Sezgisel Yöntemle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri	74
Şekil 4.8.	Çözüm Uzayının Sınırlandırılması Yöntemiyle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri	76
Şekil 4.9.	Üçgen Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu	77
Şekil 4.10.	Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu.....	78
Şekil 4.11.	Üçgen ve Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonları Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması.....	82
Şekil 4.12.	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Düşük Teknik İlişki Seviyesi).....	83
Şekil 4.13.	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Orta Teknik İlişki Seviyesi).....	84
Şekil 4.14.	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Yüksek Teknik İlişki Seviyesi).....	84
Şekil 4.15.	Yenilenebilir Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	87
Şekil 4.16.	Yenilenemeyen Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	88
Şekil 4.17.	Yenilenebilir, Yenilenemeyen ve Çift Kısıtlı Proje Kay. Kul. Grafiği	90
Şekil 4.18.	Proje Faaliyet Çizelgesi ve Kritik Yollar	97
Şekil 4.19.	Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	99
Şekil 4.20.	Yenilenebilir Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	100
Şekil 4.21.	Yenilenemeyen Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	100

Şekil 4.22. Çift Kısıtlı Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği	101
Şekil 4.23. Faaliyet Tamamlanma Süreleri Tahminlerle Karşılaştırılması	102

1. GİRİŞ**1.1. Problem Tanımı**

Bu çalışmada ele alınan endüstri mühendisliği problemi bulanık faaliyet süreli kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi (KKPÇ) problemidir. Proje yönetiminde faaliyetlerin çizelgelemesi yapılırken her projede mevcut olan kaynak kısıtları dikkate alınarak çizelgeleme yapılması gerçek hayat problemlerine uygun çözümler bulunması için uygun bir yaklaşımdır. Ayrıca, proje yönetiminde risk olarak kabul edilen zaman ve maliyet faktörlerinin oluşturulacak modele dahil edilmesi gereklidir.

KKPÇ problemi üzerinde yapılan çalışmalar elde edilecek hedefler açısından incelendiğinde ikiye ayrılmaktadırlar. Birinci grup çalışmalar hedef olarak proje süresini minimize etmeyi amaçlayan çalışmalardır. Bunlar arasında toplam proje uzunluğunu en aza indirmeyi hedefleyen çalışmaların yanı sıra ortalama gecikme zamanını en aza indirme, ortalama bitirme zamanı en aza indirme gibi zamana dayalı hedefleri en aza indirmeyi hedefleyen çalışmalar mevcuttur. Halbuki, gerçekte zaman hedefleri maliyet hedefleriyle çoğu zaman çelişebilmektedir. Bu sebeple ikinci grup çalışmalar maliyet hedefleri üzerinde yoğunlaşmış ve projenin toplam maliyetinin en aza indirilmesi veya projenin net şimdiki değerinin maksimize edilmesi hedefleri üzerinde durmuştur. Proje yönetiminde gerçek hayatta sıklıkla karşılaşılan durumda, projenin belirli bir proje bitim tarihinden önce tamamlanması ve aynı zamanda proje toplam maliyetinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu özel durum üzerinde yapılan bazı çalışmalar literatürde mevcuttur.

KKPÇ problemlerine kaynak kısıtları açısından bakıldığında da değişik yaklaşımların kullanılmakta olduğu gözlemlenmektedir. Öncelikle gerçek hayattaki kaynak kısıtlarının modellenmesinde kaynaklar yenilenebilir kaynaklar, yenilenemeyen kaynaklar ve çift kısıtlı kaynaklar olarak üç kategoriye ayrılmaktadırlar. Yenilenebilir kaynaklar kullanımları sadece her bir dönemde kısıtlı olan kaynaklardır. Örneğin, işçilik dönemsel olarak sınırlı olarak kullanılabilir ancak her dönem yeniden kullanılabiliriyorsa yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Hammaddeler ve proje bütçesi ise toplam kullanımları bütün

proje için sınırlı olduğu için yenilenemeyen kaynaklardır. Öte yandan kullanımları hem dönemsel olarak hem de projenin tamamında kısıtlı olan kaynaklar (örneğin nakit akışı) çift kısıtlı kaynaklar olarak nitelendirilmektedirler. (Özdamar ve Ulusoy, 1995)

Görüldüğü üzere kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi probleminin modellenmesinde değişik yaklaşımlar mevcuttur. Söz konusu modellerdeki kaynaklar, zaman ve maliyetlerde belirsizlik ve bunlar arasında karşılıklı ilişkiler mevcuttur. Bu problemlerin çözülmesinde ise genellikle deterministik veya olasılık teoremini esas alan stokastik yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise proje yönetiminde bu faktörlerde mevcut olan belirsizliğin bulanık kümeler teorisi kullanılarak ve faktörlerin birbirleriyle olan ilişkileri göz önünde tutularak modellenmesi ve bunun sonucunda oluşan zaman ve maliyet risklerinin en aza indirilmesi problemi ele alınmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Proje yönetimi yaklaşımlarının başarılı olarak uygulanabilmesi için projede var olan zaman ve maliyet belirsizliklerinin uygun şekilde yönetilebilmesi ve projenin hedeflenen sürede ve maliyetlerde tamamlanmasının gerçekleştirilebilmesi gerekmektedir. Proje yönetiminde mevcut belirsizliğin modellenmesinde kullanılan iki temel yöntem olasılık teoremine ve bulanık kümeler teoremine dayanmaktadır. Bu çalışmada projedeki zaman ve maliyet belirsizliklerinin uzman görüşüne dayanan bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmesi, toplam proje süresinin ve toplam proje maliyetinin kaynak kısıtlarına bağlı olarak ele alınacak şekilde matematiksel modelin oluşturulması ve oluşturulan modelin etkin şekilde çözülmesi amaçlanmıştır.

Proje faaliyetlerinin modelde bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak dahil edilebilmesinde Shipley ve Arkadaşları (1997) tarafından yapılan “BIFPET methodology versus PERT in project management: fuzzy probability instead of the beta distribution” adlı çalışmada kullanılan yöntem esas alınmıştır. Bu yöntemde proje faaliyet sürelerinin stokastik modellerde faaliyet sürelerinin modellenmesinde

kullanılan istatistiksel beta dağılımının yerine bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılması öngörülmektedir. Faaliyet sürelerinin ifadesinde beta dağılımında olduğu gibi faaliyetin iyimser, ortalama ve kötümser süreleri esas alınmaktadır. Ancak, faaliyet süresinin matematiksel ifadesinde iyimser, ortalama ve kötümser sürelerin gerçeği ne kadar temsil ettiği de uzman görüşüne göre ağırlık belirlenerek tespit edilmektedir. Araştırmacılar, bu yaklaşımın gerçek projelerin modellenmesinde daha başarılı olduğunu ve özellikle faaliyet süresinin istatistiksel olarak hesaplanması için yeterli veri olmadığı durumlarda da kullanılabileceği için geniş bir uygulama sahası olduğunu ifade etmektedir.

Ele alınan KKPC probleminin modellenmesinde karışık tamsayı matematiksel modelleme tekniği kullanılmıştır. Modelin amaç fonksiyonunda toplam proje maliyeti ve toplam proje süresi minimize edilmektedir. Modelde çoklu kaynak durumu öngörülmüştür ve kaynak kullanım maliyetlerinin dönemler itibarıyla değişkenlik gösterdiği varsayımına göre modelleme yapılmıştır. Her dönemde projede kullanılabilecek kaynakların birim zamanda kullanılabilecek miktarlarının sınırlı olduğu varsayılmaktadır.

Proje faaliyetlerinin bulanık sayılar olarak modele dahil edilmesinden sonra Liu (2003) tarafından hazırlanan “Fuzzy Activity Times in Critical Path and Project Crashing Problems” adlı çalışmada oluşturulan bulanık modelin çözümünde Yager indisi kullanılarak kesinleştirme yapılması üzerinde durulmaktadır. Bu yöntemde konveks bulanık sayıların alan karşılığı yöntemi kullanılarak Yager (1981) tarafından önerilen yönteme göre sıralanması önerilmekte ve sıralama yapılarak kesin hale getirilmiş olan modelin literatürdeki yöntemlerle çözülmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım özellikle model hacminin büyük olduğu durumlarda bulanık operatörlerin kullanılmasına gerek kalmadan modelin çözülmesi için iyi bir yöntem olarak görülmektedir. Oluşturulan matematiksel modelde kullanılan bulanık parametreler bu yöntem kullanılarak kesinleştirilmiş ve ortaya çıkan hesaplama karmaşıklığına sahip modelin çözülmesi üzerinde durulmuştur.

Modelin çözümüyle ilgili olarak ise literatürde bulanık proje çizelgeleme probleminin çözümünde sezgisel yöntemler etkin şekilde kullanılmaktadır. Literatürde kullanılan ilk sezgisel yöntemler öncelik kurallarına bağlı sezgisel

yöntemlerdir. Kelley tarafından yazılan “The critical path method: Resource planning and scheduling” adlı makalede öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemine göre oluşturulan bir çözüm yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajları kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olması ve hızlı şekilde çözüme ulaşabilmesi olarak görülmektedir. Ancak, elde edilen sonuçların optimal sonuçtan uzaklığı hakkında bulunan belirsizlikler sebebiyle farklı sezgisel yöntemler de araştırılmaktadır.

Modelin çözümünde kullanılabilecek alternatif çözüm yöntemleri incelendiğinde Kolisch ve Drexl (1997) tarafından önerilen uyarlanmış arama algoritması, Baar ve arkadaşları (1997) tarafından önerilen tabu arama algoritmasının orta ölçekli problemlerin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabildiği ortaya koyulmuştur. Öte yandan Hartmann tarafından “A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling” makalesinde önerilen genetik algoritmaya dayalı çözüm yöntemi ile Bouleimen ve Lecocq (1998) tarafından “A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem” adlı makalede önerilen benzetilmiş tavlama algoritmalarının büyük problemlerin çözümünde etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Oluşturulan modelde kullanılacak olan bulanık sayıların sıralanması yöntemi konusunda literatürde değişik yöntemler mevcuttur. Fortemps ve Roubens (1996) tarafından yapılan çalışmada bu yöntemlerin çoğunun uzman yaklaşımını doğru şekilde ifade etmekte yetersiz kaldığı gösterilmektedir. Öte yandan alan karşılığı yönteminin doğrusallık ve toplanabilirlik özelliklerine sahip olduğu ve uzman yaklaşımını doğru şekilde yansıtabildiği ifade edilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bulanık sayıların sıralanmasında alan karşılığı yönteminin kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

Yapılan çalışmanın literatürdeki yerinin değerlendirilebilmesi için Herroelen ve Leus (2005) tarafından yazılan “Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials” adlı makaleden de yararlanılmıştır. Bu makalede Proje Çizelgelemesi problemiyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve Proje Çizelgelemesi probleminin iki ana başlıkta incelendiği görülmüştür. Belirsizliğin mevcut olmadığı deterministik durumda temel olarak kullanılan yöntem bilindiği gibi

kritik yol metodudur. Öte yandan belirsizlik durumu bulunduğu Proje Çizelgeleme Problemi pek çok değişik yöntem kullanılarak literatürde incelenmektedir. Bunlar arasında Stokastik Proje Çizelgeleme, Bulanık Proje Çizelgeleme, Reaktif Çizelgeleme, Proaktif Çizelgeleme ve Duyarlılık Analizi kullanılan temel yöntemler olarak belirlenmiştir. Stokastik Proje Çizelgeleme yönteminde proje faaliyet sürelerinin deterministik olmadığı ve faaliyet sürelerinde bulunan belirsizliğin istatistiksel dağılımlar kullanılarak modellenebileceği varsayımı kullanılmaktadır. Bulanık Proje Çizelgeleme Yönteminde ise proje faaliyet süreleri bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmektedir. Bu şekilde istatistiki veri bulunmadığı ve uzman görüşü kullanılması gereken durumlarda daha kaliteli sonuçlar elde edilebileceği ileri sürülmektedir.

1.3. Varsayımlar

Yapılan çalışmada aşağıdaki varsayımlar esas alınmıştır:

1. Proje faaliyet sürelerinin uzman görüşüne bağlı olarak üçgen bulanık sayı dağılımına göre modellenmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.
2. Proje bitiş tarihinin belirli olduğu ve projenin öngörülen süreden önce bitirilmesi halinde erken bitirme primi, projenin gecikmesi halinde ise gecikme cezası olacağı varsayılmaktadır.
3. Amaç fonksiyonunda toplam proje maliyetinin ve toplam proje süresinin minimize edilmesi hedeflenmiştir.
4. Projenin faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için birden fazla kaynağın farklı miktarlarda kullanılması gerekeceği kabul edilmektedir.
5. Kaynak kullanım maliyetlerinin çizelgeleme dönemlerinde değişken olduğu varsayılmaktadır.
6. Mevsimsel ve enflasyonist etkiler bulunmaktadır.
7. Projenin yürütülmesinde yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı türde kaynakların kullanılması gerektiği varsayılmaktadır.

1.4. Çalışmanın Adımları

Çalışmanın oluşturulmasında sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Çalışmada ele alınan Endüstri Mühendisliği probleminin tanımlanması,
2. Problemin kavramsal çerçevesinin oluşturulması,
3. Literatürde yapılan önceki çalışmaların araştırılması,
4. Çalışmada kullanılan materyalin toplanması,
5. Matematiksel modelin oluşturulması,
6. Çözüm yöntemlerinin araştırılması ve uygun çözüm yönteminin belirlenerek modelin çözülmesi,
7. Örnek veri setleri kullanılarak modelin değişik durumlardaki performansının test edilmesi,
8. Elde edilen sonuçların problem çözümündeki yeterliliğinin değerlendirilmesi,
9. Senaryo analizlerinin yapılması,
10. Gerçek proje uygulamasının yapılması,
11. Çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçların özetlenmesi ve bundan sonraki dönemde yapılacak çalışmalara yönelik önerilerde bulunulması.

1.5. Özgün Katkıları

Çalışmada ele alınan Endüstri Mühendisliği problemi literatürde “Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi (KKPÇ) Problemi” olarak tanımlanan problem sınıfına dahil bulunmaktadır. KKPÇ problemiyle ilgili literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla deterministik veya stokastik yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada proje faaliyet sürelerindeki belirsizliğin bulanık olarak ele alınması öngörülmüştür. Faaliyet sürelerinin bulanık üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde Shipley ve ark. (1997) tarafından önerilen Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time (BIFPET) metodolojisi esas alınmıştır.

Faaliyet sürelerindeki belirsizliğin modellenmesinde sıklıkla kullanılan beta dağılımının ampirik bilgilere dayandığı ve teorik temelinin bulunmadığı ilk defa

Grubbs (1962) tarafından ortaya konulmuştur. Bu çalışmada kullanılan bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşımında faaliyet sürelerinin proje yöneticisi tarafından uzman görüşü esas alınarak kullanılması mümkün hale gelmekte ve pratik uygulamada önemli kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca, özellikle proje faaliyetleriyle ilgili geçmiş bilgilere sahip olunmadığı durumlarda bu yaklaşım önem kazanmaktadır (Wang, 2002). Kullanılan bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşımı ile proje faaliyet sürelerinin belirli olduğunu varsayan deterministik yaklaşıma ve faaliyet sürelerinin bilinen bir istatistiki dağılıma uygun olduğunu varsayan stokastik yaklaşıma göre, pratik kullanımı daha etkin olan bir yaklaşım oluşturulması hedeflenmiştir.

Çalışmada kullanılan matematiksel model ile projenin hem toplam maliyeti hem de zaman kısıtları göz önünde bulundurmaktadır. Literatürdeki KKPÇ problemleri incelendiğine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda zaman-tabanlı amaç fonksiyonları kullanıldığı ve maliyet faktörüne yer verilmediği görülmektedir (Özdamar ve Ulusoy (1995)). Oysa, gerçek hayat problemlerinde genellikle proje maliyetleri en önemli faktör olarak ele alınmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalar, proje maliyetinin en aza indirilmesi veya proje nakit akışının en fazlalaştırılması amaçları üzerinde durmaktadır. Bu modellerde ise yoğunlukla projenin zaman kısıtlamaları ve proje süresinin maliyete etkileri göz ardı edilmektedir. KKPÇ problemlerinin özünde yer alan zaman-maliyet çatışmasına bu çalışmada yer verilmiştir. Kullanılan formülasyonda hem toplam proje maliyetinin en aza indirilmesi öngörülmüş hem de proje süresinin toplam maliyete etkisi göz önünde bulundurularak projenin mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi amaçlanmıştır.

Kullanılan matematiksel modelde çoklu kaynak durumu öngörülmüştür. Yang ve ark. (1992) tarafından çoklu kaynak kısıtı altında proje net değerinin maksimize edilmesine yönelik önerilen karışık tamsayı programlama modeli bu alanda kullanılan benzer modellere örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, kaynak maliyetlerinin sabit olduğu varsayımı kaldırılmış, enflasyonist ve özellikle mevsimsel etkilere bağlı olarak kaynak kullanımı maliyetinin proje süresince değiştiği durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde projenin minimum maliyetle ve zamanında bitirilebilmesi için gereken kaynak dağılımının yapılması öngörülmektedir.

Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi (KKPÇ) Problemi literatürde hesaplama karmaşıklığı olan bir problem olarak tanımlanmaktadır. Buna göre proje faaliyet sayısı arttıkça problemin çözüm süresi geometrik olarak artmakta ve problemin makul süreler içerisinde optimal olarak çözülmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple literatürde büyük ölçekli problemlerin çözümü için çoğunlukla dal-sınır algoritmaları ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle genetik algoritma (Leu ve ark. 1999), hibrid genetik algoritma (Kim ve ark. 2004), tabu arama (Mika ve ark. 2006), benzetilmiş tavlama (Hapke ve ark. 2000) yöntemlerinin problemin çözümünde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada oluşturulan modelin çözümü için sezgisel yöntemler kullanılarak çalışılması ve problemin yapısına uygun bir algoritma ile etkin bir çözüm oluşturulması hedeflenmektedir.

Önerilen yöntem farklı bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılarak, yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı proje kaynaklarının mevcut olduğu durumlarda ve farklı proje teknik karmaşıklığı senaryolarında çalıştırılarak test edilmiştir. Senaryo analizlerinden sonra, oluşturulan yöntem gerçek proje çalışmasında kullanılmış ve önerilen matematiksel modelin gerçek projenin modellenmesinde başarıyla kullanıldığı tespit edilmiştir. Elde edilen toplam proje süresi, toplam proje maliyeti, proje faaliyeti çizelgesi ve kaynak kullanımlarına dair model sonuçları, proje gerçekleştirmeleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında büyük tutarlılık olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde, önerilen yöntemin gerçek projelerde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Yapılan çalışma ile projelerde mevcut bulunan zaman ve maliyet risklerinin modellenmesinde kullanılabilecek matematiksel bir model hazırlanmış, oluşturulan model için çözüm yöntemi oluşturulmuş, senaryo analizleri ve gerçek proje uygulaması yapılarak ele alınan KKPÇ probleminin etkin şekilde çözümünü gerçekleştiren ve gerçek projelerde kullanılabilecek bir yöntem oluşturulmuştur.

1.6. Tezin Organizasyonu

Gerçekleştirilen tez çalışması beş bölümde sunulmaktadır. Giriş bölümünden sonra sırasıyla, ikinci bölümde literatürde yapılan önceki çalışmalar incelenmekte, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan materyal ve metod tanıtılmakta, dördüncü bölümde yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen bulgular tartışılmakta ve son bölümde çalışmanın özeti ve bundan sonraki dönemde yapılacak çalışmalara dair öneriler yer almaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümü literatürdeki çalışmaların incelenmesine ayrılmıştır. Bölümün birinci ve ikinci kısımlarında bulanık kümeler teorisi ve proje yönetimi alanlarında gerçekleştirilen önemli çalışmalar incelenmektedir. Üçüncü kısımda, bulanık kümeler teorisine dayanan bulanık programlama yöntemlerinin proje yönetimi alanındaki uygulamaları araştırılmıştır. Ele alınan KKPC problemiyle ilgili yapılan detaylı literatür taraması dördüncü kısımda sunulmaktadır. Hesaplama karmaşıklığı olduğu gösterilen KKPC problemiyle ilgili önerilen çözüm yöntemleri beşinci kısımda ele alınmaktadır. Altıncı kısımda ise yapılan literatür taramasının sınıflandırılması amacıyla oluşturulan literatür taksonomisi sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde öncelikle çalışmada kullanılan materyal birinci kısımda tanıtılmıştır. İkinci kısımda ele alınan endüstri mühendisliği probleminin formülasyonu incelenerek matematiksel modelin oluşturulması üzerinde durulmuştur. Oluşturulan modelin çözümünde kullanılan analitik ve sezgisel çözüm yöntemleri incelendikten sonra yapılan deneysel tasarım çalışması anlatılmış ve modelin bilgisayar kodu sunulmuştur.

Dördüncü bölümde yapılan çalışma sonucunda ortaya çıkan araştırma bulguları altı kısımda tartışılmaktadır. Birinci kısımda matematiksel model kullanılarak yapılan örnek uygulamanın anlatılmasından sonra, ele alınan KKPC problemindeki hesaplama karmaşıklığı konusu detaylı olarak ikinci kısımda incelenmektedir. Üçüncü kısımda problem büyüklüğü, kaynak kısıtları ve öncelik ilişkilerine göre elde edilen model sonuçları ele alınmaktadır. Dördüncü kısımda modelin çözümünde kullanılan doğrudan optimizasyon yöntemi, başlangıç

çözümünün sezgisel algoritmayla belirlenmesi yöntemi ve çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi sunulmaktadır. Önerilen yöntemle ilgili yapılan senaryo analizleri beşinci kısımda incelenmektedir. Beşinci kısımda ise, yöntemin gerçek proje uygulaması ele alınmış ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Son bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sayısal sonuçlar özetlenmiş ve ilgili alanlarda bundan sonraki dönemde yapılabilecek çalışmalar ele alınmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Endüstri Mühendisliği dalında son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde bulanık kümeler teorisini esas alan yöntemlerinin çalışmalarda önemli bir yer tuttuğu gözlemlenmektedir. İlk olarak 1960'lı yılların ortalarında ortaya çıkan bulanık kümeler teorisi geçen yıllarla birlikte pek çok değişik alanda uygulanmaya başlanmıştır. Konu hakkında pek çok çalışma yapılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Sistemlerde varılan belirsizliğin modellenmesinde yeni bir dönem başlatan bu önemli konu hakkındaki çalışmalar halen yoğun şekilde devam etmektedir. (Klir 1998)

Yirminci yüzyılın ikinci yarısında üzerinde yoğun şekilde çalışan bir diğer alan ise proje yönetimi alanıdır. Bu alandaki çalışmalar asıl olarak İkinci Dünya Savaşı'nı takiben başlamış ve konunun ayrı bir alan olarak değerlendirilmesi ancak bu yıllarda gerçekleşmiştir. Özellikle silah sistemlerinde yaşanan büyük gelişmeler sonunda bu sistemlerle ilgili projelerin en iyi şekilde yönetilmesi gerekliliği ortaya çıkmış ve CPM ve PERT gibi ağ tabanlı teknikler 1950'lerin sonunda ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeleri takiben alanda büyük bir ilgi yoğunluğu oluşmuş ve çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda 1970'li yıllardan sonra bir yavaşlama görülmüştür. Son dönemlerde ise daha çok eski tekniklerin geliştirilmesiyle teknik açıdan ileri ve daha karmaşık metodlar ortaya çıkmıştır. (Davis 1983)

Proje yönetimi yapısı gereği belirsizliklerin klasik sistemlere göre daha yüksek olduğu sistemlerin yönetimiyle ilgilenmektedir. Bu noktada belirsizlikleri modellemede yeni ve faydalı bir yöntem olan bulanık kümeler metodolojisinin kullanılmasıyla verimli sonuçlar elde etmek mümkün olabilecektir.

Takip eden kısımlarda ilk olarak bulanık kümeler konusunda literatürde yapılan çalışmalar ve kullanılan teknikler ele alınacaktır. Daha sonra proje yönetimi alanındaki çalışmalar ve problem çözüm teknikleri sunulacaktır. Üçüncü kısımda bulanık kümeler teorisinin proje yönetimi alanındaki uygulamalarına yönelik olarak proje yönetiminde bulanık programlar konusu ele alınacak ve bu alanda yapılan çalışmalar değerlendirilecektir. Dördüncü kısımda kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi (KKPÇ) problemi ile ilgili bugüne kadar literatürde yapılan çalışmalar

incelenmektedir. Ele alınan problemin çözümüne yönelik yapılan çalışmalar bölümün beşinci kısmında yer almaktadır. Son kısımda ise çalışmanın literatürdeki yerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiş olan taksonomi çalışması sunulmaktadır.

2.1. Bulanık Kümeler Teorisi

Bulanık kümeler teorisi ilk olarak 1965 yılında Prof. L.A. Zadeh tarafından matematiksel bir kuram olarak ortaya atılmıştır. Bu kuram kesin olarak tanımlanamayan veya belirlenemeyen hedeflerin ifadesi için doğal bir ortam olarak düşünülmüştür. Zadeh aynı zamanda bulanık kümeler teorisiyle olasılık teorisinin birbirleriyle olan yakın ilişkisini de göstermiştir. Bu şekilde bulanık kümeler yaklaşımı ile istatistiksel teknikler bilgisayarların da desteğiyle birleştirilmiş ve ortaya yeni ve verimli bir araştırma ve uygulama sahası çıkmıştır. (Terano 1992)

Bulanık kümelerle ilgili anlamsal yaklaşımlar genel olarak üç ayrı kategoriye ayrılabilir. Bunlardan birincisi bulanık kümelerin anlamların benzerliğinin ve yakınlığının bir ifadesi olarak kullanılmasıdır. Bu yaklaşım gruplama, tanımlama ve sınıflandırma uygulamalarında kullanılmaktadır.

İkinci yaklaşımda ise bulanık kümeler eksik veya bulanık bilginin olasılık dağılımları şeklinde ifade edilmesinde kullanılmaktadır. Bu yaklaşım yöneylem araştırmasındaki karar verme problemlerindeki matematiksel modellerde de belirsiz bilgilerin modelde ifade edilmesine olanak vermektedir. Matematiksel modellerde belirsizlik modeldeki kesin katsayıların yerine bulanık sayıların veya bulanık oranların kullanılmasıyla modele dahil edilir. Bu uygulama bulanık aritmetik ve bulanık sayılar üzerindeki diğer işlemlerin kullanılmasına ihtiyaç gösterir.

Bulanık kümeler teorisinin uygulamasıyla ilgili üçüncü yaklaşımda ise esnek bir şekilde belirlenmiş olan kısıtların sağlanması veya hedeflerin gerçekleşmesi için tercihlerin ifadesinde bulanık kümeler kullanılır. Bu yaklaşım özellikle karar verme sırasındaki matematiksel kesinliği ortadan kaldırarak, yerine gerçek hayattaki gibi bir geçiş fonksiyonu oluşturur. Kısıtların karşılanması, optimizasyon, çok-faktörlü karar analizi gibi tekniklerdeki gerekli olan esneklik bulanık kümeler kullanımı ile

sağlanabilir. (Lowen 1993) Özellikle yöneylem araştırması çalışmalarında ikinci ve üçüncü yaklaşımların birlikte kullanılmasını gerektiren pek çok problem mevcuttur.

Bulanık kümelerin uygulamaları pek çok değişik disiplinde görülmektedir. Endüstri mühendisliği dalında şu anda yürütülen bulanık küme uygulamalarını ise dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

Bunlardan birincisi karar verme uygulamalarıdır. Karar verme uygulamalarında bulanık kümeler değişik şekillerde kullanılabilir. Karar verme uygulamalarından birisi tek veya çok ölçütlü karar vermede bulanık tercih modelleridir. Burada klasik yaklaşımdaki kesin ölçütler yerine bulanık ölçütler kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır. Aslında klasik yaklaşımlarla bulanık yaklaşımlar arasındaki temel fark bilgideki belirsizliğin hangi safhada kaldırıldığıdır. Bütün gerçek sistemlerde bilgide belirsizlik mevcuttur. Halbuki sonuç olarak kesin bir karar verilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Klasik yaklaşımlarda önce belirsizlik ortadan kaldırılır ve bu “belirli” bilgi kullanılarak analiz yapılarak kesin sonuca ulaşılır. Bulanık yaklaşımlarda ise belirsizlik korunarak analiz yapılır; analizden sonra belirsizlik kaldırılarak sonuca ulaşılır. Bu şekilde sonucun daha sağlıklı ve gerçek durumu temsil ediyor olması sağlanır. Ancak bu iyileşmeye karşılık analiz safhasının da daha karmaşık hale gelmesi kaçınılmazdır.

Bir diğer karar verme uygulaması grup karar vermesi sırasında bulanık yöntemler uygulamasıdır. Burada kilit soru bir grup halindeki bireylerin tercihlerinin nasıl en iyi şekilde ifade edilebileceğinin bulunmasıdır. Bu sorunun cevabı bireysel tercihlerin bulanık ifadelerinin bulunması ve bulanık çoğunluk tercihinin tanımlanabilmesinde yatmaktadır. Bu konudaki bir diğer soru da gruptaki fikir birliğinin derecesinin nasıl en iyi biçimde ifade edilebileceği sorusudur. Bulanık oyun teorisi de karar verme uygulamalarının bir parçasını oluşturmaktadır. Oyun teorisiyle bulanık kümeler teorisi birleştirilerek ortaya çıkan bu alanda da çalışmalar sürdürülmektedir.

Bulanık kümeler uygulamalarının ikinci ana başlığı bulanık matematiksel programlamadır. Tek veya çok amaçlı bulanık doğrusal programlama yöntemleri konunun birinci kısmını oluşturmaktadır. Bana ek olarak doğrusal programlamada kullanılan katsayıların bulanık hale getirilmesiyle ortaya çıkan tekniğe “esnek

programlama” adı verilmiştir. Doğrusal programlama tekniğinin gerçek hayatta çok kullanılan tekniklerden birisi olduğu araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Bu güçlü tekniğin daha da çok kullanılmasının önündeki engel gerçek hayatta kesin bilgiye ulaşmanın zorluğu ve maliyetidir. (Janko 1990) Bulanık değişkenlerin bu alanda kullanılmasıyla doğrusal programlama tekniği çok daha az maliyetle gerçek hayat problemlerinin çözümünde kullanılabilecektir.

Bulanık doğrusal olmayan programlama teknikleri de benzer şekilde kullanılan bir diğer tekniktir. Bulanık doğrusal olmayan programlamada özellikle Pareto en iyi çözümün bulunması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu alanda çok amaçlı doğrusal olmayan programlamada karar vericinin bulanık yaklaşımlarının gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi hedeflenmektedir.

Bulanık değişkenlerin matematiksel programlamada kullanıldıkları bir başka alan tamsayı bulanık en iyilemedir. Bunların arasında özellikle proje yönetimi ile de yakından ilgili olarak en iyileme ve çizelgelendirme konuları dikkati çekmektedir. CPM ve PERT yöntemlerinin bulanık karşılıkları üzerine yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bu alanda çizelgeleme, atama ve taşıma problemleriyle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır.

Bulanık dinamik programlama yöntemleri de çok aşamalı karar verme problemlerinin bulanık programlama yöntemiyle çözümüne katkı sağlayan bir alandır. Bu yöntemde aşamalar arasındaki geçişler ve ulaşılan hedefler bulanık değişkenler kullanılarak modellenmektedir. Bunun sonucu olarak deterministik ve stokastik yaklaşımların ötesinde gerçekçilik sahibi sonuçlara elde etmek mümkün olmaktadır. (Lowen 1993)

Endüstri mühendisliği ile yakından ilgisi bulunan istatistiksel veri analizi yöntemlerinde de bulanık kümeler teorisinin faydalı uygulamaları yapılmıştır. Örneğin rasgele deneylerde bulanık verilerin kullanılmış ve olasılık teorisiyle bulanık kümeler teorisinin bir sentezi çıkmıştır. Özellikle parametre tahminleri ve hipotez testlerinde bulanık değişkenler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Bunlara ek olarak istatistiksel karar verme yöntemlerinde bulanık değişkenler kullanılmış ve bulanık fayda fonksiyonlarının maksimizasyonu konusunda çalışılmıştır.

Kullanılan bir diğer istatistiksel yöntem ise bulanık regresyon analizi olmuştur. Elde bulunan veriye bulanık doğrusal bir model uydurulması için iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi en küçük hata kareleri yöntemiyle bulanık kümeler arasındaki mesafenin en kısa hale getirilmesi yöntemidir. İkincisi ise olasılık dağılımları kullanılarak en iyi doğrusal modelin bulunması yöntemidir. (Kacprzyk 1993)

Güvenilirlik, bakım ve yenileme konuları ise bulanık yöntemlerin kullanıldığı dördüncü alandır. Bu alandaki temel yaklaşım sistemdeki bir nesnenin işler durumdan işlemez duruma geçişinin klasik modellerin aksine anlık değil, sürekli olmasıdır. Bu şekildeki bir yaklaşımla sistemlerin güvenilirliği yeniden ele alınmış ve faydalı sonuçlar elde edilmiştir.

Bakım ve yenileme konularında da bulanık değişkenlerin ve sayıların kullanılmasıyla gelişmeler kaydedilmiştir. Özellikle makinelerin ekonomik ömürleri bu yeni yaklaşımda incelenmiş ve en iyi yenileme zamanları tespit edilmiştir. (Janko 1990)

Genel olarak bulanık değişkenlerin uygulamaları endüstri mühendisliğinin hemen her alanında görülmektedir. Doğada varılan belirsizliğin modellenmesine olasılık teorisinden farklı ve yapıcı bir yaklaşım geren bulanık kümeler teorisi hakkındaki çalışmalar büyük bir ilgiyle sürmektedir.

2.2. Proje Yönetimi

Sürekli üretim, atölye tipi üretim gibi standart üretim yöntemlerine paralel olarak, tek bir defa ve özel olarak tasarlanması gereken projelere yönelik üretim sistemlerinin zamanla önem ve hız kazanması, bu tür projelerin verimli bir şekilde yönetilmesi ihtiyacını yaratmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla oluşan Proje Yönetimi alanı kavram olarak kısaca, “varılan çevre koşulları içinde, projenin yaşam döngüsü boyunca, projeye ayrılan kaynakların belirlenen amaçlara varabilmek için en iyi (optimum) biçimde kullanılması” olarak tanımlanabilmektedir.

Proje yönetimi alanı esas olarak ancak 2. Dünya Savaşı’ndan sonra ortaya çıkmıştır. 1950’li ve 1960’lı yıllarda giderek daha karmaşılaşan silah sistemlerinin

geliştirilmesi savunma programlarının daha etkili yönetilmesi için araştırmaların hız kazanmasına yol açmıştır. 1950'lerin sonlarına doğru bazı ağ bazlı tekniklerin (örneğin PERT ve CPM) ortaya çıkması ile proje yönetimine odaklanan büyük ilgi neticesinde özellikle 1960 ve 1970'li yıllarda bu konuda pek çok eser yayımlandı. O zamandan beri araştırma yoğunluğu her ne kadar azaldıysa da, proje yönetimi hem teknik yaklaşımlar hem de konuların çeşitliliği açısından büyümüş ve karmaşıklaşmıştır. (Özsu 1986)

Proje yönetiminde en yaygın olarak kullanılan yöntemler ağ bazlı yaklaşımlara dayanır. Bu yaklaşımların ortak özelliği, projeyi gerçekleştirmek için gereken basamakların grafiksel olarak ve birbirlerine bağımlılık ilişkileri göz önünde bulundurularak temsil edilmesidir. Ağ modellerinde:

- Proje planlanması, program oluşturulması ve zamanlama
- Zaman – maliyet dengesi
- Kaynakların dağıtımı

konuları önemli kriterlerden bazılarıdır.

Ağın zaman açısından incelenmesinde temel iki metot vardır: CPM (Critical Path Method – Kritik Yol Yöntemi)'nde işlemlerin alacağı tahmin edilen süre deterministiktir ve dolayısıyla işlemlerin gerçekleştirilmelerinde ortaya çıkabilecek değişik olasılıklar hesaba katılmadan her işlem için tek bir süre belirlenir. Projenin gerçekleşme süresini ise bitime ulaşmak için gereken en uzun yol belirler. PERT (Project Evaluation and Review Technique – Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Yöntemi)'nde ise işlem sürelerinin belirli bir istatistik dağılım gösterdiği kabul edilir. Tipik olarak her işlem için iyimser, kötümser ve en olası süreler tahmin edilerek durumun rastsallığı dikkate alınır.

Bunlara ek olarak Grafiksel Değerlendirme ve Gözden Geçirme Yöntemi (GERT - Graphical Evaluation and Review Technique)'nde, işlemlerin süresindeki rastsallığa ek olarak projedeki işlemlerin gerekli olup olmayacağı konusundaki belirsizlik analize dahil edilir. Yani projenin bitimi için gereken işlemlerin sayısı ve niteliği deterministik değildir. (Moder 1983)

Herhangi bir sonucun etkinliğini saptamada en önemli etmenlerden birisi proje maliyetidir. Ek maliyetler pahasına proje süresinin sıkıştırılması olasılıklarının

incelenmesi süre – maliyet analiziyle yapılır. Burada esas varsayım, her işlemin (ve dolayısıyla proje süresinin) artan maliyet seviyeleriyle kısıllanacağıdır.

Kaynak dağıtımı ise proje yönetiminin çok önemli diğer bacağıdır. Projenin gerçekleştirilebilmesi için gereksinim duyulan kaynaklar dört ana grupta toplanabilir: insangücü, malzeme, donanım ve para. Bu kaynakların dağıtımındaki iki ana sorundan ilki eldeki sınırlı miktardaki kaynağın proje işlemlerine en iyi şekilde dağıtılması ile ilgilidir. İkincisi ise kaynak kullanımının zaman içinde düzenli olmasını sağlamak (kaynak dengelemesi) olarak tanımlanabilir. (Lester 1991)

Bu basamakların uygulanması sırasında çeşitli matematiksel zorluklar söz konusudur. Özellikle optimum kaynak dağıtımı sorunu, artan işlem miktarıyla birlikte çok zor bir hal alır. Bunların aşılmasında ise çeşitli yöntemler, matematiksel modeller ve özellikle gelişmiş bilgisayarların işlem gücünden sıklıkla yararlanılmaktadır.

Proje Yönetimi araştırmalarının devam ettiği bir diğer alan da çözüm algoritmalarının geliştirilmesidir. (genetik algoritmalar, dal-sınır algoritmaları, sezgisel algoritmalar, v.b.) Ayrıca, proje yönetim uygulamalarının gerçek hayata geçirilmesinde karşılaşılan organizasyonsal sorunlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. (Tavares 2002)

2.3. Proje Yönetiminde Bulanık Programlama

Bulanık Uygulamaların Proje Yönetimi'nde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde iki konunun ön plana çıktığı görülmektedir.

Bunlardan birincisi bulanık doğrusal ve doğrusal olmayan programlamadır. Doğrusal programlamanın proje yönetiminde geniş bir uygulama alanı vardır. Ancak, klasik doğrusal programlamada kesin kısıtların ve hedeflerin kullanılması doğrusal programlamanın uygulamalarında bazı eksikliklere yol açmaktadır. Olasılık teoreminin etkisiyle oluşturulan stokastik doğrusal programlama modellerinin uygulamaları ise kesin olmayan verilerin modellenmesinde yeterli olamamıştır. Bunun sonucu olarak da stokastik doğrusal programlama metotlarının kullanımı sınırlı kalmıştır. (Lilien 1987)

Bulanık doğrusal programlama yöntemleri ise kesin olmayan verilerin doğrusal programlama ile değerlendirilmesinde yeni ufuklar açmıştır. Bulanık modellerin kullanılmasının ilk faydası gerçeğe çok daha yakın modellerin oluşturulmasına olanak vermesidir. Buna ek olarak veri toplama ve işleme maliyetlerini düşürme imkanı sağlamaktadır. Karar verici öncelikle pahalı veri toplama yöntemlerini kullanmadan toplayabileceği basit bilgilerle ilk interaktif modeli oluşturarak bir “başlangıç çözümü” elde eder. Daha sonra bu çözümdeki sonuçlara bakarak ek olarak hangi verilere ihtiyacı olduğunu belirler. Ek verilerin interaktif modele eklenmesiyle bulunan “başlangıç çözüm” adım adım iyileştirilir. Bu yaklaşımla veri toplama ve işleme maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Bulanık doğrusal programlama yöntemlerinde karar verici sahip olduğu bilgi ölçüsünde bulanık bir model oluşturabilir. Klasik modeldeki kesin parametreler, değişkenler ve hedeflerden bazıları veya tamamı bulanık karşılıklarıyla değiştirilebilirler. Ortaya çıkan modellerin çözümündeyse simpleks algoritması yerine bazı başka yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin birbirlerinden farkı bulanık doğrusal programlama modelini klasik doğrusal programlama veya hedef programlama yöntemine dönüştürürken kullandıkları varsayımlardır.

Doğrusal olmayan programlamada kullanılan bulanık yöntemler bulanık doğrusal programlamada kullanılanların genellenmesiyle oluşmaktadır. Bulanık doğrusal olmayan programlamada çok amaçlı yöntemler, interaktif çok amaçlı yöntemler ve çok amaçlı doğrusal olmayan hedef programlama mevcuttur. Çok amaçlı yöntemlerde karar vericinin her amacı için bulanık bir hedefinin mevcut olduğu varsayılır. Bulanık hedefler bulanık küme üyelikleri fonksiyonları kullanılarak sayısal hale getirilirler. Ardından oluşturulan Pareto en iyi çözümlerden uygun olanı çözüm olarak seçilir.

Yukarıda anlatılan yöntemde karar vericinin çözüm aşamasında müdahalesine ihtiyaç yoktur. Oysa ki, gerçek hayatta pek çok durumda karar verici ile etkileşim halindeki interaktif yaklaşımların çok amaçlı doğrusal olmayan programlamada kullanılması gerekmektedir. Aynı zamanda çok amaçlı doğrusal olmayan programlama problemlerinin çözümünde çok amaçlı doğrusal olmayan hedef programlama yöntemi de kullanılmaktadır. (Sakawa 2002)

Proje Yönetimi'ndeki bulanık uygulamaların yoğunlaştığı ikinci konu tamsayı bulanık eniyileme konusudur. Bu alanda üzerinde çalışılan konular arasında maksimum ve en ucuz akış problemleri, en kısa yol problemleri, taşıma ve çizelgeleme problemleri, çanta problemleri, 0-1 programlama problemleriyle birlikte CPM ve PERT problemleri sayılabilir. Bu yöntemlerin pek çoğu proje yönetimi alanında kullanılabilmektedir. CPM ve PERT metodları ise proje yönetiminde özel öneme sahiptirler. (Evans 1989)

Projelerde ağ planlama yöntemleri üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. CPM yönteminin genellenmesiyle ve bulanık zamanların kullanılmasıyla yeni modeller elde edilmiştir. Ayrıca bulanık değişkenlerin PERT yönteminde kullanılmasıyla ortaya çıkan bulanık PERT metodu da proje yönetimi alanında kullanılmaktadır. Bulanık yöntemler ve proje yöntemlerinin kullanıldığı yukarıda belirtilen her iki alan da bulanık matematiksel programlama alanına dahildirler.

Proje yönetiminde bulanık programlama konusu ile ilgili alanlarda yapılan çalışmalara ait konulardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Projelerde Ağ Planlaması (Chanas ve Kamburowski, 1981)
- Proje Yatırımları (Lai ve Hwang, 1992)
- Optimal Sistem Tasarımları (Zeleny 1986)
- Optimal Çizelgeleme (Baptistella ve Ollero, 1980)
- Kalite Kontrol (Chakrabroty 1994)
- Personel Seçimi Problemi (Rubin ve Narasimhan, 1984)

Yukarıdaki konulardan görüldüğü üzere proje yönetiminde bulanık programlama konusuyla ilgili çok geniş bir alanda pek çok değişik endüstri mühendisliği problemi mevcuttur. Bu problemler arasında ilgi çekici ve gelişmeye açık konulardan birincisi bulanık CPM / PERT konusudur. Proje Yönetimi dalında çok önemli bir yere sahip olan bu metodların bulanık yöntemlerle incelenmesiyle projelerde zaman yönetimi problemlerine verimli çözümler bulunabilecektir.

Proje yönetiminde bulanık programlamada ikinci önemli alan proje yatırımlarının değerlendirilmesinde bulanık değişkenlerin kullanılmasıdır. Burada projelerin devamı süresince önceden değeri kesin olarak bilinemeyen değişkenlerin proje maliyetine ve karlılığına olan etkileri incelenmektedir. Özellikle belirsizliğin

yüksek olduğu durumlarda bu yöntemin kullanılmasıyla değerli sonuçların elde edilmesi mümkün olabilecektir.

Projede kullanılan kaynakların görevlere en iyi biçimde dağıtılması konusu da ilgi çekici bir üçüncü konudur. Bu tür problemlerde özellikle klasik olarak kullanılan doğrusal programlama yöntemleri yerine bulanık doğrusal programlama yöntemleri kullanılarak kaynakların dağıtımının belirsizlik ortamında en iyi şekilde yapılması amaçlanmaktadır.

Proje faaliyetlerinin modele dahil edilmesi sırasında kullanılan yöntem çalışmanın önemli bir temelini teşkil etmektedir. Shipley ve Arkadaşları (1997) tarafından yapılan “BIFPET methodology versus PERT in project management: fuzzy probability instead of the beta distribution” adlı önemli çalışmada proje faaliyetlerinin modellenmesi üzerine yeni ve etkili bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde klasik modellerde faaliyet sürelerinin modellenmesinde kullanılan istatistiksel beta dağılımının yerine faaliyetlerin süresi bulanık sayılarla ifade edilmektedir. Faaliyet süresinin ifadesinde beta dağılımında olduğu gibi faaliyetin iyimser, ortalama ve kötümser süreleri esas alınmaktadır. Ancak, bu sürelerin tespitinde istatistiksel beta dağılımı yerine uzman görüşü kullanılmaktadır. Araştırmacılar, bu yaklaşımın gerçek hayatın modellenmesinde daha başarılı olduğunu ve özellikle faaliyet süresinin istatistiksel olarak hesaplanması için yeterli veri olmadığı durumlarda da kullanılabileceği için geniş bir uygulama sahası olduğunu ifade etmektedir.

Shipley ve arkadaşları (1997) PERT yönteminde kullanılmakta olan istatistiksel beta dağılımının yerine bulanık dağılımların nasıl kullanılacağı ve bu yaklaşımın avantajları üzerinde durmuştur. Yazarlar, beta dağılımının uzun yıllardan bu yana kullanılmakta olmasına rağmen uzun süre teorik bir ispata dayandırılmadan pratikteki sonuçlara bağlı olarak kullanıldığı için eleştirildiğini belirtmektedirler. Daha sonraları yapılan çalışmalar sonucunda beta dağılımının teorik olarak da kullanıma uygun olduğu ancak pek çok durumda modifikasyonlara ihtiyaç duyulduğu ortaya konmuştur. Bu ise hesap yapma yükünü artırmakta ve özellikle geçmiş bilgilerin yeterli olmadığı durumlarda beta dağılımının kullanımını zorlaştırmaktadır.

Araştırmacılar istatistiksel olan beta dağılımının yerine insan görüşünün kullanıldığı BIFPET (The Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time) metodolojisinin kullanılmasını önermektedirler. BIFPET metodolojisi de beta dağılımı gibi faaliyetin iyimser, ortalama ve kötümser tahmini üzerine kurulmuştur. Her faaliyetin sürdürülmesinden sorumlu olan formenler faaliyetin iyimser, ortalama ve kötümser süreleri ve bu durumların gerçekleşme ihtimalleri üzerinde tahminlerde bulunurlar. Proje yöneticisi formenlerin kişisel yaklaşımlarının gerçeğe yakınlığını ve diğer faktörleri göz önünde tutarak gerekli revizyonları yapabilir. Örneğin, formen tarafından 0,3 ihtimalle 1 günde tamamlanacağı öngörülen faaliyetin 0,4 veya 0,2 ihtimalle 1 günde tamamlanacağını kabul edebilir.

Proje ağının oluşturulmasından ve faaliyet sürelerinin bulanık dağılımlarının yukarıda bahsedilen şekilde hesaplanmasından sonra BIFPET yönteminin uygulanabilmesi için istatistiksel işlemler yerine bulanık küme işlemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bulanık kümelerde kesişim, birleşim ve tümleyen küme işlemleri aşağıdaki şekilde tanımlıdır:

$$A = S a_i / x_i$$

$$B = S b_i / x_i$$

$$A \cap B = S g_i / x_i \quad g_i = \text{Min} (a_i , b_i)$$

$$A \cup B = S g_i / x_i \quad g_i = \text{Max} (a_i , b_i)$$

$$\emptyset A = S g_i / x_i \quad g_i = 1 - a_i$$

Bulanık kümelerde Zebda'nın tanımı aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$Q_{ijk} = S a_{ijk} / a_k$$

Burada t zamanında sistem i durumundayken j girdisini alarak $t+1$ 'de k durumuna geçme olasılığı Q_{ijk} 'dir. Bulanık kümelerin genişletilmesi yöntemleri kullanılarak hesaplamalar için gerekli olan dağılımın beklenen değeri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$B_{ijk} = S b_{ijk} / b_k$$

$$E(B_{ij}) = S c_{ijl} / b_l$$

Burada:

$$C_{ijl} = \text{Max}(a_l, \dots, a_p, b_l, \dots, b_p e f^{-1}(b_l)) \quad \text{Min}_k \{ a_{ijk}, b_{ijk} \} \text{ ve}$$

$$b_l = \begin{cases} \sum_k a_x b_x & \text{Eğer } S_k a_x = 1 \\ 0 & \text{Diğer durumlarda} \end{cases}$$

Bu beklenen değer fonksiyonu kullanılarak faaliyetlerin beklenen zamanları üzerinde işlem yapılabilmekte ve projenin tamamı için sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu çalışma daha sonra literatürde bu konuda yapılan çalışmalara ışık tutan özelliktedir. Projelerde faaliyet sürelerinin deterministik veya probabilistik şekilde belirlenmesi yerine bulanık üyelik fonksiyonlarının kullanılmasının pratik ve anlamlı olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir.

Proje yönetiminde aktivitelerin kritikliğini risk faktörü olarak değerlendiren bir başka makalede (Kuchta, 2001) bulanık sayılar kullanılarak riskli aktivitelerin belirlenmesi ve bunlara göre genel proje riskinin ölçülmesi için bir metod önerilmiştir. Proje yönetiminde risk kavramının değerlendirilmesinde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada temel olarak bir aktivitenin kritikliğinin o aktivitenin riskliliğini gösterdiği kabul edilmektedir. Benzer şekilde projenin genel riskliliğinin hesaplanması için proje ağında bulunan riskli (kritik) aktivitelerin sayısı, bunların risk dereceleri ve proje ağındaki yerleri esas alınmaktadır.

Klasik proje yönetimi yöntemlerinde bir faaliyet ya kritiktir veya kritik değildir. Öte yandan bulanık yöntemler kullanıldığı zaman bir faaliyetin “az kritik” veya “çok kritik” olması gibi derecelendirmeler yapmak mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım gerçek hayattaki durumları ve proje yöneticisinin görüşlerini yansıtmaya daha uygundur.

Makalede klasik yöntemlerde kullanılan en erken başlama zamanı, en geç başlama zamanı, fazla, düzeltilmiş fazla kavramları kullanılarak hesaplamalar

yapılmış ve bunların bulanık karşılıkları ve anlamları verilmiştir. Ayrıca projenin genel risk seviyesinin belirlenmesi için faaliyetlerin kritiklik değerlerinin ağırlıklı ortalamasının kullanılması önerilmiştir. Bu hesaplamalar sırasında kaynak kısıtları ve maliyetler modele dahil edilmemiştir.

Korvin ve Kleyle (2000) tarafından bulanık proje çizelgelenmesinde kısıtlı kaynakların da bulanık olarak modele dahil edilmesiyle proje aktiviteleri ve kaynak yetenekleri arasında bir eşleşme oluşturan bir model önerilmektedir. Çalışmada önerilen modelde kaynak olarak iş gücü alınmış ve iş gücünün yeteneklerine göre ihtiyaç duyulan proje faaliyetlerine tahsis edilmesi konusu üzerinde durulmuştur. Ancak, yazarlar bu modelde iş gücü ile birlikte diğer kaynakların da aynı yaklaşımla kullanılabileceğini belirtmektedirler.

Söz konusu modelde gerçekleştirilecek projenin çeşitli fazlardan oluştuğu ve bu fazlar için ihtiyaç duyulan bazı kaynaklar (iş gücü nitelikleri) olduğu öngörülmektedir. Kaynakların ise bir havuzda toplandığı (personel havuzu) ve her bir personel bazı özelliklere sahip olduğu kabul edilmektedir. Esnek kaynak maliyetlerinin esnek bir bütçe ile karşılandığı varsayılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan modelde her proje fazının gerçekleştirilmesi için gereken optimum kaynakların belirlenmesi hedeflenmektedir.

Modelin değişkenleri aşağıdaki şekildedir:

$P_1, P_2, \dots, P_N$: proje fazları

$X_1, X_2, \dots, X_j$: mevcut iş gücündeki personel

a_{ik} : s_{ik} yeteneğine her fazda P_i duyulan ihtiyaç derecesi ($0 < a_{ik} < 1$)

b_{jt} : Personel X_j tarafından sahip olunan s_{jt} yeteneği derecesi ($0 < b_{jt} < 1$)

X_j ve P_i arasında bir eşleşme oluşturmak için tanımlanan model kısıtları:

$$P_i = \sum_{k=1}^{n_i} a_{ik} / s_{ik}$$

$$B = \sum_{t=1}^{m_j} b_{jt} / s_{jt}$$

Uyumluluk kriteri,

$$\text{Comp } [X_j, P_i] (u) = \text{Sup } X_j(s)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Bütçe kısıtlarının da mevcut olduğu modelde atama algoritması şöyledir:

- Adım 1. Personel X_j 'i $\text{Comp } [X_j, P_i]$ değerini ve bütçede yeterli miktar olmasını göz önüne alarak seç.
- Adım 2. Kalan bütçeyi hesapla.
- Adım 3. Personel ataması yapıldığı için proje fazı P_i gereken kaynaklar değiştiğinden ihtiyaç duyulan yetenekleri yeniden hesapla.
- Adım 4. Eğer ihtiyaçlar tamamlanmışsa algoritmayı sonlandır, tamamlanmamışsa adım 1'e dön.

Modelde yukarıdaki algoritmayla elde edilen sonuçların kesinleştirilmesi için ise alan ortalaması metodunun kullanılması öngörülmektedir. Bu model bulanık yöntemlerin proje yönetimine başarıyla uygulanabileceklerini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

2.4. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi (KKPÇ) Problemi

KKPÇ problemi hakkında literatürdeki en kapsamlı çalışmalardan birisi Özdamar ve Ulusoy (1995) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada yazarlar söz konusu problem hakkındaki önemli çalışmaları inceleyerek sınıflandırmışlar ve çalışmalarını çok sayıda örnek problem kullanarak test etmişlerdir. Sonuç olarak ortaya KKPÇ problemini pek çok farklı yönlerden ele alan yaklaşımlar ve bu yaklaşımların detaylı analizlerini içeren kapsamlı bir çalışma çıkmıştır.

Yazarların çalışmalarına göre araştırmacıların çoğunluğu zaman esaslı amaçları çözmeye yönelmişken, maliyet esaslı amaçları çözmeye çalışan araştırmacıların sayısı düşüktür. Yazarların bunun sebebinin muhtemelen maliyet esaslı amaçların çözümünde karşılaşılan problemlere dayandığını ifade etmektedirler. Halbuki bir projenin maliyeti göz önüne alınmadan yapılacak

çalışmalarda bulunacak çözümlerin tatminkar olmayacağı açıktır. Bu sebeple maliyet veya kar esaslı modellerin temel alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yine Özdamar ve Ulusoy'un (1995) çalışmasında maliyet esaslı modeller, üç gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki problemlerde kaynak kısıtları dikkate alınmamış, sadece faaliyetler öncelik sırasına göre şimdiki net değeri en yüksek alınacak şekilde çizelgelenmiştir. İkinci grup modellerde projede yenilenebilir kaynaklar olduğunu, yani kaynakların her zaman biriminde yeniden tam kapasiteyle başlattığı varsayılmıştır. Üçüncü grup modellerde ise yenilenemeyen kaynaklar kullanıldığı varsayılmıştır. Gerçek hayat projelerinde her zaman kaynak kısıtlamaları olduğu gibi genellikle yenilenebilen ve yenilenemeyen kaynaklar bir arada bulunmaktadır.

Maliyet esaslı amaçlı modellerde aynı zamanda kaynak kısıtları da gözönüne alınarak çizelgeleme yapıldığı durumlarda optimal çözümlere ulaşmak için literatürde genellikle tamsayı programlama tekniğinin kullanıldığı gözlenmiştir. Yang ve arkadaşları (1992) tarafından yapılan çalışmada projenin şimdiki net değeri yenilenebilir kaynak kısıtları altında maksimize edilirken bir tamsayı programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada projenin belirli bir hedeflenen tamamlama tarihi olduğu ve bu tarihten önce bitirilmesi durumunda erken bitirme primi sözü konusu olacağı varsayılmıştır. Ayrıca kaynakların her zaman biriminde farklı miktarlarda kullanılabileceği varsayılmaktadır. Araştırmalar kullanılan modelle çözüm zamanı çok uzamadan optimal sonuçlar elde ettiklerini ve bu problemin çözümünde kullanılan sezgisel yöntemlerden daha başarılı sonuçlara ulaştıklarını belirtmektedirler.

Wang (2002, 2004) tarafından yapılan çalışmada ürün geliştirme projesinde KKPC problemi ele alınmıştır. Böyle bir proje genel olarak kendine özgü aktiviteleri olan ve daha önceki projelerle fazla benzerliği bulunmayan bir proje olduğu için aktivitelerin uzunluğunun proje başlangıcında tahmin edilmesi oldukça güç olmaktadır. Bu sebeple istatistiksel yaklaşımların kullanılması böyle bir projede uygun olmayabilir. Ayrıca, böyle bir projede projenin başlangıç ve bitiş zamanları çoğunlukla esnektir ve proje yöneticisi tarafından belirlenmektedir. Bu durumda

bulanık kümeler teorisinin kullanılmasıyla belirsizliğin ve esnekliğin yüksek olduğu bu ortamda modelleme için elverişli bir temel oluşturulabilir.

Problemin formülasyonunda aşağıdaki notasyon kullanılmaktadır:

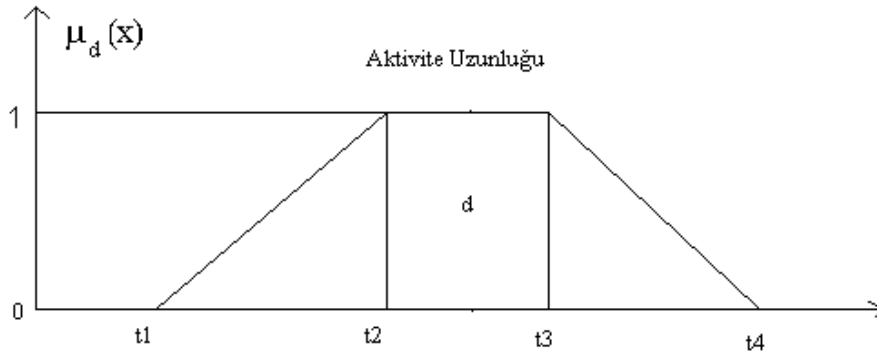
d : aktivite uzunluğu (kontrol edilemez)

$m_d(x)$: aktivite uzunluğunu gösteren bulanık küme üyelik fonksiyonu

b : esnek proje başlangıç zamanı

e : esnek proje bitiş zamanı

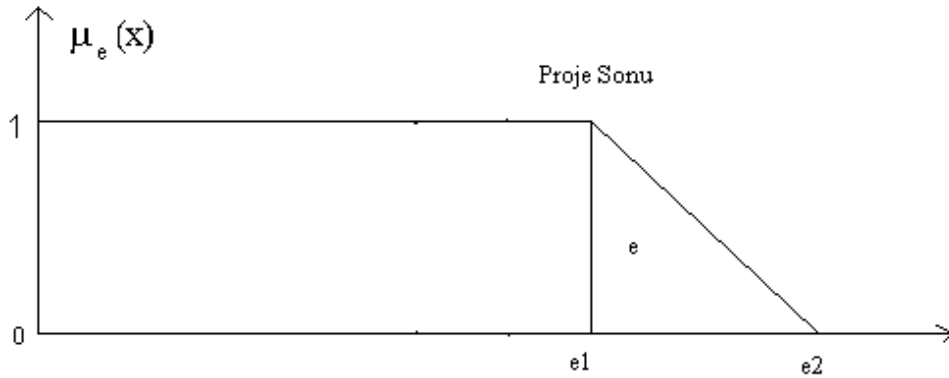
Esnek proje başlangıç zamanı b için $m_b(x)$ ve esnek proje bitiş zamanı e için $m_e(x)$ üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bulanık üyelik fonksiyonları işlemleri kolaylaştırmak amacıyla yamuk bulanık dağılımlar olarak seçilmişlerdir. Örneğin, $m_d(x) \sim (t_1, t_2, t_3, t_4)$ için:



Şekil 2.1. Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu

Bu dağılımda t_2 ile t_3 arasındaki değerler aktivite uzunluğunun alması gereken en muhtemel değerleri, t_1 'den küçük ve t_4 'ten büyük değerler ise aktivite uzunluğunun en az ihtimalle alabileceği değerleri göstermektedir.

Esnek proje başlangıç zamanı b ve esnek proje bitiş zamanı e için de yamuk esnek dağılım kullanılmaktadır. Burada $b=(b_1, b_2, b_3, b_4)$ ve $e=(e_1, e_2, e_3, e_4)$ sayıları proje yöneticisinin bu esnek zamanlar hakkındaki tercihlerini yansıtmaktadır. Örneğin, proje yöneticisi projenin e_1 'den önce bitirilmesini tercih etmekte ve e_2 'den daha geç kalmamasını istemektedir. Bu durumda $e=(e_1, e_1, e_1, e_2)$ dağılımı proje yöneticisinin bu tercihi ifade etmektedir:



Şekil 2.2. Yamuk Bulanık Proje Sonu Üyelik Fonksiyonu

Esnek başlangıcı b ve esnek bitişi e olan bir projede i ($1 < i < n$) sayısında faaliyet gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Faaliyetler arasında öncelik bağıntısı mevcut bulunabilmektedir ve bu bağlantılarla ilgili bilgiler faaliyet gerçekleştirilirken ortaya çıkmaktadır. Faaliyetlerin tamamlanabilmesi için d_i kadar zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca faaliyetlerin gerçekleşmesinde gerekli kaynak miktarları (kaynak türü: $1, 2, \dots, q$) $N_i = (n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iq})$ vektörüyle gösterilmektedir. Benzer şekilde proje için tahsis edilmiş bulunan kaynaklar $R_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iq})$ vektörüyle gösterilmektedir.

s_i : Faaliyet i 'nin başlangıç zamanı

est_i : Faaliyet i 'nin en erken başlama zamanı

olarak tanımlandığında model aşağıdaki şekilde oluşmaktadır:

En erken başlama zamanı kısıtı:

$$s_i \in [est_i, +\infty)$$

burada:

$$est_i \leftarrow \begin{cases} \max_j \{est_i, est_j \oplus d_j\} & \text{Eğer aktivite } i \text{ den önce aktivite } j \text{ mevcutsa} \\ b & \text{Eğer aktivite } i \text{ den önce aktivite yoksa} \end{cases}$$

($\max$ bulanık maksimum operatörü ve $\oplus$ bulanık toplama operatörüdür.)

En geç başlama zamanı kısıtı:

$$s_i \in (-\infty, l_{st_i}]$$

burada:

$$l_{st_i} \leftarrow \begin{cases} \min_j \{l_{st_i}, l_{st_j} \ominus d_j\} & \text{Eğer aktivite } j' \text{ den önce aktivite } i \text{ mevcutsa} \\ e & \text{Eğer aktivite } i' \text{ den sonra aktivite yoksa} \end{cases}$$

(min bulanık minimum operatörü ve $\ominus$ bulanık çıkarma operatörüdür)

Öncelik kısıtları:

$$s_j - s_i \in [d_i, +\infty) \quad \text{eğer aktivite } i \text{ aktivite } j' \text{ den önceyse}$$

Kaynak kapasitesi kısıtları:

$$J = \{i \mid s_i < t < s_i \dot{A} d_i\} \text{ ise:}$$

$$\sum_{i \in J} n_{ik} \leq m_k \quad (k = 1, 2, \dots, q \text{ için})$$

Bu şekilde oluşturulan bir modelde amaç fonksiyonu geç kalma ihtimalini en aza indiren fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Makalede herhangi bir çizelgeleme s için performans ölçütü olarak çizelgeleme riski $SR(s)$ tanımlanmış ve proje yöneticisinin çizelge hakkındaki olumlu ve olumsuz görüşlerini yansıtmak üzere b parametresi bu ölçüte dahil edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak ise bulanık kısıtları tamamen veya kısmen karşılayan çözümler bilgisayar yardımıyla bulunmakta ve bu çözümler için çizelgeleme riski hesaplanmaktadır. Çözümler sırasında bulanık kümelerle ilgili bulanık operatörler tanımlanmış ve bunlara göre işlem yapılmıştır. Sonuç olarak, çizelgeleme riski en az olan çözüm uygulanmak üzere önerilmektedir.

Bu makalede bulanık çizelgeleme yöntemiyle mevcut kaynak kısıtları altında proje çizelgelemesi yapılması ve projenin geç kalma olasılığının en aza indirilmesi konusu ele alınmıştır. Amaç olarak zaman kriteri seçilmiş, maliyet konusuna ise değinilmemiştir.

Bir başka çalışmada (Liberatore, 2002) ise proje çizelgelemesinde zaman belirsizliği üzerinde durularak bulanık CPM metodu klasik yöntemlerle karşılaştırılmış ve aktivitelerin belirsizliğinin proje süresi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu çalışmada aktivite zamanları CPM metodundaki deterministik süreler yerine bulanık dağılımlar olarak verilmektedir. Örneğin; $B = 1/0,3; 2/1,0; 3/0,5$ gösterimi 1 günün aktivite B'nin bulanık süre kümesinin 0,3 değerinde üyesi olduğunu, 2 günün 1,0 değerinde (kesin olarak) üyesi olduğunu ve 3 günün 0,5 değerinde kümeye üye olduğunu göstermektedir.

Bu yaklaşımda faaliyetlerin süresi kesin olarak bilinemediği için kritik yol da kesin olarak bilinmemektedir. Makalede kritik yolun bulunabilmesi için faaliyet sürelerinin bütün kombinasyonlarının hesaplanması ve bu şekilde hesaplanan yolların kritiklik derecesinin belirlenmesi için bulanık küme teorisindeki inanç işlemlerinin kullanılması önerilmektedir. Çözüm yönteminin sonunda alan merkezi yöntemi kullanılarak bulanık çözümler kesin çözümlere dönüştürülmektedirler.

Bu yöntem özellikle faaliyet sayısının fazla olduğu durumlarda işlem yükünü artırmakta ve pratik bir zamanda çözüm bulunmasını zorlaştırmaktadır. Yazarın görüşü geçmişte yapılmış ve hakkında bilgi sahibi olunan faaliyetlerden oluşan bir proje için istatistiksel yöntemlerin kullanılması, yeni yapılan bir projede ise bulanık yaklaşımın kullanılmasının daha uygun olacağı yönündedir. Ayrıca, bu yöntemde kullanılan bütün alternatiflerin hesaplanması yerine daha hızlı yöntemlerin kullanılmasının faydalı olacağı makalede ifade edilmektedir.

Klasik CPM yöntemiyle bulanık CPM yöntemini karşılaştıran bu makale her iki yöntemi de temel olarak açıklamakta ve avantajlı ve dezavantajlı yönlerini ortaya koymaktadır. Ancak, bulanık CPM yöntemi de kendi başına kullanıldığı için kaynak kısıtları ve maliyet konularını probleme dahil edilmemiştir.

2.5. Çözüm Yöntemleri

Oluşturulan modelin çözümüyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar ise model çözüm yönteminin belirlenmesinde yol göstermiştir. Oberguggenberger ve arkadaşları (1999) kaynak kısıtlarıyla birlikte zaman ve maliyet unsurları birlikte ele almış ve sadece üç aktiviteden oluşan bir proje için yapılan uygulamada sonucun optimize edilmesinin mümkün olmadığını ileri sürmüşlerdir. Makalede proje yönetiminde pek çok belirsizliğin mevcut olduğu ve probabilistik modellerin belirsizliklerin içerdiği bilgileri yakalamakta başarılı olmayabileceği ifade edilmektedir. Bu tür problemlerin çözümünde sezgisel yaklaşımların kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Baar ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan çalışmada ise modelde yer alan bazı kısıtların gevşetilmesiyle optimal çözüm için bir alt sınır elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada gevşetilen problem sütun jenerasyonu tekniğiyle çözülerek çözüm üzerinde bir alt sınır elde edilmesi yoluna gidilmiştir. Bu yöntemde her ne kadar sütun sayısı faaliyet sayısına üstel şekilde bağlı olarak artsa da yöntemin hızlı bir şekilde sonuç verdiği yazarlar tarafından ifade edilmektedir.

Brucker ve arkadaşları (1999) tarafından yazılan “Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods” adlı makalede KKPC problemiyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar sınıflandırılmış ve çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. KKPC probleminin çözüm yöntemleri arasında dal-sınır algoritmaları birinci sırada yer almaktadır. Patterson ve arkadaşları (1990) tarafından yapılan çalışmada “the precedence tree” adı verilen dal-sınır algoritması kullanılarak problem çözülmüştür. Ayrıca Stinson ve arkadaşları (1978) ve Mingozi ve arkadaşları (1998) tarafından yapılan çalışmalarda dal-sınır algoritmasının çeşitli ilavelerinin kullanılmasıyla çözüm teknikleri geliştirilmiştir.

Proje çizelgeleme probleminin çözümünde sezgisel yöntemler de etkin şekilde kullanılmaktadır. Literatürde kullanılan ilk sezgisel yöntemler öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemlerdir. Kelley tarafından yazılan “The critical path

method: Resource planning and scheduling” adlı makalede öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemine göre oluşturulan bir çözüm yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajları kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olması ve hızlı şekilde çözüme ulaşabilmesi olarak görülmektedir. Ancak, elde edilen sonuçların optimal sonuçtan uzaklığı hakkında bulunan belirsizlikler bu yöntem yerine kullanılabilecek başka sezgisel yöntemlerin araştırılmasına yol açmıştır.

Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde Kolisch ve Drexl (1997) tarafından önerilen uyarlanmış arama algoritması Baar ve arkadaşları (1997) tarafından önerilen tabu arama algoritmasının orta ölçekli problemlerin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabildiği ortaya koyulmuştur. Öte yandan Hartmann tarafından “A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling” makalesinde önerilen genetik algoritmaya dayalı çözüm yöntemi ile Bouleimen ve Lecocq (1998) tarafından “A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem” adlı makalede önerilen benzetilmiş tavlama algoritmalarının büyük problemlerin çözümünde etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Oluşturulan modelin uygun şekilde çözümlenmesi için kullanılacak yöntemlerle ilgili olarak Liu (2003) tarafından yazılan “Fuzzy Activity Times in Critical Path and Project Crashing Problems” adlı çalışmada klasik PERT tekniğinin bulanık PERT tekniğine dönüşmesi ve oluşturulan bulanık modelin çözümünde Yager indisi kullanılarak kesinleştirme yapılması üzerinde durulmaktadır. Bu yöntemde konveks bulanık sayıların alan karşılığı yöntemi kullanılarak Yager (1981) tarafından önerilen yöntemle göre sıralanması önerilmekte ve sıralama yapılarak kesin hale getirilmiş olan modelin klasik yöntemlerle çözülmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım özellikle model hacminin büyük olduğu durumlarda bulanık operatörlerin kullanılmasına gerek kalmadan modelin çözülmesi için iyi bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde literatürde kullanılan yöntemler arasında benzetilmiş tavlama algoritmaları (Hapke ve ark. 2000), genetik algoritmalar (Zheng ve Ng 2005), hibrid genetik algoritmalar (Kim ve ark. 2005) ve tabu arama algoritmaları (Mika ve ark. 2008) yer almaktadır.

Bulanık sayıların sıralanması konusunda literatürde çok sayıda yöntem mevcuttur. Fortemps ve Roubens (1996) tarafından yapılan çalışmada bu yöntemlerin çoğunun insan yaklaşımını doğru şekilde ifade etmekte yetersiz kaldığı gösterilmektedir. Öte yandan alan karşılığı yönteminin doğrusallık ve toplanabilirlik özelliklerine sahip olduğu ve insan yaklaşımını doğru şekilde yansıtabildiği ifade edilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bulanık sayıların sıralanmasında alan karşılığı yönteminin kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

2.6. Literatürün Taksonomisi

Bu kısımda öncelikle bugüne kadar literatürde yapılan çalışmalar gözden geçirilmiş ve çalışmanın literatürdeki yerinin ve olası katkılarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, proje çizelgelemesi alanı bir bütün olarak araştırılmış ve literatürde yapılan çalışmalar sınıflandırılarak proje çizelgelemesi problemi taksonomisi oluşturulmuştur. Üzerinde çalışılmakta olan bulanık faaliyet süreli kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi probleminin mevcut çalışmalar içerisinde nerede yer aldığı ve problemin incelenmesinde ve çözülmesinde hangi yöntemlerin kullanıldığı araştırılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalarla ilgili tespit edilen sınıflandırmalar Ek-1’de şematik olarak yer almaktadır.

Proje çizelgelemesi problemi taksonomisi incelendiğinde öncelikle proje çizelgeleme probleminin deterministik mi yoksa belirsizlik altındaki durumda mı incelendiğine göre yapılan çalışmaların ikiye ayrıldığı görülmektedir. Belirsizliğin mevcut olmadığı deterministik durumda temel olarak kullanılan yöntem bilindiği gibi kritik yol metodudur. Öte yandan belirsizlik durumu bulunduğu anda proje çizelgeleme problemi pek çok değişik yöntem kullanılarak literatürde incelenmektedir. Bunlardan birincisi stokastik proje çizelgeleme alanıdır. Deterministik proje çizelgeleme yöntemlerinin yetersizliği gözlemlendikten sonra ortaya çıkan PERT (Project Evaluation and Review Technique) tekniğinde proje faaliyet sürelerinin belirli (deterministik) olmadığı ve faaliyet sürelerinde bulunan belirsizliğin istatistiksel (stokastik) dağılımlar kullanılarak modellenebileceği varsayımı kullanılmaktadır. Buna göre faaliyet sürelerinin istatistiksel beta dağılımı

veya uygun başka bir istatistiksel dağılım kullanılarak uygun biçimde modellenebileceği ve bu şekilde modele dahil edilen faaliyetlere göre proje kritik yolunun belirlenebileceği varsayılmaktadır. Daha sonra geliştirilen teknikler arasında GERT tekniği de bulunmaktadır.

Belirsizlik durumunda proje çizelgeleme probleminin ele alındığı bir başka alan stokastik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme konusudur. Bu yaklaşımda proje faaliyet sürelerinin istatistiksel bir dağılımdan geldiği varsayılmakta ve faaliyetlerin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan kaynakların kısıtlı olarak mevcut olduğu durum ele alınmaktadır. Proje kaynaklarının sınırlı olduğu durumda değişik çizelgeleme politikaları uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi erken başlangıç politikasıdır. Bu politikada faaliyetlerin mümkün olan en erken zamanda başlatılmaları kuralına göre proje çizelgelemesi yapılmaktadır. Kullanılan ikinci politika önseçimli politikalar. Bu politikaya göre faaliyetlerin başlaması için bekleme şartlarının tamamlanmasının yerine getirilmesi gerekmektedir. Literatürde yer alan diğer politikalar arasında doğrusal önseçimli politikalar ve iş öncelikli politikalar yer almaktadır.

Kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi problemi literatürde “np-hard” bir problem olarak tanımlanmaktadır. Buna göre proje faaliyet sayısı arttıkça problemin çözüm süresi geometrik olarak artmakta ve problemin makul süreler içerisinde optimal olarak çözülmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple literatürde büyük problemlerin çözümü için çoğunlukla dal-sınır algoritmaları ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır.

Literatürde faaliyet süreleri stokastik olan bir proje ağındaki bazı problemler de incelenmiştir. Proje ağında yer alan stokastik bir faaliyetin kesilmesi sonucunda faaliyetin yeniden başlatılması ve proje faaliyetlerinin beklenen toplam ağırlıklı gecikmeyi minimize edecek şekilde çizelgelenmesi problemi literatürde yer almıştır. Çözüm metodu olarak dağılmış araştırma metoduna dayalı hibrid bir algoritma önerilmektedir. Literatürde yer alan bir başka problem ise stokastik zaman/maliyet dengesi problemidir. Bu problemin çözümünde ulaşılmak istenilen amaç bütçe kısıtı altında beklenen toplam proje süresini en aza indirmek veya minimum maliyetle fizibil bir proje çizelgelemesi yapmaktır. Stokastik proje çizelgeleme problemlerinde kullanılan bir başka yaklaşım da dinamik programlama yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda

proje ağının başlangıçta oluşturulup uygulanması yerine faaliyetler ilerledikçe dinamik olarak programlanması görüşü benimsenmiştir.

Belirsizlik durumunda proje çizelgeleme probleminde literatürde proje faaliyet sürelerinin istatistiksel dağılımlarla modellendiği stokastik proje çizelgeleme yaklaşımına alternatif olarak ortaya atılan başka bir yaklaşım ise bulanık proje çizelgelemesi yaklaşımıdır. Bulanık proje çizelgelemesi yaklaşımındaki temel varsayım proje faaliyet süreleriyle ilgili çoğu zaman yeterli istatistiki veri bulunmaması ve her projenin aslında kendine özgün bir belirsizlik içermesi sebebiyle faaliyet sürelerinin modellenmesinde istatistiksel dağılımların kullanılması yerine bulanık üyelik dağılımlarının kullanılmasını önermesidir. Bulanık proje çizelgelemesi yönteminin temelinde 1965 yılında Prof. L.A. Zadeh tarafından kuramlanan “possibility theory” yer almaktadır. Bu teoriye göre modelde varılan belirsizlik olasılık olarak değil yakınlık olarak modellenmektedir. Bunun sebebi de proje yöneticilerinin çoğu zaman proje yönetiminde geçmiş istatistiki veriler olmadan uzman görüşüne göre karar vermek durumunda bulunmalarıdır. Bu yöntemde proje faaliyet süreleri çoğunlukla üçgen veya yamuk bulanık sayı dağılımları kullanılarak modellenmektedir.

Bulanık faaliyet süreli proje çizelgelemesi problemi literatürde temel olarak iki başlıkta incelenmektedir. Birinci alan stokastik PERT metodunun bulanık karşılığı olan bulanık PERT metodudur. Bu yöntemde proje faaliyet süreleri bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak modele dahil edilir ve proje kritik yolu tespit edilir. Bu alanda yapılan çalışmaları elde etmeye çalıştıkları amaçlar açısından üçe ayırmak mümkündür. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunluğu proje faaliyet sürelerini ele almış ancak proje maliyetlerini göz önünde bulundurmamışlardır. Bu çalışmalarda amaç genellikle projenin en kısa sürede tamamlanması olarak belirlenmektedir. Bunun için proje kritik yolunun tespit edilmesi ve belli bir bütçe kısıtı altında tespit edilen proje süresinin azaltılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Toplam beklenen proje süresinin en aza indirilmesi amacı yerine ele alınabilecek diğer amaçlar ise proje maliyetlerinin en aza indirilmesi veya hem proje maliyetlerinin hem de proje süresinin göz önünde bulundurulmasıdır. Ancak literatürde bu alanlarda fazla çalışma bulunmadığı gözlenmiştir. Bu çalışmanın konusu da proje maliyetlerinin

minimize edilmesi ve proje süresinin de kontrol edilmesi amacını taşımaktadır. Dolayısıyla yapılan çalışmayla bu alanda bir katkı yapılması hedeflenmektedir.

Literatürde yer alan ikinci alan bulanık kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi problemidir. Bu alan 1994 yılında Hapke ve arkadaşları tarafından incelenmeye başlanmıştır. Problemin çözümü için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi öncelik kurallı seri ve paralel çizelgeleme yöntemidir. Çok amaçlı bulanık kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminin çözümü için ise daha önce çok amaçlı kesin modellerin çözülmesinde kullanılan “Pareto benzetilmiş tavlama” yönteminin kullanılması önerilmektedir. Toplam beklenen proje süresinin en aza indirilmesi için ise doğrusal olmayan ikili tamsayı programlama yöntemiyle model oluşturulması ve oluşturulan modelin çeşitli sezgisel yöntemlerle çözülmesi önerilmektedir. Bulanık kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılan diğer yöntemler ise ışın arama algortiması ve genetik algoritmadır.

Belirsizlik durumunda proje çizelgelemesi probleminde kullanılan diğer yöntemler ise sırasıyla reaktif çizelgeleme, proaktif çizelgeleme ve duyarlılık analizidir. Bunlardan birincisi olan reaktif çizelgeleme yaklaşımında proje çizelgelemesi yapılarak temel proje çizelgesi oluşturulduktan sonra proje faaliyetlerinde bir aksama meydana gelmesi durumu incelenmektedir. Böyle bir aksama meydana gelmesinden sonra temel olarak uygulanabilecek iki strateji yer almaktadır. Bunlardan birincisi proje çizelgesini tamir etme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda sağa kaydırma kuralı gibi kurallar kullanılarak proje çizelgesinin takibinin sürdürülmesi amaçlanmaktadır. İkinci temel yaklaşım ise proje çizelgelemesini yeniden yapmaktır. Bu yaklaşıma göre yeniden proje çizelgelemesi yapılır. Ancak, bunun sıklıkla yapılması halinde proje çizelgelemesinin aşırı reaktif hale geleceğine dair eleştiriler mevcuttur. Bu sebeple literatürde diğer bir yaklaşım olarak proaktif çizelgeleme yöntemleri geliştirilmiştir. Proaktif çizelgelemede temel amaç proje çizelgelemesinin aksamalardan az etkilenmesini sağlayacak şekilde oluşturulmasıdır. Bu amaca ulaşabilmek için kullanılan birinci grup yöntemde proje faaliyetlerine fazlalıklar eklenerek proje çizelgesinin oluşturulması ve böylece herhangi bir aksama meydana geldiğinde proje çizelgesinde değişiklik yapılmadan faaliyetlere devam edilmesinin sağlanması yaklaşımı kullanılmaktadır. Çoklu

çizelgeleme yaklaşımıdaysa eşit iyilikte alternatif proje çizelgeleri yapılması ve takip edilen proje çizelgesinde bir aksaklık olduğu takdirde hazır bulunan diğer çizelgelerden birisinin ikame edilmesi yaklaşımı kullanılmaktadır. Kaynak kullanımlarının soyutlanması ve proaktif kaynak tahsisi teknikleri de literatürde proaktif çizelgeleme yöntemleri arasında yer almaktadır.

Belirsizlik durumunda proje çizelgelemesi probleminin incelenmesinde kullanılan bir diğer önemli yöntem de duyarlılık analizidir. Bilindiği gibi duyarlılık analizinde bulunan sonuçların girdilerdeki değişikliklere karşı ne kadar duyarlı olduğu incelenmektedir. Modelde kullanılan bir parametrenin hangi değerleri arasında bulunan sonucun optimalliğini koruyacağı veya yeni bir parametre değerinde optimal sonucun ne olacağı gibi sorular karşısında uygun duyarlılık analizlerinin yapılması ve modelin sağlamlığının değerlendirilmesi önem taşıyan bir çalışma alanı olarak tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmanın literatürdeki yerinin değerlendirilebilmesi için Herroelen ve Leus (2005) tarafından yazılan “Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials” adlı makaleden de yararlanılmıştır. Bu makalede proje çizelgelemesi problemiyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve proje çizelgelemesi probleminin iki ana başlıkta incelendiği görülmüştür. Belirsizliğin mevcut olmadığı deterministik durumda temel olarak kullanılan yöntem bilindiği gibi kritik yol metodudur. Öte yandan belirsizlik durumu bulunduğu proje çizelgeleme problemi pek çok değişik yöntem kullanılarak literatürde incelenmektedir. Bunlar arasında stokastik proje çizelgeleme, bulanık proje çizelgeleme, reaktif çizelgeleme, proaktif çizelgeleme ve duyarlılık analizi kullanılan temel yöntemler olarak belirlenmiştir. Stokastik proje çizelgeleme yönteminde proje faaliyet sürelerinin belirli (deterministik) olmadığı ve faaliyet sürelerinde bulunan belirsizliğin istatistiksel (stokastik) dağılımlar kullanılarak modellenebileceği varsayımı kullanılmaktadır. Bulanık proje çizelgeleme yönteminde ise proje faaliyet süreleri bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmektedir. Bu şekilde istatistiki veri bulunmadığı ve uzman görüşü kullanılması gereken durumlarda daha kaliteli sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE METOD**3.1. Materyal**

Bu çalışmada öncelikle örnek proje verisi olarak Wang (2002) tarafından yapılan “A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development” adlı çalışmada belirtilen proje verisi kullanılmıştır.

Söz konusu elektronik ürün geliştirme projesinde 51 adet faaliyet bulunmaktadır. Proje faaliyet süreleri bulanık yamuk sayı üyelik fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada bulanık yamuk sayı üyelik fonksiyonları olarak kullanılmış bulunan faaliyet sürelerinin BIFPET yaklaşımına uygun hale getirilmesi amacıyla faaliyet süreleri bulanık üçgen sayı üyelik fonksiyonları ile ifade edilmektedir.

Projede çok kaynaklı durum ele alınmış ve dört proje kaynağı bulunduğu durum üzerinde çalışılmıştır. Her proje faaliyetinin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarları örnek veride belirtilmektedir.

Proje faaliyetleri arasındaki teknik kısıtlar da göz önünde bulundurulmaktadır. Her faaliyetin gerçekleşmesi için tamamlanması gereken faaliyetler faaliyetle ilgili bilgilerde belirtilmektedir.

Özellikle proje faaliyetleriyle ilgili geçmiş bilgilere sahip olunmadığı örneğin bu gibi ürün geliştirme projelerinde faaliyet sürelerinin proje yöneticisi tarafından uzman görüşü esas alınarak belirlenmesi önem kazanmaktadır.

3.2. Metod

Çalışmada kullanılan metod beş kısımda incelenmektedir. Birinci kısımda ele alınan KKPÇ probleminde kullanılan problem formülasyonu incelenmektedir. İkinci kısımda, oluşturulan matematiksel modelde kullanılan notasyonla birlikte amaç fonksiyonu ve model kısıtları sunulmaktadır. Üçüncü kısımda matematiksel modelin çözümü için kullanılan analitik ve sezgisel yaklaşımlar tartışılmaktadır. Model performansının değerlendirilmesi amacıyla yapılan deneysel tasarım çalışması

dördüncü kısımda ele alınmaktadır. Beşinci kısımda ise modelin bilgisayar kodlamasında kullanılan yaklaşım sunulmuştur.

3.2.1. Problemin Formülasyonu

Bulanık faaliyet süreli KKPC probleminin formülasyonunda öncelikle sistem karakteristikleri incelenmektedir. İkinci kısımda formülasyonda kullanılan varsayımlar sunulmuştur. Üçüncü ve dördüncü kısımlarda modelde yer alan girdi değişkenleri, parametreler ve performans değişkenlerinin belirlenmesi konusu araştırılmaktadır.

3.2.1.1. Sistem Karakteristikleri

Bu çalışmada proje faaliyet sürelerindeki belirsizliğin bulanık olarak ele alınması öngörülmüştür. Belirsizliğin uzman bilgisine dayanarak oluşturulan bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılarak modellenmesinin gerçek projelerde güvenilir ve pratik bir yöntem olduğu ortaya koyulmuştur (Bonnal 2004). Faaliyet sürelerinin bulanık üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde Shipley ve ark. (1997) tarafından önerilen Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time (BIFPET) metodolojisi esas alınmıştır. Faaliyet sürelerindeki belirsizliğin modellenmesinde sıklıkla kullanılan beta dağılımının empirik bilgilere dayandığı ve teorik temelini bulunmadığı ilk defa Grubbs (1962) tarafından ortaya konulmuştur.

Bu konuda daha sonra yapılan çalışmalarda özellikle Farnum ve Stanton (1987) tarafından beta dağılımının teorik temelleri konusunda varsayımlar ileri sürülmüştür. Yazarlara göre a iyimser faaliyet süresi, b kötümser faaliyet süresi ve m beklenen faaliyet süresi değerleri olarak alındığında faaliyet sürelerinin ortalama değeri $(a + 4m + b) / 6$ şeklinde hesaplanabilmektedir. Yazarların yaklaşımına göre modal değerin (m_x) PERT tahmini, beta dağılımının aritmetik ortalama değeri (μ_x) tahminine, $\mu_x = (4 m_x + 1) / 6$ denklemi kullanılarak dönüştürülebilmektedir. Burada eğer $0.13 \leq m_x \leq 0.87$ durumu sağlanıyorsa $\sigma_x = 1/6$ olarak kullanılabilir. Bu durumda faaliyet süresinin aritmetik ortalaması (μ_y) değeri $\mu_y = a + \mu_x (b - a)$ olarak

hesaplanabilmektedir. Bu şekilde modal değerleri bu aralıkta yer alan faaliyetler için beta dağılımında bu hesaplamaların kullanılmasının uygun olduğu teorik olarak gösterilmiş olmaktadır. Ancak, hesaplanan modal değer dağılımının alt veya üst sınırına yakın olduğu durumlarda ortalama değer ve standart sapma hesaplamaları değişmektedir. Eğer $m_x < 0.13$ ise, $\mu_x = 2/(2 + 1/m_x)$ ve $\sigma_x = [m_x^2(1 - m_x)/(1 + m_x)]^{1/2}$ olarak hesaplanmaktadır. $m_x > 0.87$ durumunda ise $\mu_x = 1/(3 - 2m_x)$ ve $\sigma_x = [m_x(1 - m_x)^2/(2 - m_x)]^{1/2}$ olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, beta dağılımı kullanılmadan önce modal değer $[a + 0,13 (b-a)]$, $[a + 0,87 (b-a)]$ aralığında olduğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Beklenen faaliyet süresinin iyimser veya kötümser faaliyet süresine yakın olduğu durumlarda, modal değer çoğunlukla bu aralığın dışında olacaktır. Bu durumdaysa, μ_y ve σ_y değerlerinin yeniden hesaplanması gerekecektir. Bu da proje yöneticisinin pratikte üç ayrı beta dağılımı kullanmasını gerektirmekte ve pratik uygulamayı karmaşıktırmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşımı ile faaliyet sürelerinin proje yöneticisi tarafından uzman görüşü esas alınarak kullanılması mümkün hale gelmekte ve pratik uygulamada önemli kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca, özellikle proje faaliyetleriyle ilgili geçmiş bilgilere sahip olunmadığı durumlarda (örn. ürün geliştirme projelerinde, Wang 2002) bu yaklaşım önem kazanmaktadır. Kullanılan bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşımı ile proje faaliyet sürelerinin belirli olduğunu varsayan deterministik yaklaşıma ve faaliyet sürelerinin bilinen bir istatistiki dağılıma uygun olduğunu varsayan stokastik yaklaşıma göre, pratik kullanımı daha etkin olan bir yaklaşım oluşturulması hedeflenmiştir.

Çalışmada kullanılan matematiksel model ile projenin hem toplam maliyeti hem de zaman kısıtları göz önünde bulundurmaktadır. Literatürdeki KKPC problemleri incelendiğine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda zaman-tabanlı amaç fonksiyonları kullanıldığı ve maliyet faktörüne yer verilmediği görülmektedir (Özdamar ve Ulusoy (1995)). Oysa, gerçek hayat problemlerinde genellikle proje maliyetleri en önemli faktör olarak ele alınmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalar, proje maliyetinin en aza indirilmesi veya proje nakit akışının en fazlalaştırılması amaçları üzerinde durmaktadır. Bu modellerde ise çoğunlukla projenin zaman kısıtlamaları ve proje süresinin maliyete etkileri göz ardı edilmektedir. KKPC

problemlerinin özünde yer alan zaman-maliyet çatışmasına bu çalışmada yer verilmiştir. Kullanılan formülasyonda hem toplam proje maliyetinin en aza indirilmesi öngörülmüş hem de proje süresinin toplam maliyete etkisi göz önünde bulundurularak projenin mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi amaçlanmıştır.

Kullanılan matematiksel modelde çoklu kaynak durumu öngörülmüştür. Yang ve ark. (1992) tarafından çoklu kaynak kısıtı altında proje net değerinin maksimize edilmesine yönelik önerilen karışık tamsayı programlama modeli bu alanda kullanılan benzer modellere örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, kaynak maliyetlerinin sabit olduğu varsayımı kaldırılmış, enflasyonist ve özellikle mevsimsel etkilere bağlı olarak kaynak kullanımı maliyetinin proje süresince değiştiği durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde projenin minimum maliyetle ve zamanında bitirilebilmesi için gereken kaynak dağılımının yapılması öngörülmektedir.

3.2.1.2. Varsayımlar

Bu çalışmaya da esas teşkil eden ve model oluşturulurken kullanılan varsayımlar aşağıdaki şekildedir:

1. Modellenecek projenin anahtar teslimi bir proje olduğu, dolayısıyla maliyeti en aza indirme amacının kar maksimizasyonu amacıyla aynı anlama geldiği varsayılmaktadır.
2. Hedeflenen bir proje bitiş tarihi olduğu ve projenin bu tarihten erken bitmesi halinde erken bitirme primi söz konusu olacağı varsayılmaktadır. Faaliyetlerin mümkün olan en erken zamanda başlatılması hedeflenmektedir.
3. Projedeki faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı türde kaynaklara ihtiyaç olduğu varsayılmaktadır.
4. Kaynakların dönemsel kullanılmasında değişik maliyetlerin mevcut olduğu varsayılmaktadır.
5. Projedeki faaliyetlerin bazılarının başlayabilmesi için bazı diğerlerinin tamamlanması gerektiği öngörülmektedir.

6. Faaliyet sürelerinin üçgen bulanık sayılarla modellenmesi
öngörülmektedir.

Yapılan çalışmada öncelikle varsayımların geçerliliği incelenmiş ve yapılan diğer çalışmalarda kullanılan varsayımlarla uyumluluğu gözönünde tutulmuştur. Birinci varsayım olarak kullanılan anahtar teslimi proje varsayımının geçerli bir varsayım olduğu ve yapılan çalışmalarda maliyet minimizasyonu ile birlikte nakit akışının bugünkü değerinin maksimize edilmesi üzerinde durulduğu görülmüştür. Aynı zamanda yapılan çalışmalarda çoğunluğunda toplam proje süresinin veya ortalama gecikme süresinin minimize edilmesi gibi zaman esaslı amaçlar üzerinde çalışıldığı görülmektedir. Dolayısıyla, projenin mümkün olan en erken zamanda bitirilmesi gerektiği hakkındaki ikinci varsayımın da geçerli olduğu görülmüştür.

Projenin gerçekleştirilmesi sırasında kullanılan kaynaklarla ilgili çeşitli varsayımlar olduğu göze çarpmaktadır. Yapılan çalışmaların önemli bir bölümünde faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan kaynakların kullanımının esnek olduğu ve proje ihtiyacına göre değiştirilebileceği öngörülmektedir. Özellikle kaynak miktarının kısıtlı olmadığı ve maliyetin düşük olduğu pek çok durumda bu varsayım geçerli olabilmektedir. Öte yandan kaynak temininin zor veya çok yüksek maliyetli olduğu bazı projeler veya faaliyetler için kaynak kullanımının sınırlı olması gerektiği belirtilmektedir. Projede kullanılacak olan kaynakların maliyetinin değişken olması varsayımı da bazı özel durumlar haricinde geçerliliğini koruyan bir varsayımdır.

Modelin oluşturulmasında kullanılan hedeflenen bir proje bitiş tarihi olduğu varsayımı ve faaliyet sürelerinin bulanık üçgen sayılarla modelleneceğine dair varsayım da geçerli varsayımlardır. Faaliyet sürelerinin modellenmesinde deterministik ve stokastik yaklaşımlar dışında kullanılan bulanık yaklaşımlarda çoğunlukla üçgen veya yamuk bulanık sayıların kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada da Shipley ve Arkadaşları (1997)'nin "BIFPET methodology versus PERT in project management: fuzzy probability instead of the beta distribution" makalesindeki BIFPET metodolojisinde önerildiği şekliyle üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır. Buna göre geleneksel modellerde faaliyet sürelerinin modellenmesinde kullanılan istatistiksel beta dağılımının yerine üçgen bulanık

sayılar kullanılması öngörülmektedir. Bu yaklaşımda faaliyet süresinin ifadesinde beta dağılımında olduğu gibi faaliyetin iyimser, ortalama ve kötümser süreleri esas alınmakta ve bu sürelerin tespitinde uzman görüşü kullanılmaktadır. Böylece özellikle faaliyet süresinin istatistiksel olarak hesaplanması için yeterli veri olmadığı durumlarda da BIFPET metodolojisinin kullanılabileceği belirtilmektedir.

3.2.1.3. Girdi Değişkenler ve Parametreler

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme probleminde kullanılan iki grup karar değişkeni mevcuttur. Birinci grup karar değişkenleri, faaliyetlerin hangi zaman aralığında yürütüleceğini belirleyen değişkenlerdir. İkinci grup karar değişkenleri ise modelde kullanılan kaynakların faaliyetlere nasıl dağıtılacağını belirleyen kaynak atama değişkenleridir. Ayrıca, modelde kullanılan beş grup parametre bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla faaliyet süresi, kaynak kullanım maliyeti, kaynak kullanım sınırı, faaliyet kaynak ihtiyacı ve öncelik kısıtı parametreleridir.

Bu çalışmada kullanılan birinci grup karar değişkenleri her faaliyetin başlangıç zamanını, bitiş zamanını ve hangi aralıkta devam ettiğini belirleyen faaliyet devam karar değişkenleridir. Bu değişkenler modelde ikili tamsayı değişkenler olarak dahil edilmiştir.

Kaynakların faaliyetlere dağılımını belirleyen ikinci grup kaynak atama karar değişkenleri ise çoklu kaynak durumuna göre modele dahil edilmiştir. Her dönemde kullanılabilecek miktarı sınırlandırılmış olan her kaynağın hangi proje faaliyetinde kaç birim olarak kullanılacağını belirleyen kaynak atama karar değişkenleri tamsayı değişkenler olarak modelde kullanılmaktadır.

Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Probleminin yapısına uygun olarak modelde kullanılan beş grup parametre mevcuttur. Bunlardan birincisi faaliyet süresi parametresidir. Modelde faaliyet süreleri üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonları şeklinde ifade edilmektedir. Faaliyet çizelgelemesi yapılırken kullanılan bulanık üçgen sayılar Yager (1981) tarafından önerilen alan karşılığı indisi kullanılarak sıralandırılmıştır.

Modelde kullanılan ikinci grup parametre kaynak kullanım maliyetlerini belirleyen parametredir. Kaynak kullanım maliyetinin dönemsel olarak değişebildiği varsayımı kullanılmaktadır. Dolayısıyla, her kaynağın projenin dönemlerinde hangi maliyetle kullanılabileceği kaynak kullanım maliyeti parametresiyle ifade edilmektedir.

Üçüncü grup parametre çoklu kaynak varsayımı altında kaynak kullanım sınırlarını belirleyen parametredir. Her kaynağın birim zamanda ve proje süresince kullanılabilecek miktarının kullanılan kaynak türüne göre sınırlı olduğu varsayılmıştır. Bu parametrenin kullanımıyla modelde kaynak dengelemesi yapılması da amaçlanmıştır.

Dördüncü grup parametre ise faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için gereken kaynak ihtiyacı miktarını belirleyen parametredir. Buna göre, her faaliyetin yürütülebilmesi için mevcut kaynakların tamamının veya bir kısmının belirli miktarda kullanması gerekmektedir.

Modelde kullanılan beşinci grup parametre öncelik kısıtı parametreleridir. Proje faaliyetlerinin teknik yapısı gereği bazı faaliyetlerin başlatılabilmesi için bazı diğerlerinin tamamlanması gerekmektedir. Modelde bu ilişkiler teknik kısıtlar matrisi kullanılarak ifade edilmektedir.

3.2.1.4. Performans Değişkenleri

Modelde kullanılacak performans değişkenlerini ve amaç fonksiyonunu belirlemek üzere literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Literatürde esas olarak iki farklı grup amaç fonksiyonu kullanıldığı görülmektedir. Birinci grupta zaman tabanlı amaç fonksiyonları kullanılmakta ve proje toplam zamanının en aza indirilmesi veya ortalama gecikme süresinin en aza indirilmesi gibi hedefler seçilmektedir. İkinci grup amaç fonksiyonlarında ise çoğunlukla toplam proje maliyetinin en aza indirilmesi veya proje nakit akışının bugünkü değerinin en fazlaya çıkartılması hedefleri üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada anahtar teslimi götürü bir proje varsayımı kullanıldığı için maliyet ve kar birbirlerinin tümleşigi olarak minimize veya maksimize edilmesi mümkündür. Ancak amaç fonksiyonunun

bu halinde paranın zaman değeri göz önüne alınmamıştır. Özellikle proje süresinin uzun olduğu durumlarda paranın zaman değerinin de gözönünde bulundurulması gerekebilecektir.

Modelde kullanılan amaç fonksiyonu iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım kaynak kullanım maliyetini ifade eden kısımdır ve her faaliyetin tamamlanması için gereken kaynak miktarının ilgili dönemlerde kullanılmasıyla oluşan maliyeti göstermektedir. Amaç fonksiyonunun ikinci kısmı ise projenin gerçekleşme süresiyle ilgili maliyetleri ifade etmektedir. Hedeflenen bir proje bitiş zamanı olduğu varsayılmıştır. Proje zamanında bitirilemediği takdirde gecikilen her dönemde gecikme cezası veya gelir azalışı sebebiyle bir maliyet olduğu gözönünde bulundurulmaktadır. Benzer şekilde, projenin hedeflenen süreden erken bitirilmesi durumunda erken bitirme primi veya gelir artışı sebebiyle toplam maliyetinin azalacağı öngörülmektedir.

3.2.2. Matematik Programlama Modeli

3.2.2.1. Notasyon

Modelde kullanılan notasyon aşağıdaki şekildedir:

Karar Değişkenleri

S_{it} : Faaliyet başlangıç zamanı değişkeni; $S_{it} = \begin{cases} 1 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de baslıyorsa} \\ 0 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de baslamıyorsa} \end{cases}$

E_{it} : Faaliyet bitiş zamanı değişkeni; $E_{it} = \begin{cases} 1 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de bitiyorsa} \\ 0 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de bitmiyorsa} \end{cases}$

A_{it} : Faaliyet devam zamanı değişkeni; $A_{it} = \begin{cases} 1 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de devam ediyorsa} \\ 0 & \text{faaliyet } i \text{ hafta } t' \text{ de devam etmiyorsa} \end{cases}$

X_{ijt} : Faaliyet i 'nin t haftasında kullandığı kaynak j sayısı

Parametreler

D_i : Faaliyet i 'nin uzunluğu

c_{jt} : Kaynak j 'nin t haftasında kullanım maliyeti

q_{ij} : Faaliyet i 'nin devam etmesi için kullanılacak kaynak j miktarı

p_j : Kaynak j 'nin dönemde kullanılabilecek miktarı

r_j : Kaynak j 'nin proje süresince kullanılabilecek toplam miktarı

o_{ik} : öncelik parametresi; $o_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{faaliyet } i \text{ faaliyet } k \text{'dan hemen önceyse} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}$

T : hedeflenen proje bitiş tarihi

a_t : projenin t hafta geç veya erken bitirilmesine bağlı olarak oluşacak gecikme cezası veya erken bitirme primi

3.2.2.2. Matematiksel Model*Amaç fonksiyonu*

Amaç fonksiyonunun birinci kısmı faaliyet i tarafından t zamanında kullanılan kaynak j miktarının (X_{ijt}), kaynak j 'nin kullanım maliyeti (c_{jt}) ile çarpımlarının toplanmasıyla bulunan kaynak kullanım maliyetidir. Fonksiyonun ikinci kısmında ise projenin son faaliyetinin bitişi (E_{nt}), hedeflenen proje bitiş zamanından (T) büyük olduğu takdirde ($t > T$) gecikme cezası olacağını, küçük olduğu takdirde ($t < T$) erken bitirme primi olacağı öngörülmektedir.

$$\text{Min } M = \sum_i \sum_j \sum_t c_{jt} \times X_{ijt} + \sum_t a_t \times (t - T) \times E_{nt} \quad (1)$$

*Kısıtlar**Dönemsel Kaynak Kapasitesi Kısıtları:*

Her dönemde faaliyetler tarafından kullanılan toplam kaynak j miktarı kaynağının dönemsel kapasitesi olan p_j 'den küçüktür veya eşittir.

$$\sum_i X_{ijt} \leq p_j \quad \forall j, t \quad (2)$$

Toplam Kaynak Kapasitesi Kısıtları:

Bütün dönemlerde kullanılan toplam kaynak j miktarı kaynağının toplam kapasitesi olan r_j 'den küçüktür veya eşittir.

$$\sum_t \sum_i X_{ijt} \leq r_j \quad \forall j \quad (3)$$

Kaynak Kullanımı Kısıtları:

Faaliyet i 'nin tamamlanması için kullanılan toplam kaynak j miktarı, faaliyet i 'nin toplam kullanacağı kaynak j miktarına (q_{ij}) eşittir.

$$X_{ijt} = q_{ij} \times A_{it} \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

Öncelik Kısıtları:

Faaliyet i faaliyet k 'dan hemen önce geliyorsa ($o_{ik}=1$), faaliyet k 'nın başlangıcı S_{ku} faaliyet i 'nin bitişinden E_{it} sonra olmalıdır.

$$\sum_{u=t+1}^T S_{ku} \geq o_{ik} \times E_{it} \quad \forall i, k \quad (5)$$

Faaliyet Süresi Kısıtları:

Faaliyet i , S_{it} zamanında başladıktan sonra D_i süresi boyunca devam eder ve E_{it} zamanında sona erer.

$$E_{i, t + D_i} = S_{it} \quad \forall i, t \quad (6a)$$

$$\sum_t A_{it} = D_i + 1 \quad \forall i \quad (6b)$$

$$A_{i,t+k-1} \geq S_{it} \quad \forall i, t, k = 1, 2, \dots, D_i \quad (6c)$$

Doğruluk Kısıtları:

Faaliyet i 'nin başlangıç (S_{it}) ve bitiş (E_{it}) zamanı tektir ve bu zamanlarda faaliyet devam etmektedir.

$$\sum_t S_{it} = 1 \quad \forall i \quad (7a)$$

$$\sum_t E_{it} = 1 \quad \forall i \quad (7b)$$

$$A_{it} \geq S_{it} \quad \forall i, t \quad (7c)$$

$$A_{it} \geq E_{it} \quad \forall i, t \quad (7d)$$

İkili tamsayı değişken kısıtları:

S_{it} , E_{it} , ve A_{it} ikili tamsayı değişkenlerdir.

$$A_{it}, E_{it}, S_{it} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \forall i, t \quad (8)$$

Pozitif Değişken Kısıtları:

Modeldeki bütün değişkenler pozitifdir.

$$X_{ijt}, A_{it}, E_{it}, S_{it} \geq 0 \quad \forall i, j, t \quad (9)$$

Oluşturulan matematiksel modelin çözümleri ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi dördüncü bölümde ele alınmaktadır.

3.2.3. Çözüm Yaklaşımları

Matematiksel modelin çözümünde kullanılacak olan analitik ve sezgisel çözüm yöntemleri bu kısımda incelenmektedir.

3.2.3.1. Analitik Çözüm

Proje ağının ve teknik kısıtların belirlenmesi ve faaliyet sürelerinin BIFPET yaklaşımı ile belirlenmesinden sonra ortaya çıkan bulanık modelin çözümlenmesi problemi üzerinde çalışılmıştır. Literatürde kullanılan çözüm yöntemleri incelendiğinde temel olarak iki yaklaşım kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan birincisi oluşturulan bulanık modelin bulanık operatörler kullanılarak işlenmesi ve elde edilen bulanık sonuçların bir kesinleştirme yöntemi kullanılarak kesin hale getirilmesi yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda yaşanan problemlerin başında bulanık operatörlerin seçilmesi problemi ve özellikle model büyüklüğü arttıkça yapılan işlemlerin artması ve optimal çözüme ulaşmakta yaşanan problemler gelmektedir. Diğer taraftan kullanılan ikinci grup çözüm yöntemindeyse bulanık model oluşturulduktan sonra modelin kesinleştirilmesi ve kesinleştirilmiş modelin çözümlenmesi üzerinde durulmaktadır. Bu yaklaşıma getirilen eleştiri ise kesinleştirme işleminin diğer yöntemle göre daha önceki aşamada kullanılması sonucunda bulanık değişkenlerin ifadesinde bir değer kaybı olabileceği yönündedir. Ancak, uygulamada özellikle karmaşık modellerde birinci yaklaşımın kullanılmasında yaşanan zorluklar sebebiyle ikinci tür yaklaşımların kullanıldığı gözlemlenmektedir.

Oluşturulan proje ağının çözümlenmesinde problemin boyutu gözönüne alınarak temel olarak ikinci yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre öncelikle faaliyet süreleri bulanık üçgen sayı olarak modele dahil edilerek model oluşturulmuştur. Burada Ahuja ve ark. (1993) tarafından geliştirilen proje planlama optimizasyon modeli kullanılmıştır. Buna göre proje şemasında faaliyetler yaylar üzerinde gösterilmekte ve teknik kısıtlar A kümesi ile gösterilmektedir. Eğer N proje faaliyetleri kümesinin elemanı olan faaliyet (i,j) , A teknik kısıtlar kümesinin de elemanıysa i olayı, j olayı başlamadan önce tamamlanmış olmalıdır. Buna göre:

a_{ij} : i ve j olaylarını birleştiren faaliyet (i,j) 'nin süresi

y_i : i olayı zamanı

olarak tanımlandığında, optimizasyon modeli aşağıdaki şekilde oluşmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Min. } z &= y_n - y_1 \\ y_j - y_i &\geq a_{ij}, (i, j) \in A, \\ y_j &\text{ serbest değişkendir.} \end{aligned}$$

Ahuja ve ark. (1993)'nın yaklaşımına göre oluşturulan bu modelin duali alındığı zaman ortaya aşağıdaki model çıkmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Max. } z &= \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} a_{ij} x_{ij} \\ \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} &= \begin{cases} 1, i=1 \\ -1, i=n \\ 0, i \in N - \{1, n\} \end{cases} \\ x_{ij} &\geq 0, (i, j) \in A. \end{aligned}$$

Ortaya çıkan bu model düğüm 1'den düğüm n 'e bir ünite göndermek üzere bir en uzun yol problemi olarak görülmektedir. Bu modelde faaliyet süreleri olarak kullanılan üçgen bulanık sayıların konveks bulanık sayılar olduğu gözönüne alındığında kritik yol modeli aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Max. } \tilde{z} &= \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} \tilde{a}_{ij} x_{ij} \\ \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} &= \begin{cases} 1, i=1 \\ -1, i=n \\ 0, i \in N - \{1, n\} \end{cases} \\ x_{ij} &\geq 0, (i, j) \in A. \end{aligned}$$

Bu modelde faaliyet süresi olan a_{ij} bulanık olarak modele dahil edilmiştir. Söz konusu faaliyet süreleri sıralama işlemine tabi tutularak sıralandığı takdirde model kesinleşmiş hale gelmektedir. Literatürde bulanık sayıların sıralanması için önerilen çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler arasında literatürde kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan bir yöntem olan alan karşılığı yönteminin kullanılmasının uygun olacağı Liu (2003) tarafından belirtilmektedir. Bu yöntem doğrusallık ve toplanabilirlik özelliklerine de sahip olduğundan problemin çözümünde kullanılması

uygun olacaktır. Yager (1981) tarafından önerilen alan karşılığı indisi aşağıdaki şekilde tanımlıdır:

$$I(\tilde{a}) = \int_0^1 0.5(a_a^L + a_a^U) da$$

Dolayısıyla modeldeki üçgen bulanık sayı halindeki faaliyet süreleri alan karşılığı indisini kullanarak kesin hale dönüştürüldüğünde ortaya aşağıdaki model çıkmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Max. } I(\tilde{z}^*) &= \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} I(\tilde{a}_{ij}) x_{ij} \\ \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} &= \begin{cases} 1, i=1 \\ -1, i=n \\ 0, i \in N - \{1, n\} \end{cases} \\ x_{ij} &\geq 0, (i, j) \in A. \end{aligned}$$

Buradaki $I(a_{ij})$ indisi kesin bir sayı olduğundan model kesinleştirilmiş ve klasik yöntemlerle çözülebilir hale getirilmiştir.

Yapılan çalışmalara göre oluşturulan modeldeki karar değişkenleri ve kullanılan parametreler aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned} x_{ij} &: \text{faaliyet } (i,j) \text{ dual değişkeni} \\ AC_{ij} &: (i,j) \text{ faaliyetinin alan karşılığı indisi (bulanık üçgen sayı)} \\ prec_{ij} &: \text{öncelik parametresi (matris);} \\ prec_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{faaliyet } i \text{ faaliyet } j' \text{ den hemen önceyse} \\ 0 & \text{degilse} \end{cases} \end{aligned}$$

Modeldeki amaç fonksiyonu proje kritik yolunun ve proje maliyetlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Model sonuçları proje süresinin ve proje maliyetinin üçgen bulanık sayılar şeklinde minimum, maksimum ve beklenen değerlerini göstermekte ve proje kritik yolunu belirlemektedir. Buna göre proje yöneticisi kritik

yol üzerindeki faaliyetleri ve proje maliyetlerini kontrol etme imkanına sahip olabilmektedir.

$$\text{Max } z = \sum_i \sum_j AC_{ij} \times X_{ij}$$

Proje ağındaki bazı faaliyetlerin başlayabilmesi için bazı diğerlerinin sonlandırılması gerektiğine dair teknik kısıtlar modelde yer almaktadır:

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = \begin{cases} 1, i = 1 \\ -1, i = n \\ 0, i \in N - \{1, n\} \end{cases}$$

Modelin mevcut hali ve modelde kullanılan varsayımlar değerlendirildiğinde ele alınan bulanık faaliyet süreleri kullanılarak proje çizelgeleme problemine uygun olduğu görülmektedir. Mevcut haliyle model matematiksel programlama yöntemleri kullanılarak optimal olarak çözülebilmektedir.

3.2.3.2. Sezgisel Yaklaşım

Oluşturulan modelin büyük proje boyutları için analitik çözümünün kısa sürelerde mümkün olmayabileceği öngörülmektedir. Bu durumda çözüm için sezgisel yaklaşımların kullanılması uygun olabilecektir. Ayrıca, literatürde KKPC probleminin çözümü için önerilen metasezgisel yöntemler arasında dal-sınır algoritmaları, tabu arama, benzetilmiş tavlama, genetik algoritma gibi teknikler bulunmaktadır.

Literatürde kullanılan ilk sezgisel yöntemler öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemlerdir. Kelley tarafından yazılan “The critical path method: Resource planning and scheduling” adlı makalede öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemine göre oluşturulan bir çözüm yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajları kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olması ve hızlı şekilde çözüme ulaşabilmesi

olarak görülmektedir. Ancak, elde edilen sonuçların optimal sonuçtan uzaklığı hakkında bulunan belirsizlikler bu yöntem yerine kullanılabilecek başka sezgisel yöntemlerin araştırılmasına yol açmıştır.

Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde Kolisch ve Drexl (1997) tarafından önerilen uyarlanmış arama algoritması, Baar ve arkadaşları (1997) tarafından önerilen tabu arama algoritmasının orta ölçekli problemlerin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabildiği ortaya koyulmuştur. Öte yandan Hartmann tarafından "A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling" makalesinde önerilen genetik algoritmaya dayalı çözüm yöntemi ile Bouleimen ve Lecocq (1998) tarafından "A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem" adlı makalede önerilen benzetilmiş tavlama algoritmalarının büyük problemlerin çözümünde daha etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

3.2.3.3. Başlangıç Çözümünün Sezgisel Yaklaşım ile Belirlenmesi

KKPÇ probleminin büyüklüğü arttıkça doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde optimal veya optimale yakın sonuçlar elde edilmesi mümkün olamamaktadır. Bu durum literatürde tespit edilmiş olup, önerilen çeşitli çözüm yöntemleri mevcuttur. Sezgisel algoritmaların kullanılması yöntemi bunlardan birisidir. Bu çalışmada, büyük boyutlu problemlerin makul sürelerde çözülebilmesini sağlamak amacıyla iyi bir başlangıç çözümün sezgisel yöntemlerle bulunması yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece, çok büyük olan çözüm uzayında makul sürelerde optimal veya optimale yakın sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

Çözüm uzayının aranmasında iyi bir başlangıç çözümü elde edilmesi amacıyla kullanılan algortmada proje faaliyetlerinin mümkün olan en erken dönemde başlatılması yaklaşımı kullanılmıştır. Algoritma aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- Adım 1) Çizelgelemesi yapılmamış en düşük faaliyet numaralı faaliyet seçilir.
(faaliyet $i=1,2,...,n$)

- Adım 2) Faaliyet i 'nin başlaması için tamamlanması gereken faaliyetler belirlenir.
(faaliyet $i = 1, 2, \dots, m$)
- Adım 3) Faaliyet i 'nin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan kaynaklar belirlenir.
(kaynak $j = 1, 2, \dots, k$)
- Adım 4) Dönem $t=1$ 'de faaliyetin başlaması için ihtiyaç duyulan kaynaklar mevcutsa ve faaliyet i 'nin başlaması için bitirilmesi gereken faaliyetler bitirilmişse faaliyet i dönem t 'de başlatılır ($S_{i,t} = 1$), değilse faaliyet i başlatılmaz ($S_{i,t} = 0$).
- Adım 5) 4. adımda faaliyet i başlatıldıysa faaliyet devam değişkeninin faaliyet süresi boyunca değeri belirlenir ($t = t, t+1, t+2, \dots, t+d(i)$ için $A_{i,t} = 1$) ve birinci adıma dönülür, faaliyet $i=n$ ise 7. adıma gidilir.
- Adım 6) 4. adımda faaliyet i başlatılamadıysa dönem t değeri bir artırılır ve 4. adıma dönülür, faaliyet $i=n$ ise 7. adıma gidilir.
- Adım 7) Algoritma sona erdirilir.

Başlangıç çözümünün sezgisel algoritmayla belirlenmesi yaklaşımıyla ele alınan KKPC problemi için daha kısa işlemci sürelerinde optimal veya optmale yakın çözümler elde edilmesi hedeflenmektedir.

3.2.4. Deneysel Tasarım

Oluşturulan modelin problemin değişik tasarımlarındaki performansının ölçülmesi amacıyla deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Deneysel tasarım çalışmasında proje faaliyet sayısı, proje kaynak sayısı ve projenin teknik karmaşıklığı için belirlenen farklı seviyeler esas alınmıştır. Üç faktöre göre hazırlanan deneysel tasarım tablosu Tablo 3.1.'de sunulmaktadır:

Tablo 3.1. Deneysel Tasarım Tablosu

Çalışma No	Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı	Öncelik İlişkileri
1	4	2	Düşük
2	10	2	Düşük
3	25	2	Düşük
4	50	2	Düşük
5	100	2	Düşük
6	4	2	Orta
7	10	2	Orta
8	25	2	Orta
9	50	2	Orta
10	100	2	Orta
11	4	2	Yüksek
12	10	2	Yüksek
13	25	2	Yüksek
14	50	2	Yüksek
15	100	2	Yüksek
16	4	5	Düşük
17	10	5	Düşük
18	25	5	Düşük
19	50	5	Düşük
20	100	5	Düşük
21	4	5	Orta
22	10	5	Orta
23	25	5	Orta
24	50	5	Orta
25	100	5	Orta
26	4	5	Yüksek
27	10	5	Yüksek
28	25	5	Yüksek
29	50	5	Yüksek
30	100	5	Yüksek
31	4	10	Düşük
32	10	10	Düşük
33	25	10	Düşük
34	50	10	Düşük
35	100	10	Düşük
36	4	10	Orta
37	10	10	Orta
38	25	10	Orta
39	50	10	Orta
40	100	10	Orta
41	4	10	Yüksek
42	10	10	Yüksek
43	25	10	Yüksek
44	50	10	Yüksek
45	100	10	Yüksek

Tablo 3.1’de yer alan deneysel tasarım çalışmasında birinci faktör olan proje faaliyet sayısı için 4, 10, 25, 50 ve 100 faaliyet olmak üzere beş seviye belirlenmiştir. İkinci faktör olarak belirlenen proje kaynakları sayısı için 2, 4 ve 8 kaynak sayısında üç seviye belirlenmiştir. Üçüncü faktör olarak ele alınan proje teknik karmaşıklığı faktörü için ise düşük, orta ve yüksek teknik karmaşıklık seviyelerinde üç seviye belirlenmiş bulunmaktadır.

3.2.5. Modelin Bilgisayar Kodlaması

Tez raporunun 3.2.2. bölümünde tanımlanmış olan matematiksel modelin bilgisayar ortamında modellenmesi GAMS (The General Algebraic Modeling System) modelleme ortamında yapılmıştır. Modelin hazırlanan bilgisayar kodu Ek 2’de sunulmuştur. Çözüm algoritması olarak OSL çözücüsü kullanılmıştır. Elde edilen model çözümleri Ek 3’te sunulmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan GAMS modelleme ortamı doğrusal, doğrusal olmayan ve karışık tamsayı optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Özellikle, büyük ve karmaşık problemlerin modellenmesinde ve çözümünde kullanılmaktadır. GAMS yazılımı kişisel ve sunucu bilgisayarlarda kullanılabilmekte ve modellemede kullanılan yazılım dilinde standartlaşma sağlamaktadır. Matematiksel modelde yer alan formülasyonlar matematiksel ifade biçimi korunarak modelleme ortamına aktarılmaktadır. GAMS ortamında veri girişi veri listeleri ve veri tabloları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

GAMS modelleme ortamında program derleyicisi ve farklı çözücüler bulunmaktadır. Bu çalışmada GAMS modelleme ortamında mevcut olan OSL ve OSL2 çözücüleri kullanılmıştır. OSL (IBM Subroutine Library) çözücüsü doğrusal programlama, karışık tamsayı programlama ve karesel programlama problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. OSL çözücülerinin kullandığı algoritmalar arasında primal simpleks algoritması, dual simpleks algoritması ile primal, primal-dual ve primal-dual tahmin-düzeltilme iç nokta algortimaları yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan karışık tamsayı matematiksel modelin çözümünde primal ve dual simpleks algoritmaları ve dal-sınır algoritması kullanılmıştır.

Kullanılan OSL çözücülerinde istenilen sonuçların elde edilebilmesi amacıyla bilgisayar kodlamasında gerekli parametreler belirlenerek kullanılmıştır. Öncelikle, problem büyüklüğü göz önünde bulundurularak çözücüye ayrılan hafıza miktarı 1250 MB değerine çıkartılmıştır. Model çözüm süresi üzerindeki sınırı belirleyen işlemci kullanımı süresi 36.000 saniyeye kadar artırılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçların optimal çözümden uzaklığı toleransı sıfır değeri olarak belirlenerek çözücünün optimal sonucu araması sağlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA**4.1. Örnek Uygulama**

Bu kısımda tez çalışmasına konu olan bulanık faaliyet süreli KKPÇ problemiyle ilgili olarak yapılan modelleme çalışmaları ele alınmıştır ve çalışmada kullanılan örnek modelin oluşturulması ve geliştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Çalışmada öncelikle çekirdek model oluşturulmuş ve LINGO optimizasyon paketi kullanılarak dört faaliyetli örnek bir proje ağı için bulanık faaliyet süreleri kullanılarak proje çizelgelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan modelde klasik modellerden farklı olarak faaliyet sürelerindeki belirsizlik stokastik olarak değil bulanık olarak modele dahil edilmiştir. Faaliyet sürelerinin hesaplanmasında BIFPET yaklaşımından yararlanılarak, faaliyetin iyimser, beklenen ve kötümser süre tahminleri üçgen bulanık sayılar olarak modele dahil edilmiştir. Modelin oluşturulmasında gözönünde tutulan varsayımların incelenmesinden sonra modelin yapısı gözden geçirilmiştir. Oluşturulan çekirdek model dört faaliyetli örnek bir proje ağını çözmede kullanılmış ve istenilen sonuçları elde etmekte başarılı olmuştur. Toplam proje süresi ve proje maliyeti ve proje çizelgesi ile proje kritik yolu bulunmuştur. Modelin çözülmesinde LINGO optimizasyon paketi kullanılmıştır.

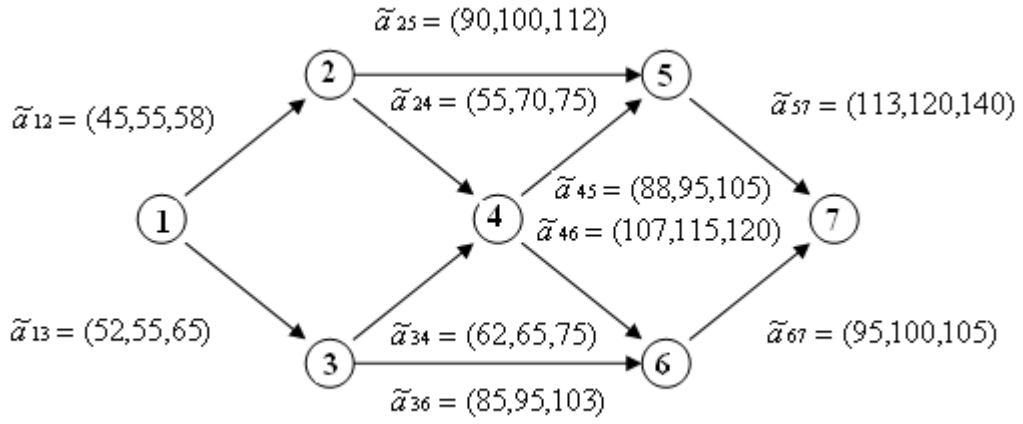
Daha sonra yapılan çalışmaların devamında modelin büyütülmesiyle LINGO optimizasyon paketinin yetersiz kaldığı ortaya çıkmıştır. Bunun üzerine, çalışmanın bundan sonraki kısmında kullanılmak üzere GAMS optimizasyon paketi kullanılmaya başlanmıştır. Daha önce LINGO ortamında hazırlanmış olan model kodu GAMS modelleme ortamına aktarılmış ve ilk adım olarak çekirdek model GAMS ortamında çözülerek aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu aşamada GAMS modelleme dilinin LINGO modelleme diline göre içerdiği teknik farklılıklardan dolayı modellemede bazı farklı yaklaşımlar kullanılmakla birlikte eşdeğer sonuçlara ulaşılmıştır.

Modelin başarıyla GAMS ortamına aktarılmasından sonraki adım modelin büyütülmesi olmuştur. Çekirdek modelde dört olan faaliyet sayısı 25'e çıkartılmıştır. Bu şekilde oluşturulan karışık tamsayı modeli kısıtlı süreler içinde çözülemediğinden modelde değişiklikler yapılarak model doğrusal hale getirilmiş ve proje çizelgelemesi yapılmıştır.

Çalışmanın sonraki döneminde bundan önce yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkartılan modelin üzerindeki çalışmalara devam edilmiş ve modelin büyütülmesi üzerinde durulmuştur. Önceki modelde 25 olarak belirlenen faaliyet sayısı 100'e çıkartılmış ve toplam proje süresi 10 haftadan 25 haftaya çıkmıştır. Böylelikle normal boyutlu bir problemin çözülebilmesi için model yeterli büyüklüğe ulaştırılmıştır.

Modelde proje faaliyet süreleri bulanık üçgen sayılar olarak modele dahil edilmiştir. Wang (2002) tarafından yapılan "A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development" adlı çalışmada kullanılan örnek proje verisi bu çalışmada kullanılmıştır. Orijinal çalışmada yamuk bulanık sayı olarak tanımlanmış olan faaliyet süreleri üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüştür; böylece BIFPET yaklaşımına uygun bir hale getirilerek bu çalışmada kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda proje faaliyetlerinin bulanık üçgen sayılar olarak modellendiği ve birim zamanda esnek kaynak miktarı mevcut olduğu varsayımı altında çalışan model oluşturulmuş ve oluşturulan model GAMS optimizasyon paketi kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen çözümlerde toplam proje maliyeti ve toplam proje süresi belirlenmiş; ayrıca faaliyet çizelgelemesi ve kritik yol tespiti yapılmıştır.

Oluşturulan model için GAMS modelleme ortamında örnek proje için çözümler elde edilmiştir. Modelde örnek proje verisi olarak Liu (2003) tarafından yapılan çalışmada kullanılan örnek proje ağı ve üçgen bulanık faaliyet süreleri kullanılmıştır. Yedi faaliyetten oluşan örnek proje ağı aşağıda gösterilmektedir:



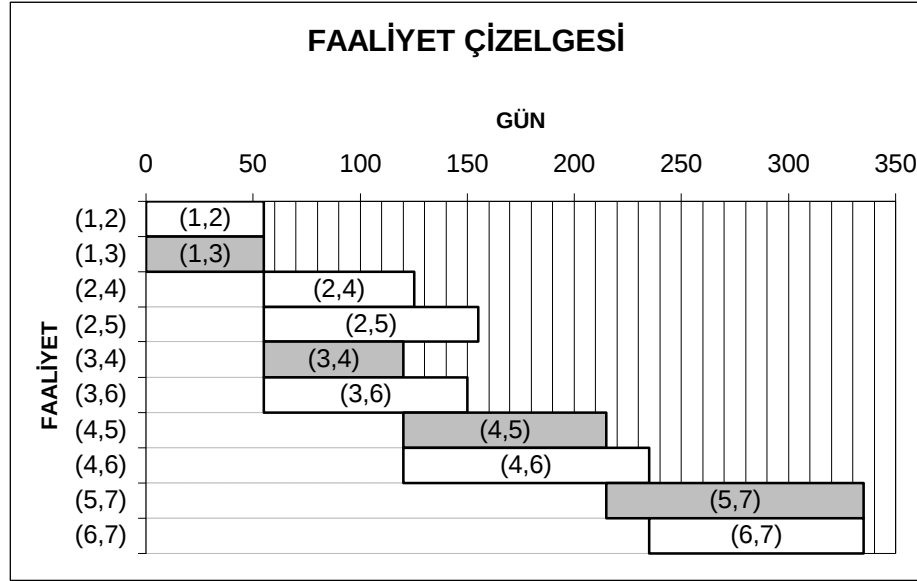
Şekil 4.1. Örnek Bulanık Faaliyet Süreli Proje Ağı (Liu,2003)

Oluşturulan model GAMS optimizasyon paketi ile çözümlenmiştir. Modelde yedi faaliyetli örnek proje ağı esas alınmıştır. Modelin üçgen bulanık sayılarla ifade edilen faaliyet süreleri kullanılarak çözülmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmektedir:

Tablo 4.1. Model Sonuçları

Model Sonuçları	Beklenen Değer
Toplam Maliyet (YTL):	870
Toplam Proje Süresi (gün):	335

Modelin çözümlenmesiyle elde edilen faaliyet çizelgeleri ve proje kritik yolunu gösteren grafik Şekil 4.2’de yer almaktadır. Buna göre faaliyetler (1,3),(3,4),(4,5),(5,7) proje ağındaki kritik faaliyetler olarak belirlenmişlerdir:



Şekil 4.2. Proje Çizelgelemesi

Modelin büyütülmesiyle ortaya çıkan hesaplama karmaşıklığı problemi bir sonraki kısımda incelenmektedir.

4.2. Hesaplama Karmaşıklığının İncelenmesi

Çalışmada ele alınan kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi problemi literatürde *np-hard* olarak tanımlanmış bir problemdir (Leu, 1999). Çizelgeleme probleminin çözümünde optimal sonuçlar elde edebilmek amacıyla ikili tamsayı programlama modelleri, karışık tamsayı programlama modelleri, dinamik programlama ve dal-sınır algoritmaları kullanılmaktadır. Johnson (1967) ve Stinson (1976) tarafından KKPC probleminin çözümü için ayrı ayrı dal-sınır algoritmaları geliştirilmiştir. Ancak, problem boyutunun artmasıyla çözüm uzayında hesaplama süresi patlaması yaşanması probleminin aşılabilmesi için sezgisel yöntemlerin kullanılması önerilmiştir. Ele alınan bulanık KKPC probleminin çözümüyle ilgili olarak çözüm uzayının oluşturulması ve oluşturulan büyük çözüm uzayında optimal veya optimale yakın çözümlerin elde edilebilmesi alanlarında hesaplama karmaşıklığı problemi bulunmaktadır.

Hesaplama karmaşıklığı incelenirken öncelikle çözüm uzayı büyüklüğünün matematiksel olarak incelenmesi üzerinde durulmuştur. Çözüm matrisindeki satır sayısı modelde yer alan sürekli ve kesikli değişkenlerin toplam sayısına eşittir ve $k(m+2n)+1$ satır mevcuttur. Modelde yer alan amaç fonksiyonu ve kısıtların toplam sayısı ise çözüm matrisindeki sütunların sayısına eşittir ve $1+2mk+n^2k+2nk+2n+nk^2$ sütun mevcuttur. Çözüm matrisinin bileşenleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir:

Tablo 4.2. Çözüm Matrisi Bileşenleri

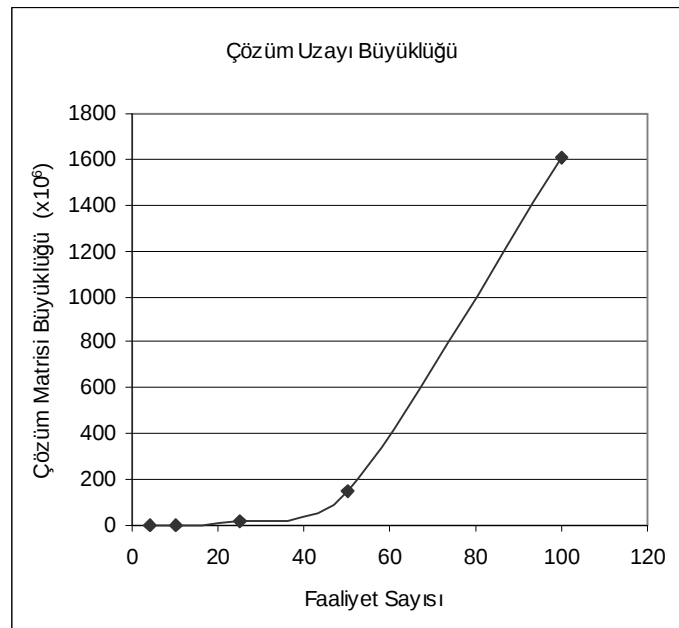
Matris Bileşenleri	Faaliyet Sayısı (n)	Kaynak Sayısı (m)	Planlama Periyodu (k)	Toplam Değişken Sayısı
Satırlar (Değişkenler):				
Sürekli Değişkenler:				
X		m	K	mk
Z				1
Tamsayı Değişkenler:				
A	n		K	nk
S	n		K	nk
Satırlar Toplamı (A):				$k(m+2n)+1$
Sütunlar (Eşitlikler):				
Amaç Fonksiyonu:				
Maliyet				1
Kaynak Kapasitesi Kısıtları				
Klim		m	K	mk
Kaynak Toplam Kullanımı Kısıtları				
Kkul		m	K	mk
Öncelik Kısıtları				
Onclk	n^2		K	n^2k
Faaliyet Süresi Kısıtları				
Sure1				nk
Sure2				n
Sure3	n		k^2	nk^2
Doğruluk Kısıtları				
Dgr1	n			n
Dgr2	n		K	nk
Sütunlar Toplamı (B):				$1+2mk+n^2k+2nk+2n+nk^2$

Çözüm uzayının büyüklüğünün problemde yer alan faaliyet sayısı, planlama periyodu ve kaynak sayısına göre hızla artması problemin bilgisayarda modellenmesinde kullanılması gereken bellek miktarını çok artırmakta ve problemin

kişisel bilgisayar ortamında modellenmesinde hafıza büyüklüğü problemine yol açmaktadır. Modelde planlama periyodu (t) indisi üzerinde yer alan kısıtlar sebebiyle modeldeki eşitliklerin sayısı (sütunlar toplamı) problemlerde matris büyüklüğünün %40'ına kadar azalsa da problem büyüklüğü arttıkça matris büyüklüğü de artmaya devam etmektedir.

Söz konusu alanlardaki problem büyüklüklerinin incelenmesi amacıyla öncelikle Tablo 3.1'de yer alan parametre değerlerine göre çözüm uzayları oluşturulmuş ve büyüklükleri Tablo 4.3'te yer almaktadır.

Tablo 4.3'te elde edilen verilere dayanarak proje faaliyet sayısındaki artışa bağlı olarak çözüm uzayı matrisinin büyüklüğünde oluşan artış grafiksel olarak Şekil 4.3'te gösterilmektedir:



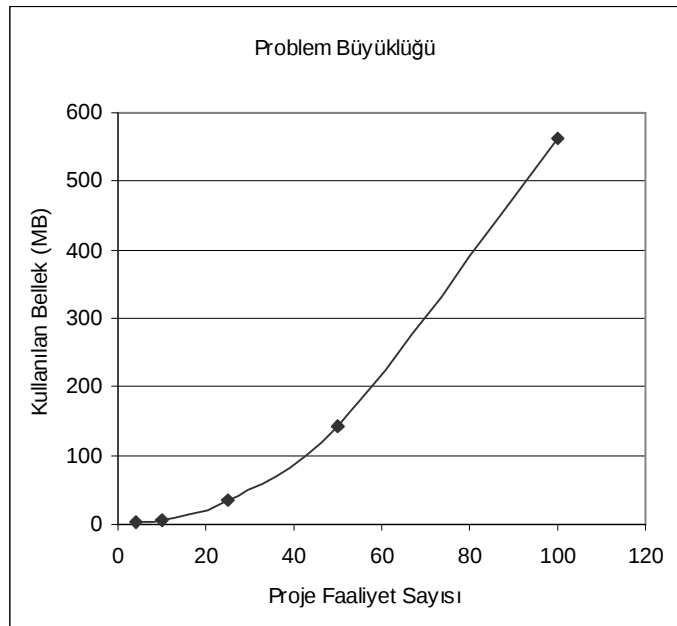
Şekil 4.3. Çözüm Uzayı Büyüklüğü

Tablo 4.3 incelendiğinde çözüm uzayı büyüklüğünün faaliyet sayısına (n), kaynak sayısına (m), ve planlama periyoduna (k) göre oluştuğu görülmektedir:

Tablo 4.3. Çözüm Uzayı Büyüklüğü

Çalışma No	Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı	Öncelik İlişkileri	Sürekli Değ.	Tamsayı Değ.	Toplam Değ.	Eşitlikler	Matris Boyutu
1	4	2	Düşük	51	200	251	3209	$3,07 \times 10^5$
2	10	2	Düşük	51	500	551	9371	$2,05 \times 10^6$
3	25	2	Düşük	51	1250	1301	32651	$2,11 \times 10^7$
4	50	2	Düşük	51	2500	2551	96451	$1,47 \times 10^8$
5	100	2	Düşük	51	5000	5051	317801	$1,61 \times 10^9$
6	4	2	Orta	51	200	251	3209	$8,05 \times 10^5$
7	10	2	Orta	51	500	551	9371	$5,16 \times 10^6$
8	25	2	Orta	51	1250	1301	32651	$4,25 \times 10^7$
9	50	2	Orta	51	2500	2551	96451	$2,46 \times 10^8$
10	100	2	Orta	51	5000	5051	317801	$1,61 \times 10^9$
11	4	2	Yüksek	51	200	251	3209	$8,05 \times 10^5$
12	10	2	Yüksek	51	500	551	9371	$5,16 \times 10^6$
13	25	2	Yüksek	51	1250	1301	32651	$4,25 \times 10^7$
14	50	2	Yüksek	51	2500	2551	96451	$2,46 \times 10^8$
15	100	2	Yüksek	51	5000	5051	317801	$1,61 \times 10^9$
16	4	4	Düşük	101	200	301	3309	$9,96 \times 10^5$
17	10	4	Düşük	101	500	601	9471	$5,69 \times 10^6$
18	25	4	Düşük	101	1250	1351	32751	$4,42 \times 10^7$
19	50	4	Düşük	101	2500	2601	96551	$2,51 \times 10^8$
20	100	4	Düşük	101	5000	5101	317901	$1,62 \times 10^9$
21	4	4	Orta	101	200	301	3309	$9,96 \times 10^5$
22	10	4	Orta	101	500	601	9471	$5,69 \times 10^6$
23	25	4	Orta	101	1250	1351	32751	$4,42 \times 10^7$
24	50	4	Orta	101	2500	2601	96551	$2,51 \times 10^8$
25	100	4	Orta	101	5000	5101	317901	$1,62 \times 10^9$
26	4	4	Yüksek	101	200	301	3309	$9,96 \times 10^5$
27	10	4	Yüksek	101	500	601	9471	$5,69 \times 10^6$
28	25	4	Yüksek	101	1250	1351	32751	$4,42 \times 10^7$
29	50	4	Yüksek	101	2500	2601	96551	$2,51 \times 10^8$
30	100	4	Yüksek	101	5000	5101	317901	$1,62 \times 10^9$
31	4	8	Düşük	201	200	401	3509	$1,41 \times 10^6$
32	10	8	Düşük	201	500	701	9671	$6,78 \times 10^6$
33	25	8	Düşük	201	1250	1451	32951	$4,78 \times 10^7$
34	50	8	Düşük	201	2500	2701	96751	$2,61 \times 10^8$
35	100	8	Düşük	201	5000	5201	318101	$1,65 \times 10^9$
36	4	8	Orta	201	200	401	3509	$1,41 \times 10^6$
37	10	8	Orta	201	500	701	9671	$6,78 \times 10^6$
38	25	8	Orta	201	1250	1451	32951	$4,78 \times 10^7$
39	50	8	Orta	201	2500	2701	96751	$2,61 \times 10^8$
40	100	8	Orta	201	5000	5201	318101	$1,65 \times 10^9$
41	4	8	Yüksek	201	200	401	3509	$1,41 \times 10^6$
42	10	8	Yüksek	201	500	701	9671	$6,78 \times 10^6$
43	25	8	Yüksek	201	1250	1451	32951	$4,78 \times 10^7$
44	50	8	Yüksek	201	2500	2701	96751	$2,61 \times 10^8$
45	100	8	Yüksek	201	5000	5201	318101	$1,65 \times 10^9$

Çözüm uzayı boyutlarının belirlenmesinden sonra çözüm uzayında optimal ve optimale yakın çözümlerin makul sürelerde elde edilmesi problemi ele alınmıştır. Yapılan çalışmalarda, optimal ve optimale yakın çözümlerin elde edilmesinde çözüm uzayının büyüklüğüyle birlikte ele alınan problemin kısıtlarının yapısının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Öncelik ilişkileri (teknik kısıtları) yüksek olan çizelgeleme problemlerinde çözüm uzayı büyüdüğü durumlarda dahi kabul edilebilir sürelerde optimal ve optimale yakın çözümler elde edilebildiği halde öncelik ilişkileri azaldığında çözüm uzayı nispeten daha küçük problemlerde optimal ve optimale yakın çözümler elde edilmesinde güçlükler yaşandığı gözlenmiştir. Oluşturulan modeller GAMS optimizasyon paketinde yer alan OSL algortimasında yer alan dal-sınır algortiması kullanılarak çözülmüştür. Tablo 4.4’de deneysel tasarım ile belirlenen problem senaryoları için elde edilen çözüm süreleri gösterilmektedir. Tablo 4.4’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde tasarlanan 45 farklı senaryonun 15’inin optimal, 8’inin optimale yakın tamsayı sonuç verecek şekilde çözülebildiği; ancak 16 senaryo için kabul edilebilir sürelerde tamsayı çözüm bulunamadığı ve 6 senaryo için çözüm uzayı büyüklüğünün hafıza sınırlarını aştığı görülmektedir. Proje faaliyetleri sayısı ile problem büyüklüğü (kullanılan bellek, MB) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.4’te yer almaktadır.



Şekil 4.4. Proje Faaliyetleri Sayısı ve Problem Büyüklüğü (Kullanılan Bellek, MB)

Tablo 4.4. Çözüm Süreleri

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Çz.Uz. (MB)	Çözücü Durumu	Çözüm	Çz. Sr. (sn.)	Amaç Fon.Değ.	Gör.Uz (%)
1	4	2	Düşük	1,66	Nr.Tm.	Optimal	0,82	35	Optimal
2	10	2	Düşük	6,79	Nr.Tm.	Optimal	2,789	225	Optimal
3	25	2	Düşük	35,56	Ky.Ks.	Ara Çz.	300,941	29430	---
4	50	2	Düşük	143,1	Ky.Ks.	Ara Çz.	300,309	81381,25	---
5	100	2	Düşük	563,22	Ky.Ks.	Ara Çz.	308,051	349825	---
6	4	2	Orta	1,73	Nr.Tm.	Optimal	0,063	73	Optimal
7	10	2	Orta	6,8	Nr.Tm.	Optimal	0,883	835	Optimal
8	25	2	Orta	35,64	Ad.Ks.	Ara Çz.	323,418	29500	---
9	50	2	Orta	143,51	Ad.Ks.	Tamsayı	1.154,1	100435	0,2041
10	100	2	Orta	563,45	Ky.Ks.	Ara Çz.	304,652	318465	---
11	4	2	Yüksek	1,75	Nr.Tm.	Optimal	0,301	73	Optimal
12	10	2	Yüksek	23,43	Nr.Tm.	Optimal	3,313	4235	Optimal
13	25	2	Yüksek	736,5	Nr.Tm.	Optimal	38,367	1226	---
14	50	2	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---
15	100	2	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---
16	4	4	Düşük	1,78	Nr.Tm.	Optimal	0,23	2949	Optimal
17	10	4	Düşük	6,95	Ad.Ks.	Tamsayı	207,262	12705	0,0322
18	25	4	Düşük	35,8	Ky.Ks.	Ara Çz.	302,117	63380	---
19	50	4	Düşük	143,33	Ky.Ks.	Ara Çz.	300,313	148810	---
20	100	4	Düşük	563,61	Ky.Ks.	Ara Çz.	301,438	531964	---
21	4	4	Orta	1,85	Nr.Tm.	Optimal	0,09	2101	Optimal
22	10	4	Orta	6,97	Ad.Ks.	Tamsayı	164,070	13135	0,0262
23	25	4	Orta	35,87	Ad.Ks.	Ara Çz.	267,406	63470	---
24	50	4	Orta	143,66	Ky.Ks.	Ara Çz.	300,216	147668	---
25	100	4	Orta	563,78	Ky.Ks.	Ara Çz.	301,559	531195	---
26	4	4	Yüksek	1,88	Nr.Tm.	Optimal	0,141	2101	Optimal
27	10	4	Yüksek	23,69	Nr.Tm.	Optimal	0,258	5215	Optimal
28	25	4	Yüksek	35,8	Ky.Ks.	Ara Çz.	304,305	421932	---
29	50	4	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---
30	100	4	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---
31	4	8	Düşük	2,02	Nr.Tm.	Optimal	0,18	10281	Optimal
32	10	8	Düşük	7,31	Ky.Ks.	Tamsayı	300,055	386979	0,0022
33	25	8	Düşük	36,47	Ky.Ks.	Tamsayı	300,141	287205	0,0070
34	50	8	Düşük	144,48	Ky.Ks.	Tamsayı	300,672	938.950	0,0030
35	100	8	Düşük	565,77	Ky.Ks.	Ara Çz.	301,281	3637885	---
36	4	8	Orta	2,09	Nr.Tm.	Optimal	0,141	7673	Optimal
37	10	8	Orta	7,33	Ad.Ks.	Tamsayı	277,137	51135	0,0001
38	25	8	Orta	36,54	Ky.Ks.	Ara Çz.	300,082	288436	---
39	50	8	Orta	144,9	Ky.Ks.	Ara Çz.	180,547	943.954	---
40	100	8	Orta	565,94	Ky.Ks.	Ara Çz.	307,707	3642492	---
41	4	8	Yüksek	2,11	Nr.Tm.	Optimal	0,117	7673	Optimal
42	10	8	Yüksek	7,32	Nr.Tm.	Optimal	0,262	19145	Optimal
43	25	8	Yüksek	36,47	Ky.Ks.	Tamsayı	300,121	287205	0,0070
44	50	8	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---
45	100	8	Yüksek	---	Yt.Hf.	---	---	---	---

Elde edilen sonuçlar detaylı incelendiğinde ele alınan KKPÇ problemindeki problem büyüklüğüne bağlı hesaplama karmaşıklığı problemi sayısal olarak gözlenebilmektedir. Faaliyet sayısı arttıkça çözüm uzayı büyüklüğü hızla artmaktadır. 4 faaliyetli örnek projelerde 1,66MB – 2,11 MB büyüklüğündeki çözüm uzayı 10 faaliyeti projelerde 6,79MB – 7,33MB’a; 25 faaliyetli projelerde 35,56MB – 36,47MB’a; 50 faaliyetli projelerde 143,10MB – 144,90MB’a çıkmakta; 100 faaliyetli düşük ve orta öncelik ilişkili projelerde 563,22MB - 565,94MB büyüklüğünde iken, yüksek öncelik ilişkili projelerde proje çözüm süresinin uzamasıyla birlikte bilgisayar hafıza büyüklüğünü aşmaktadır.

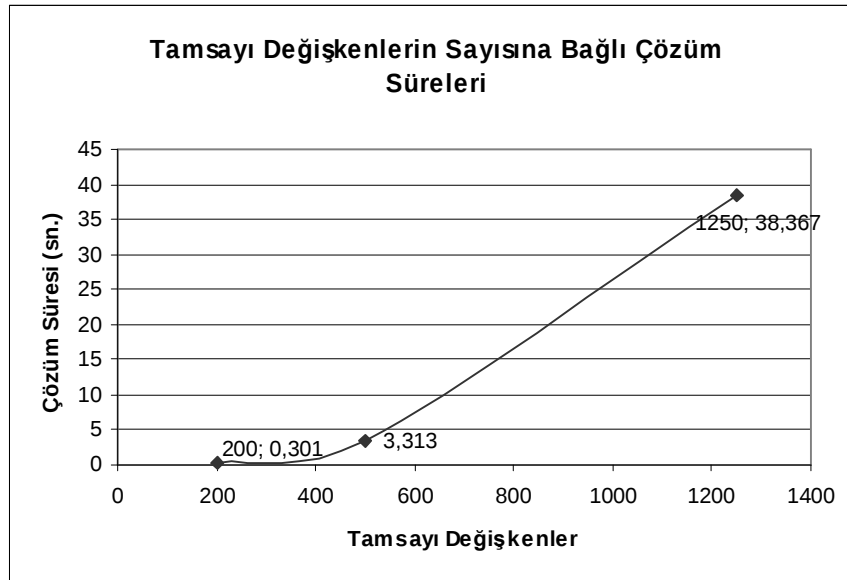
Oluşturulan örnek problemlerde düşük faaliyet sayısı olan problemlerin optimal olarak çözüldüğü görülmektedir. Ayrıca, öncelik ilişkileri yüksek olan faaliyet sayısı daha yüksek projelerde de optimal veya optimale yakın tamsayı çözümler elde edilebilmektedir. Ancak, faaliyet sayısı yüksek olan ve öncelik ilişkileri düşük olan projelerde optimal veya optimale yakın çözüm elde edilememektedir. Burada, oluşturulan çözüm uzayının büyüklük olmasının ve çözüm uzayının az sınırlandırılmış olmasının makul sürelerde optimal veya optimale yakın çözümler elde edilmesini engellediği anlaşılmaktadır. Bu problemin çözülmesi için ise çözüm uzayının aranmasında kısıtların artırılması ve sezgisel yöntemler kullanılarak iyi bir ilk çözüm elde edilmesi ve çözüm uzayının bu iyi çözümden başlanılarak aranmasıyla optimal ve optimale yakın sonuçlar elde edilmesi yaklaşımlarının literatürde de kullanıldığı ve mevcut durumda uygun olacağı öngörülmektedir.

KKPÇ probleminin çözümünde kullanılan karışık tamsayı modelin çözümünde modelde yer alan tamsayı değişkenlerin sayısının problemin hesaplama karmaşıklığını artırdığı bilinmektedir. Problemde yer alan tamsayı değişkenlerin sayısının faaliyet sayısı (n) ve planlama periyoduna (k) bağlı olarak $2nk$ sayısında olduğu Tablo 4.2’de görülmektedir. 25 haftalık bir planlama periyodu esas alınarak yapılan proje çizelgelemelerinde faaliyet sayısına göre tamsayı değişkenlerin sayısı ve karışık tamsayı modelin çözüm süreleri Tablo 4.5’te sunulmaktadır:

Tablo 4.5. Tamsayı Değişkenler ve Çözüm Süreleri

Çalışma No	Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı	Planlama Periyodu	Sürekli Değ.	Tamsayı Değ.	Toplam Değ.	Çözüm	Çözüm Süresi (sn.)
11	4	2	25	51	200	251	Optimal	0,301
12	10	2	25	51	500	551	Optimal	3,313
13	25	2	25	51	1250	1301	Optimal	38,367

Modelde yer alan tamsayı değişkenlerin sayısına bağlı olarak model çözüm sürelerindeki değişiklik Şekil 4.5’de gösterilmektedir:



Şekil 4.5. Tamsayı Değişkenlerin Sayısına Bağlı Model Çözüm Süreleri

Tablo 4.5 ve Şekil 4.7’de gösterildiği şekilde modelde yer alan tamsayı değişkenlerin sayısının artmasıyla model çözüm süreleri hızla artmaktadır. 25 haftalık planlama periyodunda çizelgelemesi yapılacak olan 4 faaliyetli projede 200 tamsayı değişken bulunmakta ve oluşturulan model 0,301 sn.’de optimal olarak çözülebilmektedir. Aynı planlama periyodunda 10 faaliyetli projede 500 tamsayı değişken mevcutken 3,313 sn.de, 25 faaliyetli projede 1250 tamsayı değişken mevcutken ise 38,367 sn.de model optimal olarak çözülmektedir. Proje faaliyet sayısı daha büyük olan problemlerde ise doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul

sürelerde optimal çözüm elde edilmesi mümkün olmadığından sezgisel yöntemler kullanılması planlanmıştır.

4.3. Model Çözümlerinin İncelenmesi

Bu bölümde matematiksel modelin elde edilen çözümleri incelenmektedir. Model çözümlerini etkileyen üç temel faktör belirlenmiştir. Bunlardan birincisi, proje faaliyet sayısına ve planlama periyodunun uzunluğuna göre belirlenen problem büyüklüğüdür. İkinci faktör, projenin yürütülmesi için kullanılacak kaynak sayısı olarak belirlenmiştir. Çözüm süresini etkileyen üçüncü önemli faktör ise proje ağında yer alan faaliyetlerin birbirleriyle teknik ilişkilerine göre oluşan öncelik ilişkileridir. Söz konusu faktörlerin, matematiksel model çözümlerine etkileri aşağıdaki şekilde incelenmiştir.

4.3.1. Problem Büyüklüğü

KKPÇ probleminin çözümlerinin incelenmesinde birinci grup faktör olarak değişik problem büyüklükleri ele alınmıştır. Problem büyüklüğü proje faaliyet sayısına ve planlama periyoduna göre değişmektedir. Ele alınan proje çizelgeleme probleminde temel planlama periyodu olarak 25 haftalık dönem belirlenmiştir. Proje faaliyet sayısı ise minimum 4 faaliyetten maksimum 100 faaliyete kadar değişken olarak incelenmiştir.

Literatürde ele alınan problemin hesaplama karmaşıklığı zorluğu bilinmektedir. Ayrıca, 4.2. bölümde söz konusu hesaplama karmaşıklığı zorluğu sayısal olarak gösterilmiştir. Faktör analizinde kullanılan örnek proje verilerine göre ortaya çıkan problem büyüğüne bağlı model çözümleri Tablo 4.6'da gösterilmektedir:

Tablo 4.6. Problem Büyüklüğüne Bağlı Model Çözümleri

Faaliyet Sayısı	Planlama Periyodu		
	25	50	100
4	Optimal	Optimal	Optimal
10	Optimal	Optimal	Optimal
25	Tamsayı	Ara çözüm	Ara çözüm
50	Tamsayı	Ara çözüm	Yetersiz bellek
100	Ara çözüm	Ara çözüm	Yetersiz bellek

Proje faaliyet sayısı ve planlama periyodu arttıkça problemin modellenmesi için ihtiyaç duyulan bellek miktarı hızla artmaktadır. Bu durum hesaplama karmaşıklığı probleminin sonucu olarak ortaya çıkmakta olup, büyük problemlerin optimal çözümlerine ulaşılabilmesi için sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

4.3.2. Kaynak Kısıtları

Problemin çözüm sürelerinin incelenmesinde kullanılan ikinci grup faktör olarak projenin gerçekleştirilmesi için kullanılması gereken kaynak kısıtlarının modelin çözümüne olan etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada KKPC probleminde çoklu kaynak durumu ele alınmış ve örnek projelerin gerçekleştirilmesinde en az iki, en fazla sekiz değişik kaynak kullanıldığı durumlar incelenmiştir. Kaynak sayısına bağlı olarak elde edilen model çözümleri Tablo 4.7’de sunulmaktadır:

Tablo 4.7. Kaynak Sayısına Bağlı Model Çözümleri

Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı		
	2	4	8
4	Optimal	Optimal	Optimal
10	Optimal	Tamsayı	Tamsayı
25	Ara çözüm	Ara çözüm	Ara çözüm
50	Tamsayı	Ara çözüm	Ara çözüm
100	Ara çözüm	Ara çözüm	Ara çözüm

Örnek projelerde kaynak sayısında meydana gelen artmanın problemin optimal çözümünü karmaşıktırdığı Tablo 4.7’de sunulan sonuçlarda gösterilmektedir. Genel olarak, faaliyet sayısında ve kaynak sayısında meydana gelen

artış çözüm uzayı büyüklüğünü artırmakta ve buna bağlı olarak optimal çözümün elde edilmesi zorlaşmaktadır.

4.3.3. Öncelik İlişkileri

Proje ağında yer alan faaliyetlerin teknik özelliklerine göre belirlenen öncelik ilişkilerinin incelenmesi üçüncü grup senaryo analizlerinde ele alınmıştır. Projelerde öncelik ilişkileri sınıflandırılması için projede yer alan toplam öncelik kısıtları sayısı toplam proje faaliyet sayısına bölünmüş, 0 – 0,75 arası değerli projeler düşük öncelik ilişkili, 0,75 – 1,25 arası değerli projeler orta öncelik ilişkili, 1,25’ten büyük değerli projeler yüksek öncelik ilişkili projeler olarak sınıflandırılmıştır. Öncelik ilişkilerine bağlı model çözümleri Tablo 4.8’de gösterilmektedir:

Tablo 4.8. Öncelik İlişkilerine Bağlı Model Çözümleri

Faaliyet Sayısı	Öncelik İlişkileri		
	Düşük	Orta	Yüksek
4	Optimal	Optimal	Optimal
10	Optimal	Optimal	Optimal
25	Ara çözüm	Ara çözüm	Optimal
50	Ara çözüm	Tamsayı	Yetersiz bellek
100	Ara çözüm	Ara çözüm	yetersiz bellek

Tablo 4.8 incelendiğinde proje faaliyetleri arasındaki öncelik ilişkilerinin problemin çözümünü ciddi şekilde etkilediği görülmektedir. Öncelikle, projedeki öncelik ilişkileri arttıkça optimal çözüm elde etmenin kolaylaştığı gözlemlenmiştir. Öncelik ilişkileri ile birlikte model kısıtlarının artmasına bağlı olarak aranacak çözüm uzayının hızla küçülmesi sonucunda yüksek öncelik ilişkilerine sahip çok daha büyük projelerin optimal çözümü makul sürelerde mümkün olmaktadır. Öte yandan, proje teknik kısıtları arttıkça proje toplam süresi ve buna bağlı olarak planlama periyodu uzamakta ve bunun sonucunda çözüm uzayının büyüklüğü bilgisayar bellek kapasitesini aşabilmektedir.

4.4. Çözüm Yöntemlerinin İncelenmesi

Ele alınan bulanık KKPÇ probleminin matematiksel formülasyonun yapılmasından ve değişik senaryolarda incelenmesiyle birlikte, modelin çözümünde kullanılacak uygun yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalarda değinilen hesaplama karmaşıklığı problemi 4.2. bölümde matematiksel ve sayısal olarak gösterilmiştir. Buna göre modelin çözümünde değişik senaryolarda farklı çözüm yöntemlerinin kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

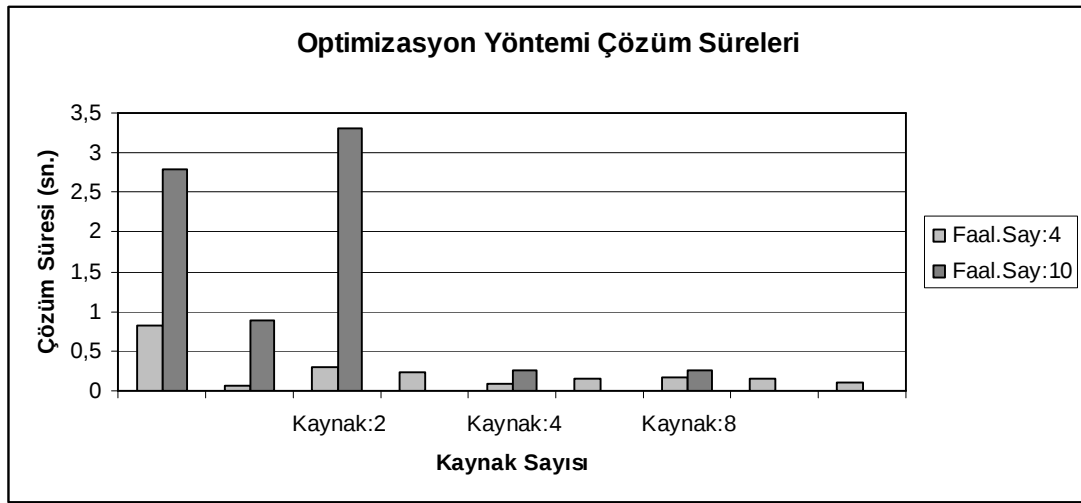
4.4.1. Optimizasyon Yöntemiyle Çözümleme

Proje ağında yer alan faaliyet sayısının ve planlama periyodunun düşük olduğu problemlerde kullanılan karışık tamsayı matematiksel modelin çözümünde doğrudan optimizasyon yönteminin kullanılmasının yeterli olduğu görülmüştür. Söz konusu problemlerin çözümünde GAMS modelleme yazılımında mevcut bulunan OSL2 çözücüsü kullanılmıştır. OSL2 çözücüsü içerisinde yer alan geliştirilmiş simpleks algoritması kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Doğrudan optimizasyon yöntemi ile çözülen örnek projeler Tablo 4.9’da yer almaktadır:

Tablo 4.9. Optimizasyon yöntemiyle elde edilen çözümler

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Çz. Uz. (MB)	Çözücü Durumu	Çözüm	Çz. Sr. (sn.)	Amaç Fonk.Değ.
1	4	2	Düşük	1,66	nr.tm.	Optimal	0,820	35
2	10	2	Düşük	6,79	nr.tm.	Optimal	2,789	225
6	4	2	Orta	1,73	nr.tm.	Optimal	0,063	73
7	10	2	Orta	6,8	nr.tm.	Optimal	0,883	835
11	4	2	Yüksek	1,75	nr.tm.	Optimal	0,301	73
12	10	2	Yüksek	23,43	nr.tm.	Optimal	3,313	4235
13	25	2	Yüksek	736,5	nr.tm.	Optimal	38,367	1226
16	4	4	Düşük	1,78	nr.tm.	Optimal	0,230	2949
21	4	4	Orta	1,85	nr.tm.	Optimal	0,090	2101
26	4	4	Yüksek	1,88	nr.tm.	Optimal	0,141	2101
27	10	4	Yüksek	23,69	nr.tm.	Optimal	0,258	5215
31	4	8	Düşük	2,02	nr.tm.	Optimal	0,180	10281
36	4	8	Orta	2,09	nr.tm.	Optimal	0,141	7673
41	4	8	Yüksek	2,11	nr.tm.	Optimal	0,117	7673
42	10	8	Yüksek	7,32	nr.tm.	Optimal	0,262	19145

Tablo 4.9’da faaliyet sayısı az olan problemlerin doğrudan optimizasyon yöntemiyle kısa sürelerde çözülebildiği görülmektedir. Faaliyet sayısı 4 – 10, kaynak sayısı 2-8 ve düşük-orta-yüksek öncelik ilişkileri olan projeler için Pentium 2Ghz işlemcili bilgisayarda 1-3 sn. içerisinde optimal çözümler elde edilebilmiştir. Optimizasyon yöntemiyle elde edilen model çözüm sürelerini gösteren grafik Şekil 4.6’da yer almaktadır:



Şekil 4.6. Optimizasyon Yöntemiyle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri

Şekil 4.6 incelendiğinde optimizasyon yöntemiyle elde edilen model çözüm sürelerini etkileyen en önemli faktörün modelde yer alan faaliyet sayıları olduğu görülmektedir. Kaynak sayıları 2, 4 ve 8 seviyelerinde iken, faaliyet sayısı 4 ve 10 seviyesinde değiştiğinde model çözüm sürelerinin 1,45 ile 14 katında uzadığı görülmektedir.

Bu problemlerde bilgisayarda oluşturulan çözüm uzayı büyüklüğü 1-23 MB arasında değişmektedir. Öte yandan proje faaliyet sayısı 25’e yükseldiğinde, oluşturulan çözüm uzayı büyüklüğü 736 MB’a yükselmiş ve 38 sn.’de optimal çözüm elde edilebilmiştir. Bu büyüklükteki bir problemde öncelik ilişkilerinin yüksek olması çözüm uzayının araştırılmasını kolaylaştırmış ve bu sebeple makul sürede çözüm elde edilmesi mümkün olmuştur. Daha büyük problemler için ise

doğrudan optimizasyon yöntemi yetersiz kaldığından sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

4.4.2. Başlangıç Çözümünün Sezgisel Algoritma ile Belirlenmesi

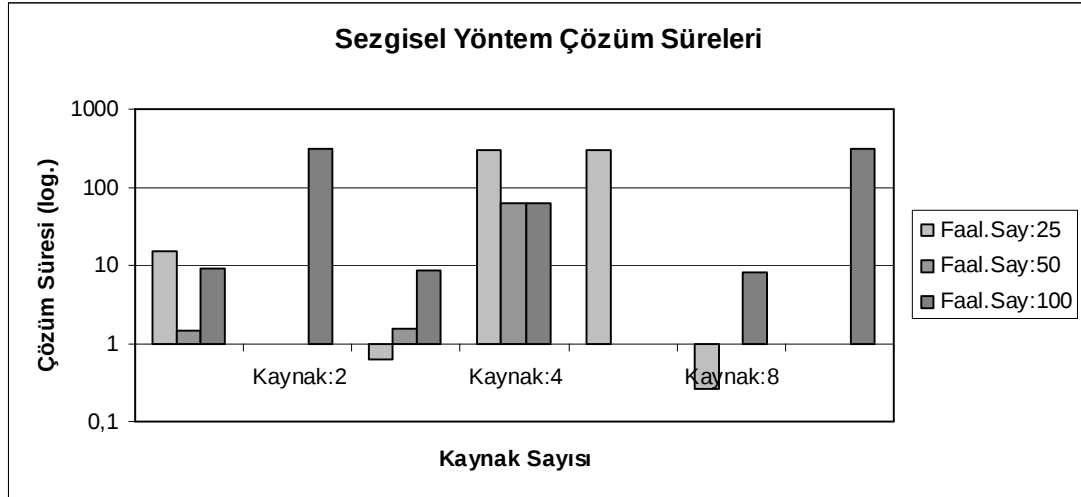
Söz konusu algoritma optimizasyon yöntemiyle doğrudan çözilemeyen problemlerde kullanılmış ve problemler için başlangıç çözümler belirlenmiştir. Elde edilen başlangıç çözümleri GAMS modellerine başlangıç çözümü olarak tanımlanmıştır. Başlangıç çözümü tanımlanan problemler için elde edilen çözümler Tablo 4.10'da sunulmaktadır:

Tablo 4.10. Sezgisel Algoritma Kullanılarak Elde Edilen Problem Çözümleri

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Çz.Uz. (MB)	Çözücü Durumu	Çözüm	Çz.Sr. (sn.)	Amaç Fonk.Değ.
3	25	2	Düşük	35,56	nr.tm.	Optimal	0,320	25.205
4	50	2	Düşük	143,1	nr.tm.	Optimal	1,470	77.495
5	100	2	Düşük	563,22	nr.tm.	Optimal	8,891	288.845
8	25	2	Orta	35,64	ky.ks.	Tamsayı	15,160	32.045
10	100	2	Orta	563,45	ky.ks.	Ara Çz.	304,930	293.774
18	25	4	Düşük	35,8	nr.tm.	Optimal	0,620	59.405
19	50	4	Düşük	143,33	ky.ks.	Ara Çz.	60,320	148.810
20	100	4	Düşük	563,61	nr.tm.	Optimal	8,391	526.445
23	25	4	Orta	35,87	ky.ks.	Tamsayı	300,152	65.050
24	50	4	Orta	143,66	nr.tm.	Optimal	1,547	158.565
25	100	4	Orta	563,78	ky.ks.	Ara Çz.	61,540	529.178
28	25	4	Yüksek	35,8	ky.ks.	Tamsayı	300,109	59.405
35	100	8	Düşük	565,77	nr.tm.	Optimal	8,039	3.637.145
38	25	8	Orta	36,54	nr.tm.	Optimal	0,260	284.610
39	50	8	Orta	144,9	nr.tm.	Optimal	1,469	949.765
40	100	8	Orta	565,94	ky.ks.	Ara Çz.	307,707	3.643.463

Tablo 4.10'da doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde çözüm elde edilemeyen problemlerin sezgisel yöntem kullanılarak çözülmesi sonucunda toplam 16 problemin 9 tanesinin optimal olarak çözülebildiği, 3 tanesi için tamsayı çözüm elde edildiği görülmektedir. 4 tane problem için ise makul sürelerde optimal veya optimale yakın tamsayı çözüm elde edilememiştir. Bu problemlerin çözümü için ise çözüm uzayında yapılacak aramanın kolaylaştırılması için sınırların

tanımlanması yaklaşımı kullanılmıştır. Sezgisel yöntem kullanılarak elde edilen model çözüm sürelerini gösteren grafik Şekil 4.7’de yer almaktadır:



Şekil 4.7. Sezgisel Yöntemle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri

Sezgisel yöntem ile elde edilen model çözüm süreleri incelendiğinde model faaliyet sayılarındaki artışın model çözüm sürelerinde artışa sebep olduğu görülmektedir. Şekil 4.9’da çözüm süreleri logaritmik ölçekte gösterilmiş olup, kaynak sayıları 2, 4 ve 8 seviyelerinde, faaliyet sayıları 25, 50 ve 100 seviyesinde değiştiğinde model çözüm sürelerinde 500 kata kadar artış olduğu görülmektedir.

4.4.3. Çözüm Uzayının Sınırlandırılması Yöntemi

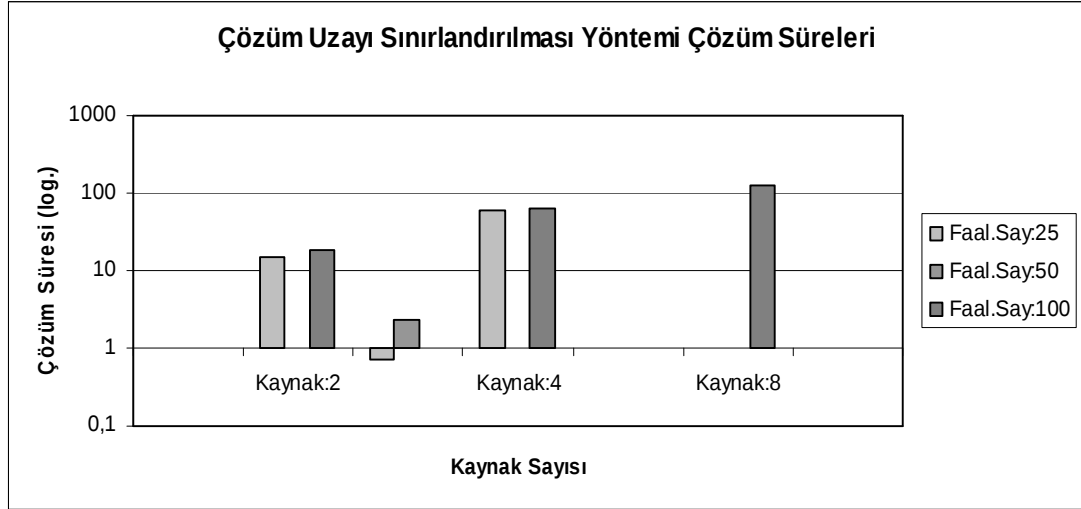
Doğrudan optimizasyon ve başlangıç çözümünün belirlenmesi yöntemleriyle çözülemeyen problemin çözümünde çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi kullanılmıştır. Arama yapılacak çözüm uzayının boyutunun sınırlandırılmasıyla makul sürelerde optimal veya optimale yakın çözümler elde edilmesine çalışılmıştır. Ele alınan optimizasyon probleminin minimizasyon olması sebebiyle çözüm uzayının üst sınırlarının daraltılmasına çalışılmıştır. Bunun için proje faaliyetlerinin en erken başlama zamanları ve en geç bitiş zamanları tespit edilerek ilgili faaliyetlerin planlama periyodunda bu zaman aralıklarında gerçekleştirilmesi esas

alınmıştır. Bu yöntem kullanılarak elde edilen çözümler Tablo 4.11’de sunulmaktadır:

Tablo 4.11. Çözüm uzayının sınırlandırılmasıyla elde edilen çözümler

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Çözüm Uzaı (MB)	Çözücü Durumu	Çözüm	Çözüm Süresi (sn.)	Amaç Fonk. Değeri
8	25	2	Orta	35,64	normal tamam	Optimal	15,160	30285
10	100	2	Orta	563,45	normal tamam	Optimal	18,872	295.365
19	50	4	Düşük	143,33	normal tamam	Optimal	2,301	145395
23	25	4	Orta	35,87	normal tamam	Optimal	0,727	64235
25	100	4	Orta	563,78	kaynak kes.	Tamsayı	63,051	543.655
28	25	4	Yüksek	35,8	normal tamam	Tamsayı	60,121	59355
40	100	8	Orta	565,94	kaynak kes.	Tamsayı	123,152	3655655

Tablo 4.11’de görüldüğü şekilde doğrudan optimizasyon ve başlangıç çözümünün belirlenmesi yöntemleriyle çözülemeyen büyük problemler için optimal veya optimale yakın tamsayı çözümler çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemiyle elde edilmiştir. Faaliyet sayısı yüksek (25 – 100 faaliyet) ve çözüm uzayları büyük olan problemlerin dört tanesi için optimal, üç tanesi ise optimale yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece kullanılan karışık tamsayı optimizasyon modeliyle 25 haftalık planlama periyodunda 100 faaliyete kadar büyüklükteki çizelgeleme problemlerinin tamamı için optimal veya optimale yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi kullanılarak elde edilen model çözüm sürelerini gösteren grafik Şekil 4.8’de yer almaktadır:



Şekil 4.8. Çözüm Uzaının Sınırlandırılması Yöntemiyle Elde Edilen Model Çözüm Süreleri

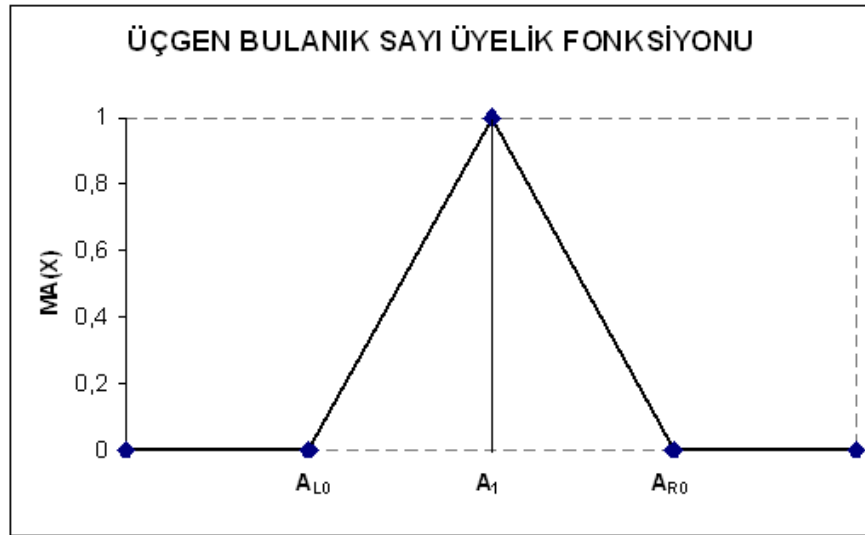
Şekil 4.8 incelendiğinde çözüm uzaının sınırlandırılması yöntemi ile elde edilen model çözüm sürelerinde proje faaliyet sayısı ve kaynak sayısına bağılı olarak model çözüm sürelerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.10'da çözüm sürelerinde faaliyet sayıları 25, 50 ve 100 seviyeleri için proje kaynak sayısı 2'den 4'e yükseldiğinde 5 kat, proje kaynak sayısı 4'den 8'e yükseldiğinde ise 1,5 kat artış olduğu görülmektedir.

4.5. Senaryo Analizleri

Ele alınan bulanık faaliyet süreli KKPC probleminin çözümünde kullanılan matematiksel modelin değışik senaryolarda incelenmesi için yapılan çalışmalar bu bölümde yer almaktadır. Modelin incelenmesinde iki değışik grup senaryo kullanılmıştır. Birinci grup senaryoda proje faaliyet sürelerindeki belirsizliğin modellenmesinde farklı bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. İkinci grup senaryoda ise projenin yürütülmesinde kullanılan yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı proje kaynakları incelenmiştir.

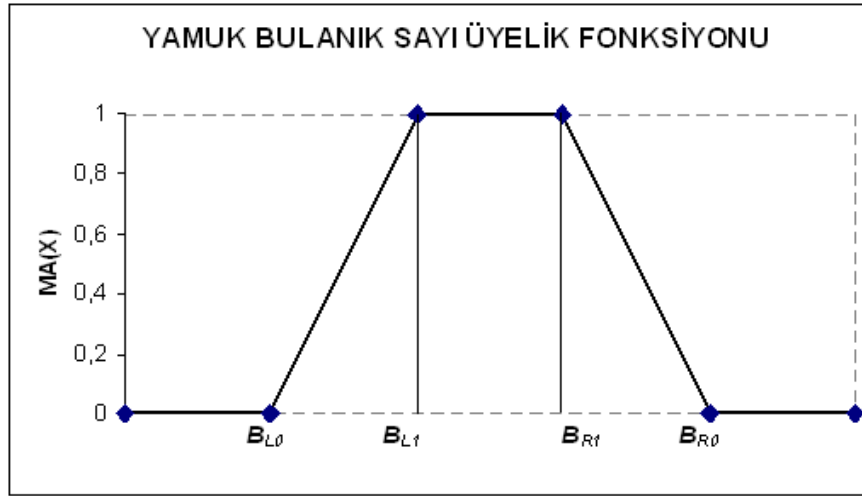
4.5.1. Farklı Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonlarının Kullanımı

Bulanık faaliyet süreli KKPC probleminde proje faaliyet sürelerindeki belirsizliğin modellenmesi için uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonunun kullanılması, mevcut olan uzman bilgisinin modele matematiksel olarak doğru şekilde aktarılması için önem taşımaktadır. Bu amaçla kullanılan bulanık sayı üyelik fonksiyonları incelendiğinde iki farklı üyelik fonksiyonu kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan birincisi, bu çalışmada da kullanılan üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonudur ve en sıklıkla kullanılan üyelik fonksiyonudur. Üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonu Şekil 4.9'da gösterilmiştir:



Şekil 4.9. Üçgen Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu

Kullanılan ikinci tür üyelik fonksiyonu yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarıdır. Yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonları da sıklıkla kullanılan bir bulanık sayı fonksiyon türü olarak belirlenmiştir. Yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonu Şekil 4.10'da gösterilmiştir:



Şekil 4.10. Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu

Proje faaliyet sürelerinin uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonunun belirlenmesinde BIFPET metodolojisi kullanılmaktadır. Bu metodolojinin uygulanmasında öncelikle faaliyetlerin yürütülmesinden sorumlu formenlerin faaliyetin süresi hakkındaki uzman bilgileri değerlendirilmektedir. Sözel olarak ifade edilen uzman bilgisinin matematiksel olarak modellenmesinde kullanılacak olan bulanık sayı üyelik fonksiyonu belirlenmesinde yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.

Matematiksel modelde yer alan proje faaliyet sürelerinin modellenmesinde üçgen bulanık sayılar kullanılarak elde edilen model sonuçları (amaç fonksiyonu beklenen değeri) Tablo 4.12’de yer almaktadır. Matematiksel modelde yer alan proje faaliyet sürelerinin modellenmesinde yamuk bulanık sayılar kullanılarak elde edilen çözümler ise Tablo 4.13’de yer almaktadır. Proje faaliyet süreleri üçgen bulanık sayılar ve yamuk bulanık sayılar üyelik fonksiyonları kullanılarak matematiksel modele dahil edilmiş ve model çözümleri elde edilmiştir. İki farklı grup senaryoda elde edilen model sonuçlarının beklenen değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.14’de sunulmuştur.

Tablo 4.12. Üçgen Bulanık Sayı Kullanıldığında Elde Edilen Model Sonuçları

Çİ. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değeri
1	4	2	Düşük	35
2	10	2	Düşük	225
3	25	2	Düşük	29.430
4	50	2	Düşük	81.381
5	100	2	Düşük	349.825
6	4	2	Orta	73
7	10	2	Orta	835
8	25	2	Orta	29.500
9	50	2	Orta	100.435
10	100	2	Orta	318.465
11	4	2	Yüksek	73
12	10	2	Yüksek	4.235
13	25	2	Yüksek	1.226
14	50	2	Yüksek	2.979
15	100	2	Yüksek	10.338
16	4	4	Düşük	2.949
17	10	4	Düşük	12.705
18	25	4	Düşük	63.380
19	50	4	Düşük	148.810
20	100	4	Düşük	531.964
21	4	4	Orta	2.101
22	10	4	Orta	13.135
23	25	4	Orta	63.470
24	50	4	Orta	147.668
25	100	4	Orta	531.195
26	4	4	Yüksek	2.101
27	10	4	Yüksek	5.215
28	25	4	Yüksek	421.932
29	50	4	Yüksek	974.663
30	100	4	Yüksek	3.518.533
31	4	8	Düşük	10.281
32	10	8	Düşük	386.979
33	25	8	Düşük	287.205
34	50	8	Düşük	938.950
35	100	8	Düşük	3.637.885
36	4	8	Orta	7.673
37	10	8	Orta	51.135
38	25	8	Orta	288.436
39	50	8	Orta	943.954
40	100	8	Orta	3.642.492
41	4	8	Yüksek	7.673
42	10	8	Yüksek	19.145
43	25	8	Yüksek	287.205
44	50	8	Yüksek	620.363
45	100	8	Yüksek	2.239.510

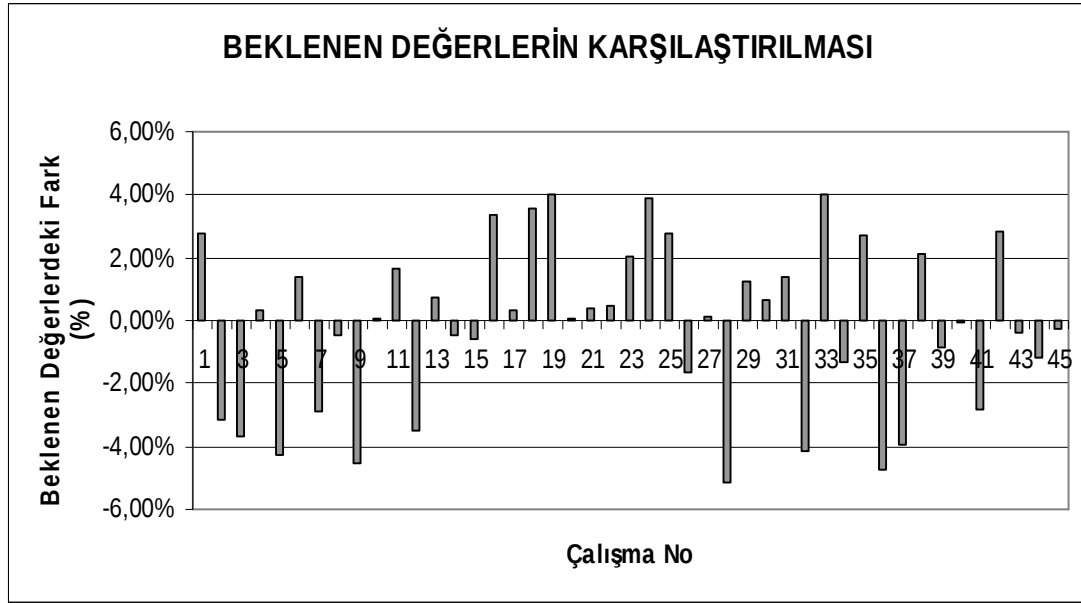
Tablo 4.13. Yamuk Bulanık Sayı Kullanıldığında Elde Edilen Model Sonuçları

Çi. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değeri
1	4	2	Düşük	36
2	10	2	Düşük	218
3	25	2	Düşük	28.346
4	50	2	Düşük	81.674
5	100	2	Düşük	334.927
6	4	2	Orta	74
7	10	2	Orta	811
8	25	2	Orta	29.373
9	50	2	Orta	95.868
10	100	2	Orta	318.627
11	4	2	Yüksek	74
12	10	2	Yüksek	4.086
13	25	2	Yüksek	1.235
14	50	2	Yüksek	2.965
15	100	2	Yüksek	10.278
16	4	4	Düşük	3.048
17	10	4	Düşük	12.749
18	25	4	Düşük	65.621
19	50	4	Düşük	154.785
20	100	4	Düşük	532.320
21	4	4	Orta	2.110
22	10	4	Orta	13.199
23	25	4	Orta	64.766
24	50	4	Orta	153.442
25	100	4	Orta	545.989
26	4	4	Yüksek	2.067
27	10	4	Yüksek	5.221
28	25	4	Yüksek	400.286
29	50	4	Yüksek	986.609
30	100	4	Yüksek	3.542.057
31	4	8	Düşük	10.423
32	10	8	Düşük	370.826
33	25	8	Düşük	298.765
34	50	8	Düşük	926.522
35	100	8	Düşük	3.735.730
36	4	8	Orta	7.307
37	10	8	Orta	49.108
38	25	8	Orta	294.568
39	50	8	Orta	936.044
40	100	8	Orta	3.640.571
41	4	8	Yüksek	7.456
42	10	8	Yüksek	19.683
43	25	8	Yüksek	286.115
44	50	8	Yüksek	612.900
45	100	8	Yüksek	2.233.806

Tablo 4.14. Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerin Karşılaştırılması

Çl. No	Bek. Değer (Üç.Bl.Sy.)	Bek. Değer (Ym.Bl.Sy.)	Bek. Değer Farkı (%)
1	35	36	2,74%
2	225	218	-3,16%
3	29.430	28.346	-3,68%
4	81.381	81.674	0,36%
5	349.825	334.927	-4,26%
6	73	74	1,39%
7	835	811	-2,92%
8	29.500	29.373	-0,43%
9	100.435	95.868	-4,55%
10	318.465	318.627	0,05%
11	73	74	1,63%
12	4.235	4.086	-3,52%
13	1.226	1.235	0,74%
14	2.979	2.965	-0,47%
15	10.338	10.278	-0,58%
16	2.949	3.048	3,35%
17	12.705	12.749	0,35%
18	63.380	65.621	3,54%
19	148.810	154.785	4,02%
20	531.964	532.320	0,07%
21	2.101	2.110	0,41%
22	13.135	13.199	0,49%
23	63.470	64.766	2,04%
24	147.668	153.442	3,91%
25	531.195	545.989	2,78%
26	2.101	2.067	-1,63%
27	5.215	5.221	0,11%
28	421.932	400.286	-5,13%
29	974.663	986.609	1,23%
30	3.518.533	3.542.057	0,67%
31	10.281	10.423	1,38%
32	386.979	370.826	-4,17%
33	287.205	298.765	4,03%
34	938.950	926.522	-1,32%
35	3.637.885	3.735.730	2,69%
36	7.673	7.307	-4,77%
37	51.135	49.108	-3,96%
38	288.436	294.568	2,13%
39	943.954	936.044	-0,84%
40	3.642.492	3.640.571	-0,05%
41	7.673	7.456	-2,83%
42	19.145	19.683	2,81%
43	287.205	286.115	-0,38%
44	620.363	612.900	-1,20%
45	2.239.510	2.233.806	-0,25%

Tablo 4.14’de proje toplam maliyetinin beklenen değerleri karşılaştırılmaktadır. Proje faaliyetlerindeki belirsizliğin modellenmesinde üçgen bulanık sayılar ve yamuk bulanık sayılar kullanıldığında elde edilen sonuçlarda %0,05 ile %5,13 arasında farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Üçgen ve yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının beklenen değerleri Şekil 4.11’de karşılaştırılmaktadır:

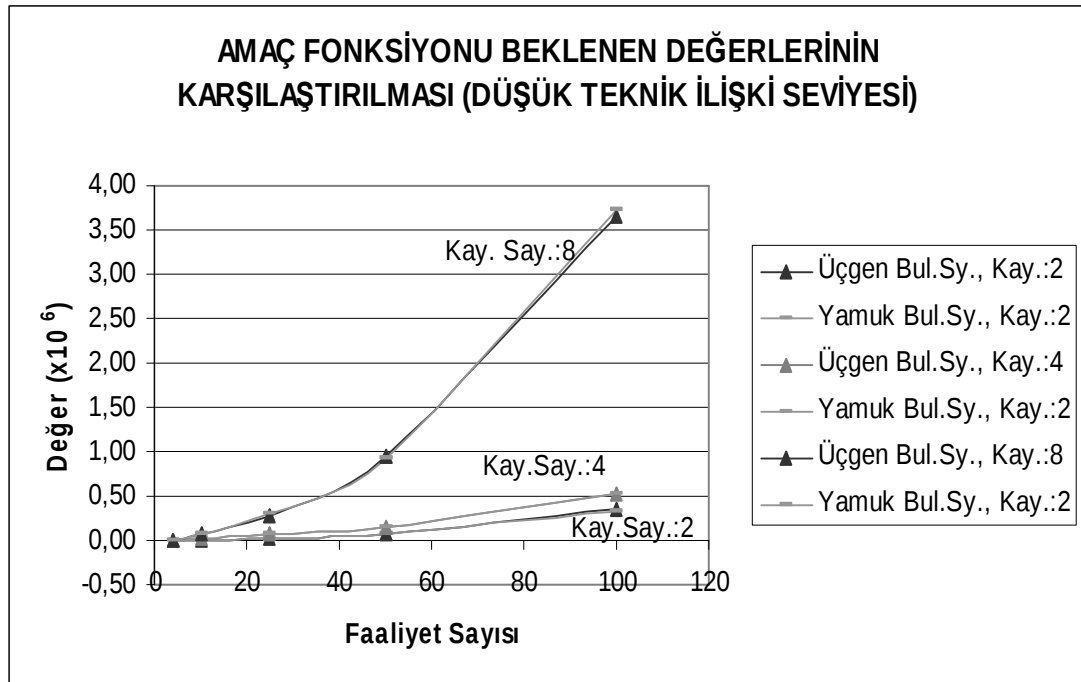


Şekil 4.11. Üçgen ve Yamuk Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonları Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması

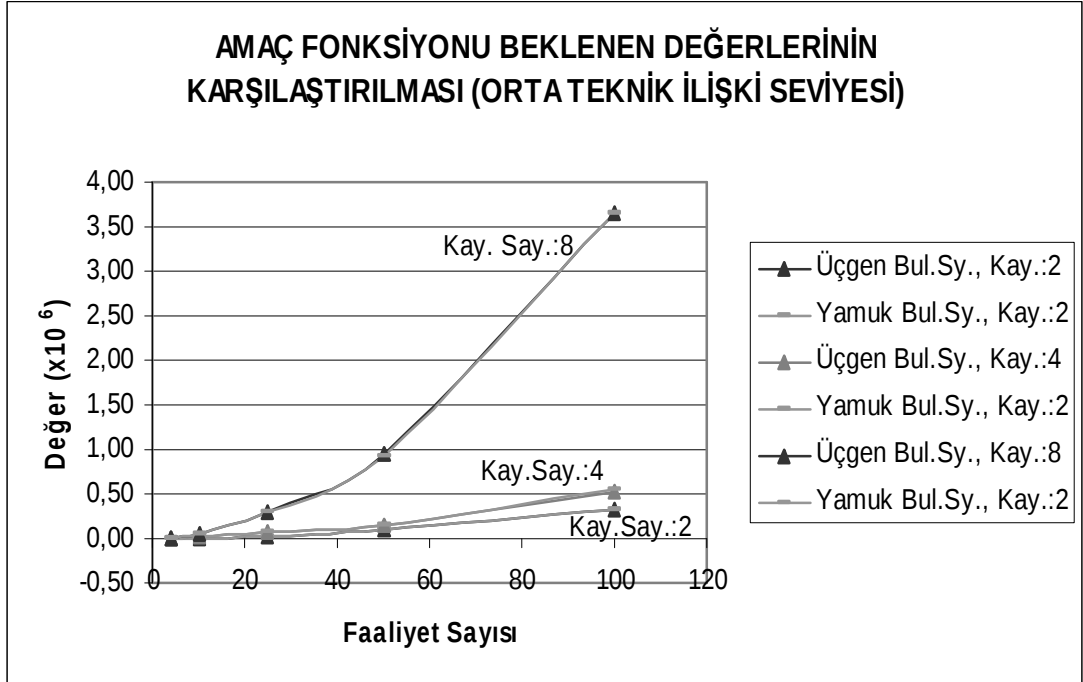
Şekil 4.11’de görüldüğü şekilde yapılan 45 çalışmada proje faaliyet sürelerinin üçgen ve yamuk bulanık sayı olarak modele dahil edildiği senaryolarda toplam proje maliyetinin beklenen değerleri arasındaki fark en fazla %5,13 olmuştur. Çalışmaların %51’indeki farkın %2’den küçük olduğu, %33’ündeki farkın %2 ile %4 arasında olduğu ve %16’sındaki farkın %4’ten büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının beklenen değeri yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının beklenen değerinden çalışmaların %47’sinde küçük, %53’ünde ise büyük çıkmıştır. Ayrıca, beklenen değerlerin farklılığı hakkında yapılan istatistiksel test sonucunda $P(T < t)$ değeri 0,9924 bulunmuştur ve beklenen değerler arasındaki farklılığının önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara

dayanarak proje maliyetinin beklenen değerinin belirlenmesinde üçgen veya yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının kullanılmasının model sonuçlarını önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmaktadır.

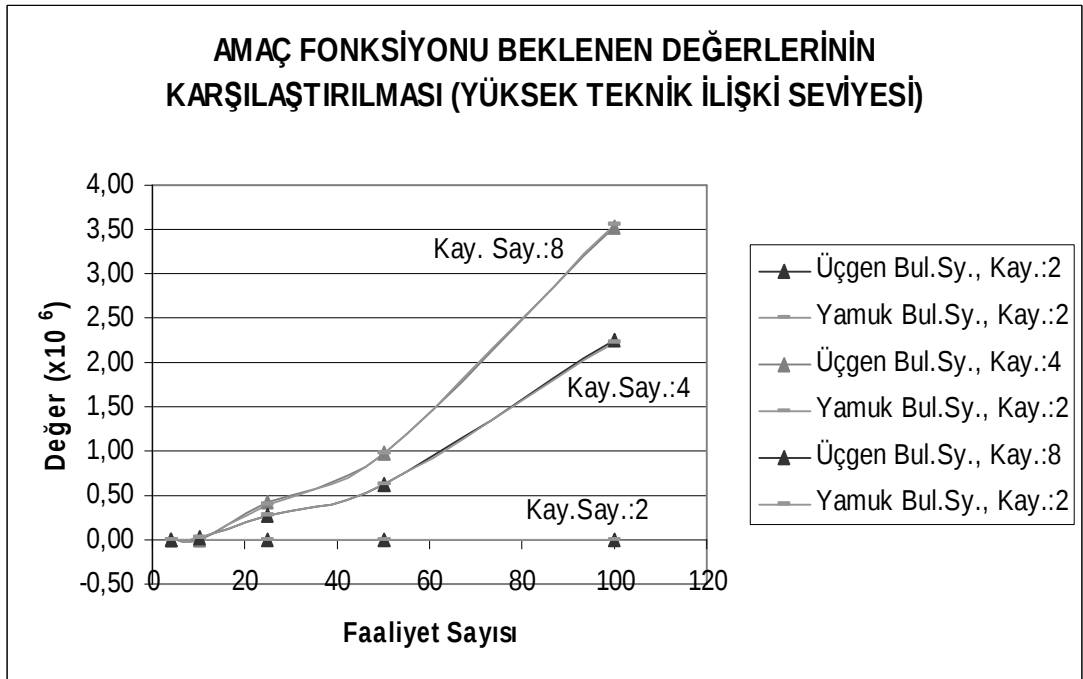
Elde edilen model sonuçlarının beklenen değerlerinin tamamının karşılaştırılmasından sonra faktör analizi yapılarak, model parametrelerindeki değişikliklere bağlı olarak model sonuçlarındaki farklılıklar incelenmiştir. Faktör analizinde kullanılan üç parametre proje faaliyet sayısı, proje kaynak sayısı ve proje teknik ilişki seviyesidir. Proje faaliyet sayısı için 4, 10, 25, 50 ve 100 olmak üzere 5 seviye, proje kaynak sayısı için 2, 4 ve 8 olmak üzere 3 seviye ve proje teknik ilişki seviyesi için düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 seviye kullanılmıştır. Düşük, orta ve yüksek teknik ilişki seviyelerinde amaç fonksiyonlarının beklenen değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de yer almaktadır:



Şekil 4.12. Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Düşük Teknik İlişki Seviyesi)



Şekil 4.13. Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Orta Teknik İlişki Seviyesi)



Şekil 4.14. Amaç Fonksiyonu Beklenen Değerlerinin Karşılaştırılması (Yüksek Teknik İlişki Seviyesi)

Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14’de yer alan grafipler incelendiğinde, üç seviyedeki teknik ilişkili projelerde, kaynak sayısı ve faaliyet sayısındaki değişikliklerin üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonları ve üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılan modellerde, amaç fonksiyonunun beklenen değerlerinin yakın ilişkili olduğu görülmektedir. Söz konusu grafikler, Şekil 4.11’de gösterilen çalışmaların tamamında elde edilen sonuçları desteklemektedir. Buna göre, üçgen veya yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının kullanımının model parametrelerinin farklı seviyelerinde model sonuçları üzerinde önemli etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

4.5.2. Farklı Türde Proje Kaynaklarının Kullanımı

Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi probleminde projenin modellenmesinde kullanılan üç kaynak türü mevcuttur. Bunlar, yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklardır. Kullanılan matematiksel modelin farklı kaynak türleri kullanılarak değişik senaryolarda araştırılması konusu bu kısımda incelenmektedir. Öncelikle, KKPÇ’de kullanılan farklı kaynak türleri ve kaynak türlerinin özellikleri Tablo 4.15’te yer almaktadır:

Tablo 4.15. Proje Çizelgelemesi Probleminde Kaynak Türleri

Kaynak Türü	Kullanım Miktarı	
	<u>Her Dönemde Kısıtlı</u>	<u>Proje Toplamında Kısıtlı</u>
Yenilenebilir	Kısıtlı	Kısıtlı Değil
Yenilenemeyen	Kısıtlı Değil	Kısıtlı
Çift Kısıtlı	Kısıtlı	Kısıtlı

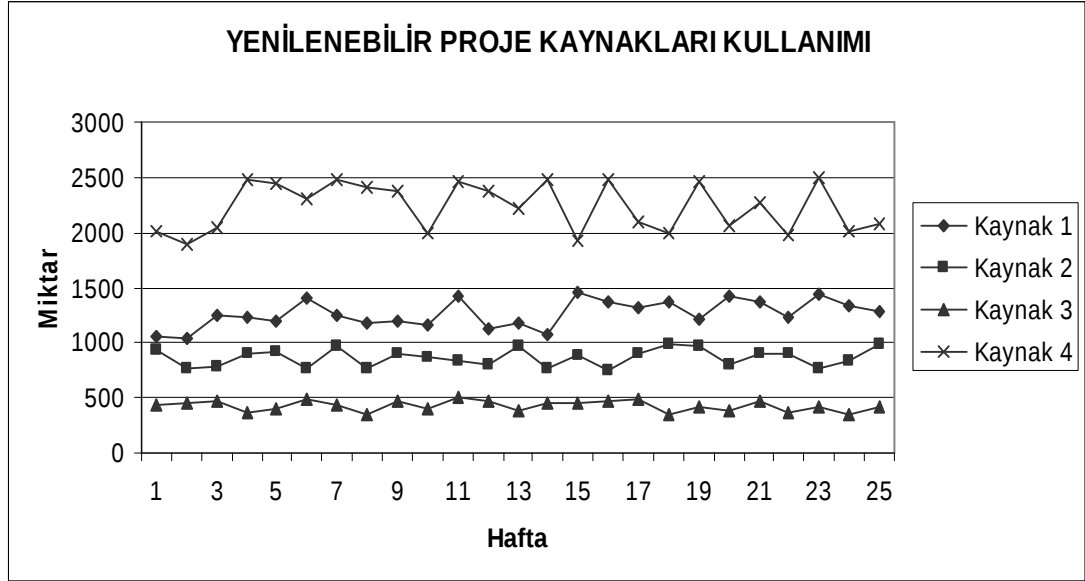
Tablo 4.15’te yer alan yenilenebilir türdeki kaynakların kullanımı her dönemde kısıtlıdır. Ancak, proje süresi boyunca toplam kullanımında kısıtlama bulunmamaktadır. İkinci tür kaynak olan yenilenemeyen türdeki kaynakların proje süresi boyunca toplam kullanımı kısıtlıdır, ancak her dönemdeki kullanımında kısıtlama mevcut değildir. Üçüncü türdeki çift kısıtlı kaynakların ise hem her dönemdeki kullanımı hem de proje süresi boyunca toplam kullanımı kısıtlıdır.

Yapılan senaryo analizinde, birinci grup senaryoda matematiksel modelde yer alan kaynakların tamamının yenilenebilir kaynaklar olduğu durum ele alınmıştır. Bu senaryoda kullanılan kaynakların projenin her döneminde sınırlı miktarda kullanılabileceği ve bir sonraki dönemde proje kaynaklarının aynı miktarda kullanılabileceği durum değerlendirilmektedir. Birinci grup senaryoda elde edilen model sonuçları Tablo 4.16’da yer almaktadır:

Tablo 4.16. Yenilenebilir Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi Problemi Sonuçları

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değeri
1	4	4	Düşük	3.150
2	10	4	Düşük	12.553
3	25	4	Düşük	69.523
4	50	4	Düşük	139.307
5	100	4	Düşük	505.993
6	4	4	Orta	2.154
7	10	4	Orta	14.013
8	25	4	Orta	57.266
9	50	4	Orta	153.895
10	100	4	Orta	510.902
11	4	4	Yüksek	2.239
12	10	4	Yüksek	4.921
13	25	4	Yüksek	401.296
14	50	4	Yüksek	938.628
15	100	4	Yüksek	3.804.389

Tablo 4.16’da yer alan problemlerde dört adet yenilenebilir proje kaynağı bulunan senaryoda faaliyet sayıları dört ile yüz arasında ve öncelik ilişkileri düşük, orta ve yüksek seviyede değiştirilerek model sonuçları elde edilmiştir. Yenilenebilir proje kaynaklarının proje süresince kullanımını gösteren grafik Şekil 4.15’de yer almaktadır:



Şekil 4.15. Yenilenebilir Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği

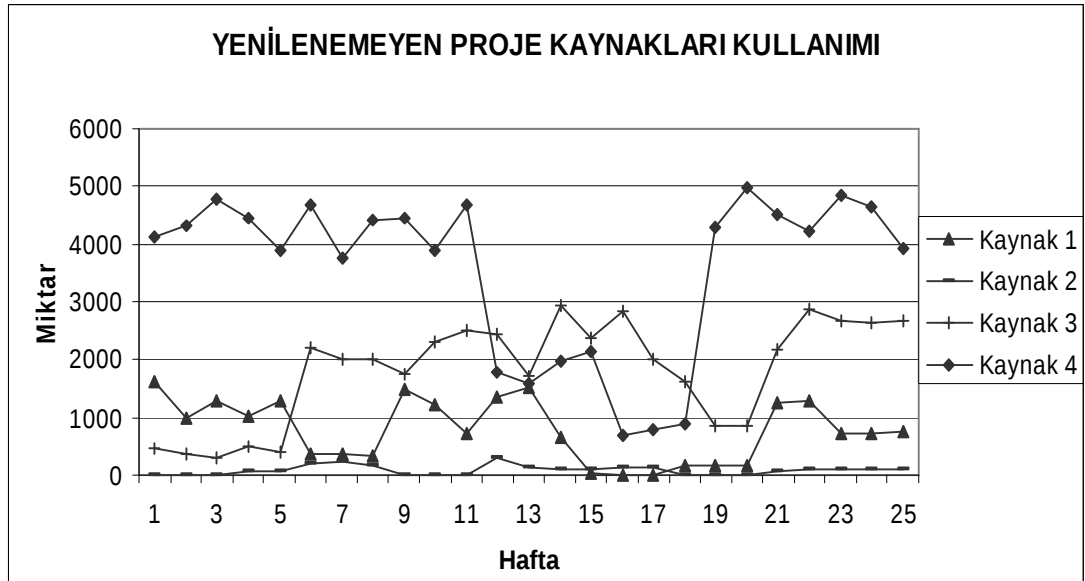
Şekil 4.15’de yer alan yenilenebilir proje kaynakları grafiği incelendiğinde proje kaynak kullanım miktarlarının dönemsel olarak her proje kaynağı için belirlenmiş bulunan kaynak kapasiteleri kısıtların altında kaldığı görülmektedir. Söz konusu senaryoda, kaynak kullanım oranları yenilenebilir kaynaklar için sırasıyla %82,16, %88,12, %85,61 ve %76,44 olarak belirlenmiştir. Yenilenebilir kaynaklar için ortalama kaynak kullanım miktarı %83,08 olarak hesaplanmıştır.

İkinci grup senaryoda matematiksel modelde yer alan kaynakların tamamının yenilenemeyen kaynaklar olduğu durum ele alınmıştır. Bu senaryoda kullanılan kaynakların proje dönemlerinde sınırlı olmadığı, ancak kaynakların proje süresince toplam kullanımının sınırlı olduğu durum değerlendirilmektedir. İkinci grup senaryoda elde edilen model sonuçları Tablo 4.17’de yer almaktadır:

Tablo 4.17. Yenilenemeyen Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi Problemi Sonuçları

Çİ. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değeri
1	4	4	Düşük	38
2	10	4	Düşük	289
3	25	4	Düşük	33.858
4	50	4	Düşük	59.282
5	100	4	Düşük	428.339
6	4	4	Orta	56
7	10	4	Orta	673
8	25	4	Orta	31.779
9	50	4	Orta	71.064
10	100	4	Orta	362.140
11	4	4	Yüksek	77
12	10	4	Yüksek	5.448
13	25	4	Yüksek	1.318
14	50	4	Yüksek	2.321
15	100	4	Yüksek	8.312

Tablo 4.17’de yer alan problemlerde dört yenilenemeyen proje kaynağı bulunan senaryoda faaliyet sayıları dört ile yüz arasında ve öncelik ilişkileri düşük, orta ve yüksek seviyede değiştirilerek model sonuçları elde edilmiştir. Yenilenemeyen proje kaynaklarının proje süresince kullanımını gösteren grafik Şekil 4.16’da yer almaktadır:



Şekil 4.16. Yenilenemeyen Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği

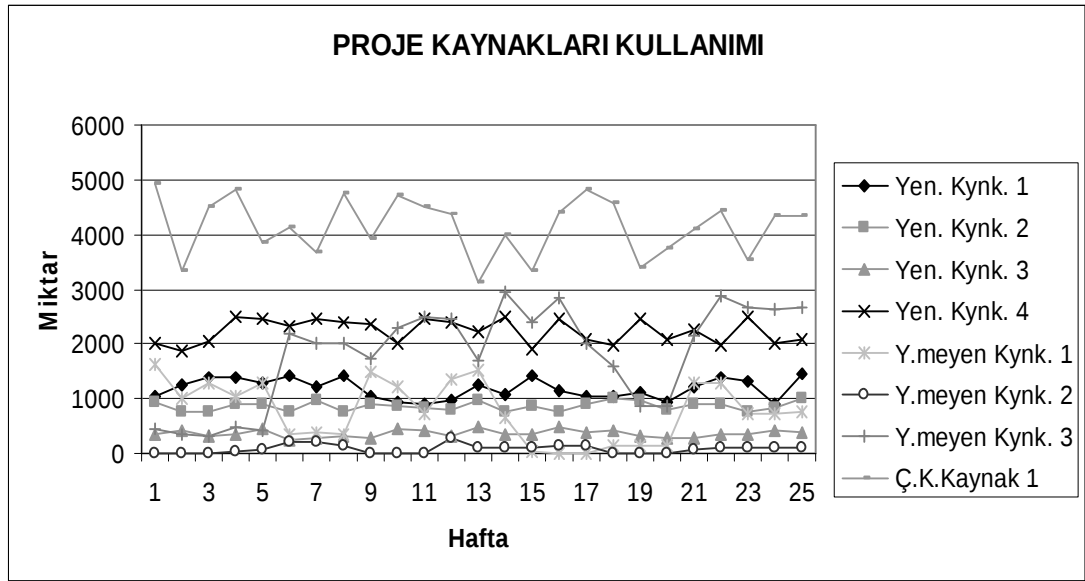
Şekil 4.16’da yer alan yenilenemeyen proje kaynakları grafiği incelendiğinde proje kaynak kullanım miktarlarının dönemlerde kısıtlı olmadığı ve bunun sonucunda dönemsel kaynak kullanımlarında büyük farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Söz konusu senaryoda, toplam proje süresince kaynak kullanım miktarlarının toplamının kullanılabilir kaynak miktarına olan kaynak kullanım oranları sırasıyla %97,46, %81,23, %90,76 ve %88,70 olarak belirlenmiştir. Ortalama kaynak kullanım oranı %89,54 olarak hesaplanmıştır. Yenilenemeyen kaynakların kullanım oranlarının yenilenebilir kaynakların kullanım oranlarına göre %6,45 daha yüksek olduğu görülmektedir.

Üçüncü grup senaryoda ise yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı proje kaynakların matematiksel modelde bir arada yer aldığı durum ele alınmıştır. Bu senaryoda kullanılan kaynakların bir kısmının projenin her döneminde, bir kısmının projenin tamamında, bir kısmının ise hem projenin dönemlerinde hem de tamamında sınırlı miktarda kullanılabileceği durum değerlendirilmektedir. Üçüncü grup senaryoda elde edilen model sonuçları Tablo 4.18’de yer almaktadır:

Tablo 4.18. Yenilenebilir, Yenilenemeyen ve Çift Kısıtlı Kaynak Kısıtlı KKPC Sonuçları

Çl. No	Faal Sy.	Kyn Sy.	Öncelik İlişkileri	Amaç Fonksiyonu Beklenen Değeri
1	4	8	Düşük	10.514
2	10	8	Düşük	329.343
3	25	8	Düşük	317.645
4	50	8	Düşük	801.094
5	100	8	Düşük	3.577.104
6	4	8	Orta	8.010
7	10	8	Orta	51.920
8	25	8	Orta	195.710
9	50	8	Orta	969.620
10	100	8	Orta	3.277.925
11	4	8	Yüksek	7.045
12	10	8	Yüksek	23.874
13	25	8	Yüksek	336.589
14	50	8	Yüksek	506.872
15	100	8	Yüksek	3.305.701

Tablo 4.18’de yer alan problemlerde dört yenilenebilir proje kaynağı, üç yenilenemeyen proje kaynağı ve bir çift kısıtlı proje kaynağı bulunan senaryoda faaliyet sayıları dört ile yüz arasında ve öncelik ilişkileri düşük, orta ve yüksek seviyede değiştirilerek model sonuçları elde edilmiştir. Proje kaynaklarının tamamının proje süresince kullanımını gösteren grafik Şekil 4.17’de yer almaktadır:



Şekil 4.17. Yenilenebilir, Yenilenemeyen ve Çift Kısıtlı Proje Kay. Kul. Grafiği

Şekil 4.17’de yer alan yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift proje kaynakları grafiği incelendiğinde yenilenebilir kaynakların kullanımının dönemsel olarak kısıtlandığı ve proje süresince dengeli dağıldığı görülmektedir. Yenilenemeyen kaynakların ise kullanımında proje dönemlerinde farklılıklar mevcuttur. Çift kısıtlı kaynağın kullanımı ise hem proje dönemlerinde hem de toplam proje süresince kısıtlanmıştır. Söz konusu senaryoda, kaynak kullanım oranları yenilenebilir kaynaklar için %76,60, %86,29, %72,30 ve %85,81; yenilenemeyen kaynaklar için, %97,46, %94,45 ve %90,76; çift kısıtlı kaynak için %78,04 olarak belirlenmiştir. Yenilenebilir kaynakların kullanım oranları ortalaması %80,25, yenilenemeyen kaynakların kullanım oranları ortalaması %94,22 olmuştur.

Sonuç olarak, ele alınan projelerde yenilenebilir kaynakların proje süresince dönemsel kullanımlarının yenilenemeyen kaynaklara göre daha dengeli bir dağılıma

sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak toplam proje süresince yenilenemeyen kaynakların kullanım oranlarının yenilenebilir kaynakların kullanım oranlarından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Çift kısıtlı kaynakların kullanımları ise hem dönemsel olarak hem de proje süresince kısıtlı olduğu için kullanım oranları en düşük seviyede kalmaktadır.

4.6. Gerçek Proje Uygulaması

Tez çalışmasında oluşturulan matematiksel modelin performansının teorik olarak değerlendirilmesinden sonra oluşturulan proje yönetimi metodolojisinin gerçek proje uygulaması gerçekleştirilmiştir. Metodolojinin uygulanması için altyapı inşaatı projesi seçilmiştir. Ele alınan proje “Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı” projesidir.

Söz konusu proje kapsamında 539 ha (brüt) arazinin orta basınçlı borulu sistemle sulanması amacıyla orta basınçlı sulama sistemi yapımı işi gerçekleştirilmektedir. Proje sahasının tesliminden sonra Nisan 2008 tarihinde inşaat çalışmalarına başlanmış olup; projenin Eylül 2008 tarihinde tamamlanması hedeflenmiştir.

Geliştirilen proje yönetimi metodolojisinin inşaat projesine uygulanması amacıyla öncelikle proje kapsamında gerçekleştirilecek olan faaliyetler tespit edilerek numaralanmış ve faaliyetlerin öncelik sırasına göre teknik kısıtlar belirlenmiştir:

Tablo 4.19. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyetler ve Teknik Kısıtlar

Faal. No	İş Kalemi No	İş Kaleminin Adı ve Kısa Açıklaması	Miktarı	Ölçü Birimi	Teknik Kısıtlar
1	KİS-4450	450 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	336	m	-
2	KİS-4400	400 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	732	m	-
3	KİS-4355	355 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1668	m	-
4	KİS-4315	315 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	996	m	-
5	KİS-4280	280 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1284	m	1,2,3,4
6	KİS-4250	250 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1944	m	1,2,3,4
7	KİS-4225	225 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1596	m	1,2,3,4
8	KİS-4200	200 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1800	m	1,2,3,4
9	KİS-4180	180 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	672	m	5,6,7,8
10	KİS-4160	160 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	744	m	5,6,7,8
11	KİS-4140	140 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	3036	m	5,6,7,8
12	KİS-4125	125 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	396	m	5,6,7,8
13	KİS-4110	110 mm 4 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	588	m	5,6,7,8
14	KİS-5200	200 mm 5 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	252	m	5,6,7,8
15	KİS-5140	140 mm 5 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	1068	m	5,6,7,8
16	KİS-5110	110 mm 5 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	4200	m	5,6,7,8
17	KİS-6140	140 mm 6 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	240	m	5,6,7,8
18	KİS-6125	125 mm 6 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	276	m	5,6,7,8
19	KİS-6110	110 mm 6 Atm HDPE Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	804	m	5,6,7,8
20	KİS-AÇ1	A Tipinde Tek Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapısı	3	Adet	10-19
21	KİS-AÇ2	A Tipinde Çift Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapısı	8	Adet	10-19
22	KİS-DC1	D Tipinde Tek Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapısı	5	Adet	10-19
23	KİS-DC2	D Tipinde Çift Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapısı	38	Adet	10-19
24	KİS-DC4	D Tipinde Dört Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapısı	1	Adet	10-19
25	KİS-SC1	Tek Çıkışlı Basit Su Alma Vanası Yapısı Yapılması	4	Adet	10-19
26	KİS-SC2	Çift Çıkışlı Basit Su Alma Vanası Yapısı Yapılması	19	Adet	10-19
27	KİS-SC4	Dört Çıkışlı Basit Su Alma Vanası Yapısı Yapılması	1	Adet	10-19
28	KİS-D2V50	D Tipinde Çift Çıkışlı Sulama Hidrantı Yapılması	1	Adet	10-19
29	KİS-V050	Ø50 Vantuz Yapısının Yapılması	1	Adet	5,6,7,8
30	KİS-V080	Ø80 Vantuz Yapısının Yapılması	1	Adet	5,6,7,8
31	KİS-AT01	Ara Tahliye Yapısının Yapılması	3	Adet	5,6,7,8
32	KİS-HT01	Hat Sonu Tahliye Yapısının Yapılması	30	Adet	5,6,7,8
33	KİS-T300KP	Ayrımda Ø300 Teflon Vanası Yapısının Yapılması	1	Adet	5,6,7,8
34	KİS-	Ayrımda Ø300 Teflon Vanası ve Ø80 Vantuz	3	Adet	5,6,7,8
35	KİS-	Ayrımda Ø250 Teflon Vanası ve Ø50 Vantuz	2	Adet	5,6,7,8
36	KİS-	Ayrımda Ø200 Teflon Vanası ve Ø50 Vantuz	4	Adet	5,6,7,8
37	KİS-	Ayrımda Ø150 Teflon Vanası ve Ø50 Vantuz	6	Adet	5,6,7,8
38	KİS-	Ayrımda Ø100 Teflon Vanası ve Ø50 Vantuz	1	Adet	5,6,7,8
39	KİS-PY450	S2-Y9 Kanalı Ø450 Borulu Şebekeye Ayrımı	1	Adet	-
40	KİS-PY400	S2-Y9 Kanalı Ø400 Borulu Şebekeye Ayrımı	3	Adet	-
41	KİS-PY355	S2-Y9 Kanalı Ø355 Borulu Şebekeye Ayrımı	3	Adet	-
42	KİS-PY315	S2-Y9 Kanalı Ø315 Borulu Şebekeye Ayrımı	2	Adet	-
43	KİS-PY280	S2-Y9 Kanalı Ø280 Borulu Şebekeye Ayrımı	2	Adet	-
44	KİS-PY250	S2-Y9 Kanalı Ø250 Borulu Şebekeye Ayrımı	1	Adet	-
45	KİS-PY180	S2-Y9 Kanalı Ø180 Borulu Şebekeye Ayrımı	1	Adet	-
46	KİS-HB01	Hava Borusu Yapısının Yapılması	1	Adet	-
47	KİS-DH01	Dinlendirme Havuzu Yapısının Yapılması	1	Götürü	1,2,3,4
48	KİS-KŞ01	S2-Y9 Kanalı Şev Yükseltilmesi İmalatı	1	Götürü	1,2,3,4
49	KİS-PDTK	PE100 Boru Hatları Üzerindeki Dirsek Beton Tespit	11	Adet	10-19
50	KİS-DP1	S2-Y6 Kanallında Deplase Yapılması	307	m ³	48
51	KİS-DP2	S2-Y6 -5 Kanaletinde Deplase Yapılması	68	m ³	48
52	KİS-DP3	S2-Y6 Kanallında Deplase Yapılması	180	m ³	48
53	KİS-DP4	S2-Y6-5 Kanaletinde Sifonda Deplase Yapılması	12	m ³	48
54	KİS-DP5	çap 1000 ve çap 800 Çelik Br.ve Öz.Pr.Tem.ve Döş.	89,1	m	51,53
55	KİS-SFN	S2-Y18 kanaleti sifonunun yenilenmesi	147,72	m	54
56	KİS-THLY	S1-0-17 Tersiyer Kanalet Tahliyesi + Sifon (12 m)	1	Götürü	55

Tablo 4.19’da belirtildiği şekilde projenin gerçekleştirilmesi için tamamlanması gereken 56 faaliyet belirlenmiştir. Bir sonraki adımda belirlenen faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan proje kaynakları çeşitleri ve miktarları belirlenmiştir. Projede kullanılacak olan dört yenilenebilir kaynak, üç yenilenemeyen kaynak ve bir çift kısıtlı kaynak mevcuttur. Proje kaynakları, sırasıyla, kazıcı iş makineleri, boru montaj makineleri, beton taşıyıcı transmikserler, işçilikler, HDPE boru ve ek parçaları, hazır beton, inşaat demiri ve nakit akışı şeklinde belirlenmiştir. Her faaliyetin tamamlanması için kullanılması gereken kaynak miktarları Tablo 4.20’de yer almaktadır.

Faaliyet kaynak ihtiyaçlarının belirlenmesinden sonra proje faaliyet süreleri dağılımlarının üçgen bulanık sayı dağılımına uygun olarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Dağılımların belirlenmesinde BIFPET metodolojisinde öngörüldüğü biçimiyle uzman görüşüne başvurulmuştur. Bunun için öncelikle ilgili faaliyeti arazide uygulayacak olan inşaat formenlerinden proje faaliyet süresinin iyimser, ortalama ve kötümser gerçekleşme sürelerine dair tahminleri sorulmuştur. Her faaliyet için belirlenen süreler proje müdürü tarafından revize edilerek proje planlamasında kullanılmıştır. Faaliyet sürelerinin iyimser, beklenen ve kötümser faaliyet süreleri Tablo 4.21’de yer almaktadır.

Tablo 4.20. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyetlere Ait Kaynak İhtiyaçları

F. N.	İş Kalemi Kodu	Kay. 1 Kazıcı İş Mak.	Kay. 2 Boru Montaj Mak.	Kay. 3 Beton Transmi kser	Kay. 4 İşçilik	Kay. 5 HDPE Boru ve Ek Prç.	Kay. 6 C16 Hazır Beton	Kay. 7 İnşaat Demiri	Kay. 8 Nakit Akışı
1	KİS-4450	153	61	0	397	268	0	0	1933
2	KİS-4400	156	76	0	646	344	0	0	2275
3	KİS-4355	30	184	0	434	234	0	0	1303
4	KİS-4315	270	162	0	599	449	0	0	3441
5	KİS-4280	121	80	0	257	328	0	0	1710
6	KİS-4250	38	22	0	389	386	0	0	1114
7	KİS-4225	124	10	0	319	332	0	0	1609
8	KİS-4200	32	13	0	360	350	0	0	980
9	KİS-4180	17	12	0	134	72	0	0	348
10	KİS-4160	30	17	0	149	44	0	0	434
11	KİS-4140	121	190	0	607	218	0	0	2110
12	KİS-4125	10	25	0	79	196	0	0	442
13	KİS-4110	15	37	0	118	288	0	0	654
14	KİS-5200	10	16	0	50	152	0	0	343
15	KİS-5140	43	67	0	214	168	0	0	861
16	KİS-5110	65	63	0	840	40	0	0	1325
17	KİS-6140	10	15	0	48	240	0	0	449
18	KİS-6125	11	17	0	55	276	0	0	511
19	KİS-6110	32	50	0	161	304	0	0	866
20	KİS-AÇ1	12	0	6	120	0	3	150	289
21	KİS-AÇ2	32	0	16	320	0	8	400	770
22	KİS-DÇ1	20	0	10	200	0	5	250	481
23	KİS-DÇ2	250	0	76	520	0	90	600	4163
24	KİS-DÇ4	4	0	2	40	0	1	50	96
25	KİS-SÇ1	16	0	8	160	0	4	200	385
26	KİS-SÇ2	76	0	38	760	0	19	450	1704
27	KİS-SÇ4	4	0	2	40	0	1	50	96
28	KİS-D2V50	4	0	2	40	0	1	50	96
29	KİS-V050	4	0	2	40	0	1	50	96
30	KİS-V080	4	0	2	40	0	1	50	96
31	KİS-AT01	12	0	6	120	0	3	150	289
32	KİS-HT01	20	0	60	300	0	30	500	1213
33	KİS-T300KP	40	0	20	40	0	10	250	630
34	KİS-00KV80	80	0	60	120	0	30	350	1490
35	KİS-50KV50	8	0	4	80	0	2	100	193
36	KİS-00SV50	16	0	8	160	0	4	200	385
37	KİS-50SV50	24	0	12	240	0	6	300	578
38	KİS-00SV50	4	0	2	40	0	1	50	96
39	KİS-PY450	4	0	2	40	0	1	50	96
40	KİS-PY400	12	0	6	120	0	3	150	289
41	KİS-PY355	12	0	6	120	0	3	150	289
42	KİS-PY315	80	0	4	80	0	2	100	733
43	KİS-PY280	80	0	4	80	0	2	100	733
44	KİS-PY250	40	0	2	40	0	1	50	366
45	KİS-PY180	40	0	2	40	0	1	50	366
46	KİS-HB01	10	0	4	100	10	2	100	235
47	KİS-DH01	5	0	20	200	20	5	250	431
48	KİS-KŞ01	35	0	50	75	100	50	1750	1881
49	KİS-PDTK	22	0	11	55	0	6	300	420
50	KİS-DP1	26	0	25	213	0	19	950	995
51	KİS-DP2	6	0	9	102	0	5	250	299
52	KİS-DP3	15	0	23	70	0	12	600	596
53	KİS-DP4	1	0	2	36	0	1	50	71
54	KİS-DP5	7	0	0	18	0	0	0	66
55	KİS-SFN	60	0	0	30	0	0	0	473
56	KİS-THLY	200	0	50	500	150	25	250	2719

Tablo 4.21. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Gerçekleştirilecek Faaliyet Süreleri

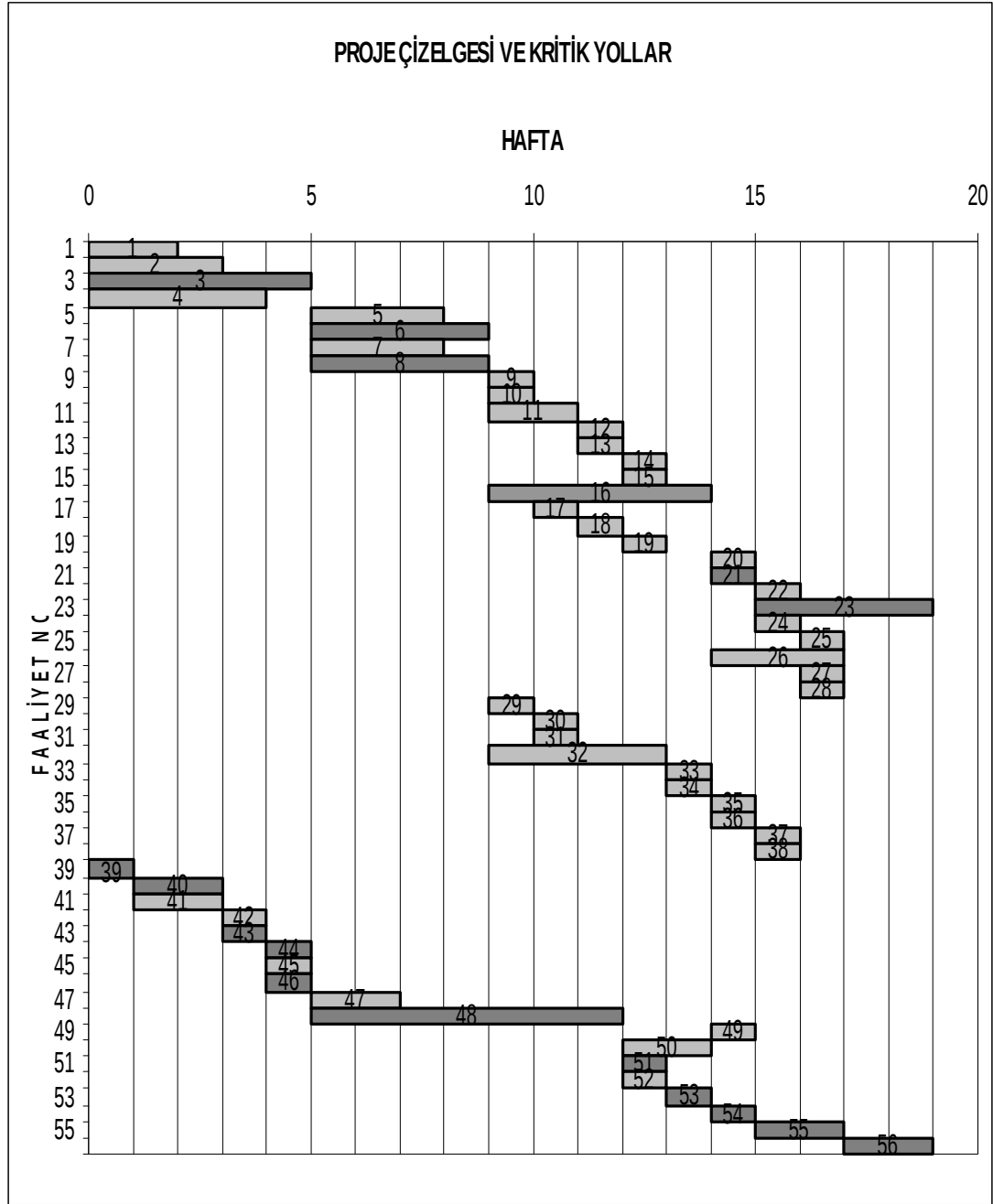
<u>Faal. No</u>	<u>İş Kalemi Kodu</u>	<u>İyimsir Süre</u>	<u>Beklenen Süre</u>	<u>Kötümser Süre</u>
1	KİS-4450	1	2	3
2	KİS-4400	2	3	4
3	KİS-4355	4	5	6
4	KİS-4315	3	4	5
5	KİS-4280	2	3	4
6	KİS-4250	1	4	5
7	KİS-4225	1	3	4
8	KİS-4200	2	3	5
9	KİS-4180	1	1	2
10	KİS-4160	1	1	2
11	KİS-4140	1	2	4
12	KİS-4125	1	1	1
13	KİS-4110	1	1	2
14	KİS-5200	1	1	1
15	KİS-5140	1	1	2
16	KİS-5110	3	5	5
17	KİS-6140	1	1	1
18	KİS-6125	1	1	1
19	KİS-6110	1	1	1
20	KİS-AÇ1	1	1	1
21	KİS-AÇ2	1	1	2
22	KİS-DÇ1	1	1	1
23	KİS-DÇ2	3	4	5
24	KİS-DÇ4	1	1	1
25	KİS-SC1	1	1	1
26	KİS-SC2	2	3	4
27	KİS-SC4	1	1	1
28	KİS-D2V50	1	1	1
29	KİS-V050	1	1	1
30	KİS-V080	1	1	1
31	KİS-AT01	1	1	1
32	KİS-HT01	3	4	5
33	KİS-T300KP	1	1	1
34	KİS-T300KV80	1	1	1
35	KİS-T250KV50	1	1	1
36	KİS-T200SV50	1	1	1
37	KİS-T150SV50	1	1	1
38	KİS-T100SV50	1	1	1
39	KİS-PY450	1	1	1
40	KİS-PY400	1	2	2
41	KİS-PY355	1	2	3
42	KİS-PY315	1	1	2
43	KİS-PY280	1	1	2
44	KİS-PY250	1	1	1
45	KİS-PY180	1	1	1
46	KİS-HB01	1	1	1
47	KİS-DH01	2	2	3
48	KİS-KS01	5	7	8
49	KİS-PDTK	1	1	1
50	KİS-DP1	1	2	3
51	KİS-DP2	1	1	1
52	KİS-DP3	1	1	2
53	KİS-DP4	1	1	1
54	KİS-DP5	1	1	1
55	KİS-SFN	1	2	3
56	KİS-THLY	1	2	3

Proje verilerinin düzenlenerek matematiksel modelde kullanılacak hale getirilmesinden sonra oluşturulan matematiksel modelin GAMS ortamında çözülmesi aşamasına gelinmiştir. Çözüm yöntemi olarak öncelikle doğrudan optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Ancak, doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde tamsayı çözüm elde edilememesi sonucunda başlangıç çözümünün sezgisel algoritmayla belirlenmesi ve çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemleri kullanılmıştır. Sezgisel algoritmayla belirlenen başlangıç çözümü matematiksel modele eklenmiş ve çözüm süresinin kısaltılması için çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan matematiksel model GAMS ortamında OSL2 algoritması kullanılarak çözümlenerek toplam proje süresi ve toplam proje maliyetleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

Tablo 4.22. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Projesi Planlama Modeli Sonuçları

Model Sonuçları	Beklenen Değer
Toplam Maliyet (YTL):	585.893
Toplam Proje Süresi (hafta):	19

Ayrıca, proje planlamasında kullanılmak üzere ortalama faaliyet süreleri esas alınarak proje planlama çizelgesi hazırlanmıştır ve Şekil 4.18’de sunulmaktadır:



Şekil 4.18. Proje Faaliyet Çizelgesi ve Kritik Yollar

Şekil 4.18’de yer alan proje faaliyet çizelgesindeki gösterimde projenin yürütülmesinde dört kritik yol belirlenmiştir. Belirlenen proje kritik yolları ve kritik yol süreleri Tablo 4.23’de belirtilmektedir:

Tablo 4.23. Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı Proje Kritik Yolları

Kritik Yol No	Kritik Faaliyetler	Beklenen Tamamlanma Süresi
1	3-6-16-21-23	19
2	3-8-16-21-23	18
3	39-40-43-44-48-51-53-54-55-56	19
4	39-40-43-46-48-51-53-54-55-56	19

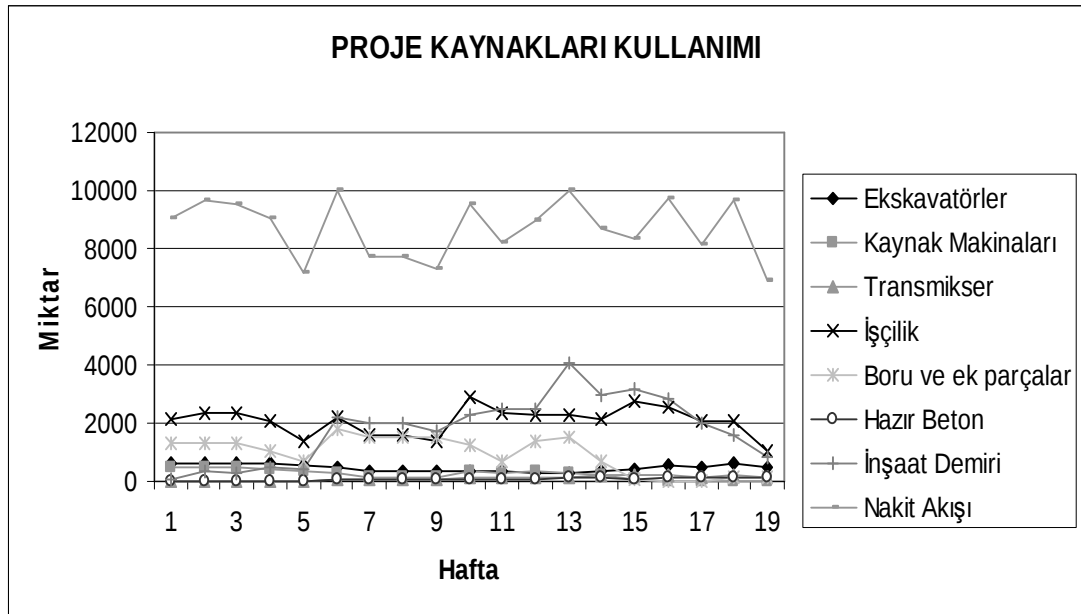
Tablo 4.23’de belirtildiği şekilde dört kritik proje yolu belirlenmiştir. Proje kritik yollarının tamamlanabileceği en uzun beklenen süre olan 19 hafta projenin tamamının beklenen tamamlanma süresini ifade etmektedir.

Projenin yürütülmesinde kullanılan sekiz proje kaynağının proje süresince kullanım miktarları Tablo 4.24’de yer almaktadır:

Tablo 4.24. Proje Kaynakları Dağılımı Tablosu

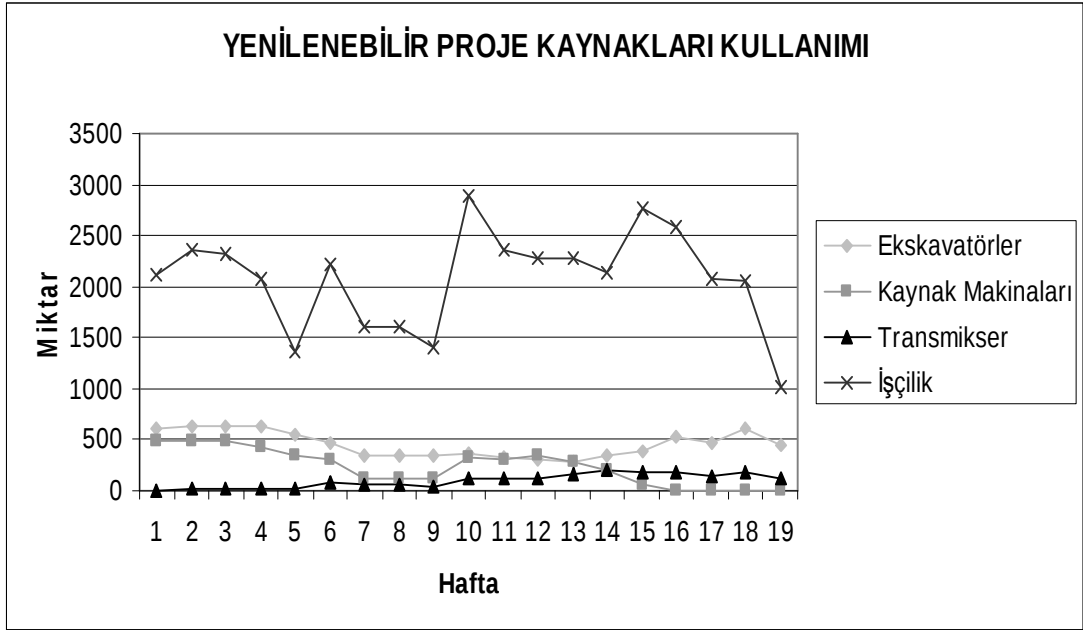
Hafta	Ekskav. (sa.)	Kaynak Makinaları (sa.)	Trans mikser (sa.)	İşçilik (sa.)	Boru ve ek parçalar (m)	Hazır Beton (m3)	İnşaat Demiri (kg)	Nakit Akışı (YTL)
1	613	483	2	2116	1295	1	50	9047
2	637	483	14	2356	1295	7	350	9625
3	633	483	12	2316	1295	6	300	9528
4	640	422	20	2079	1027	10	500	9061
5	550	346	16	1373	693	8	400	7176
6	475	309	78	2214	1760	59	2200	9997
7	355	125	70	1600	1516	55	2000	7726
8	355	125	70	1600	1516	55	2000	7726
9	350	125	50	1400	1496	50	1750	7295
10	362	317	112	2894	1210	81	2300	9502
11	318	297	120	2353	714	85	2500	8241
12	303	347	118	2282	1358	84	2450	8969
13	288	275	167	2277	1524	116	4050	9984
14	338	196	199	2146	664	107	2950	8687
15	385	63	190	2762	40	102	3200	8337
16	535	0	185	2583	0	145	2850	9712
17	462	0	152	2070	0	128	2000	8168
18	610	0	176	2050	150	140	1600	9635
19	450	0	126	1020	150	115	850	6881

Projenin yürütülmesinde kullanılan sekiz proje kaynağı arasında yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklar türde kaynaklar mevcuttur. Kullanımı her dönemde sınırlı olan ve yeniden kullanılabilen kaynaklar iş makineleri ve işçilikler şeklinde modelde yer almıştır. Kullanımı dönemlerde kısıtlı olmayan ancak proje süresince toplam kullanımı kısıtlı olan malzemeler yenilenemeyen kaynaklar olarak modelde yer almıştır. Kullanımı hem her dönemde hem de proje süresince toplamı kısıtlı olan çift kısıtlı kaynak olarak nakit akışı modelde yer almıştır. Söz konusu kaynakların proje süresince kullanımını gösteren grafik Şekil 4.19'da yer almaktadır:

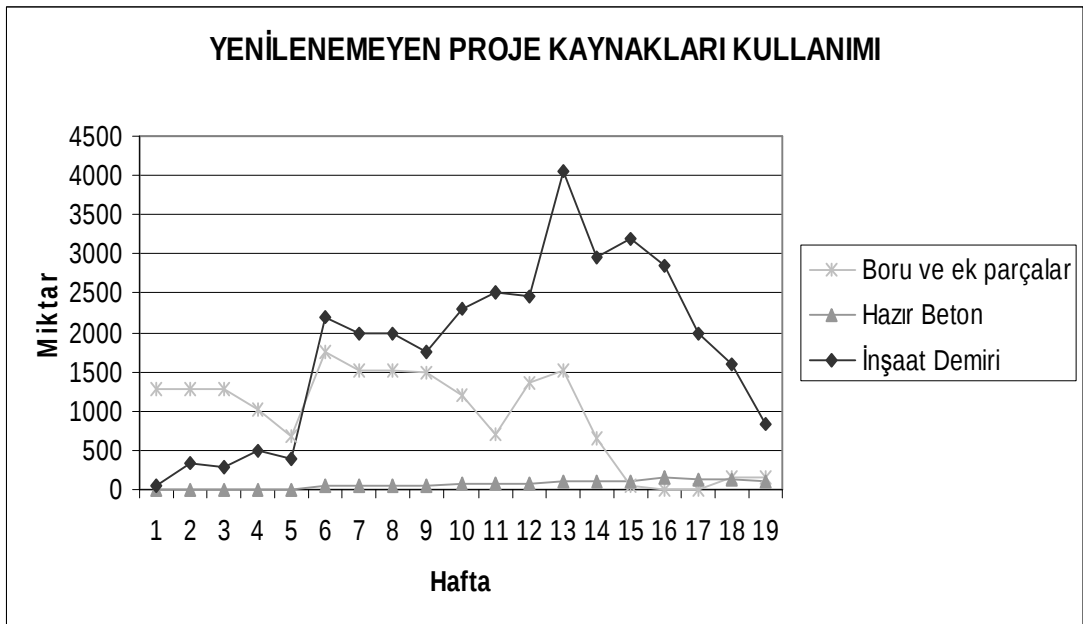


Şekil 4.19. Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği

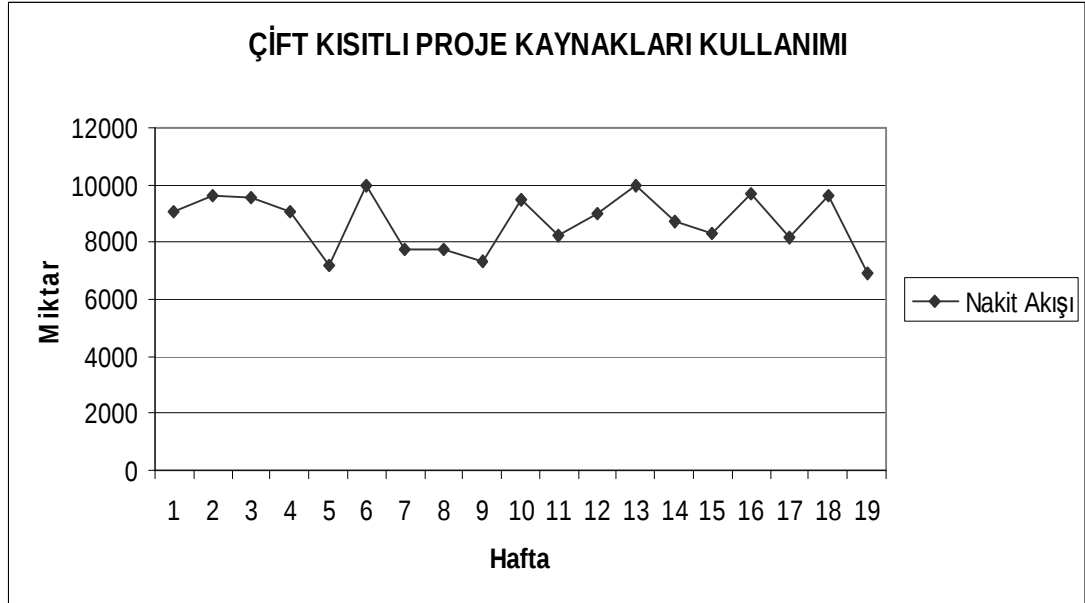
Proje süresince kullanılan kaynakların kullanımları sürdürülen faaliyetlerin durumuna göre değişiklik göstermektedir. Kaynakların türlerine göre dönemlerde ve proje süresince kullanımlarındaki kısıtlamalar faaliyet çizelgelemesi yapılırken gözönünde bulundurulmuştur. Bu şekilde kaynaklarının kullanılabilir miktarına ve dönemdeki kullanım maliyetine göre faaliyetlerin yürütülmesinde etkili şekilde kullanılması hedeflenmiştir. Projede kullanılan yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynakların kullanımları aşağıdaki şekildedir:



Şekil 4.20. Yenilenebilir Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği



Şekil 4.21. Yenilenemeyen Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği



Şekil 4.22. Çift Kısıtlı Proje Kaynakları Kullanımı Grafiği

Şekil 4.20’de gösterilen yenilenebilir proje kaynaklarının kullanımları her dönemde sınırlı olduğundan kullanım grafiklerinde yüksek sapmalar bulunmamaktadır. İşçilik kaynağında mevcut bulunan sapmalar ise faaliyet ihtiyaçlarına göre gündelik yevmiye ile işçi çalıştırılması sebebiyle oluşmaktadır.

Şekil 4.21’de gösterilen yenilenemeyen proje kaynaklarının kullanımları toplam proje süresince kısıtlı olup dönemler itibariyle herhangi bir kısıtlama mevcut olmadığından kaynak kullanım grafikleri dönemler itibariyle yüksek sapmalar göstermektedir.

Şekil 4.22’de yer alan çift kısıtlı proje kaynağının kullanımı hem dönemler itibariyle hem de toplam proje süresince kısıtlı olup, kaynak kullanımı proje süresince yüksek sapmalar oluşmadan devam etmektedir.

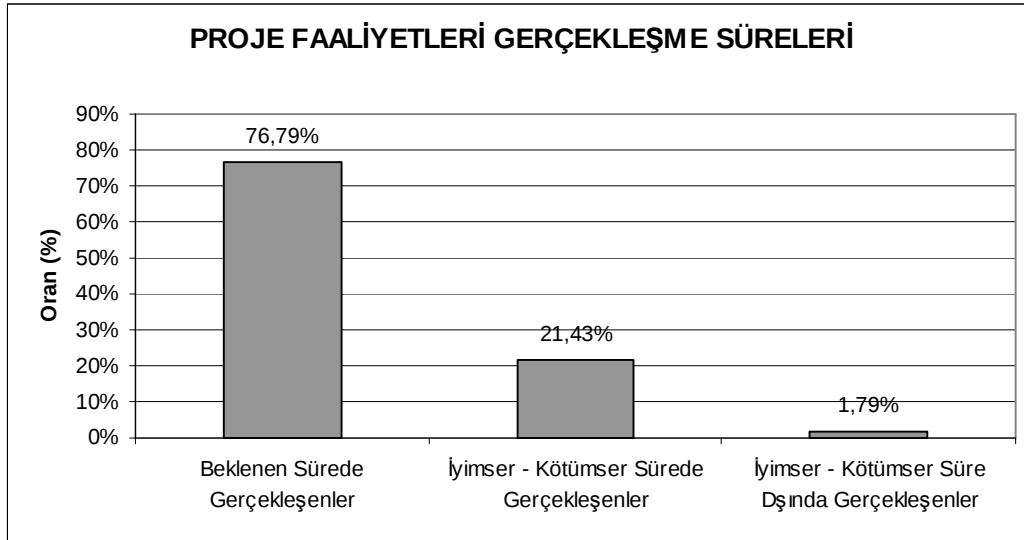
Bundan sonraki aşamada matematiksel model kullanılarak elde edilen tahminlerin proje sonuçlarıyla karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Toplam proje süresi ve toplam proje maliyeti tahminleri ve gerçekleştirmeleri Tablo 4.25’de yer almaktadır:

Tablo 4.25 Toplam Proje Süresi ve Maliyeti Tahminleri ve Gerçekleşmeleri

Model Sonuçları	Gerçekleşme	Tahmin	Sapma
Toplam Proje Süresi (hafta)	20	19	5,26%
Toplam Proje Maliyeti (YTL)	608.326,53	585.893,08	3,83%

Kırklareli Ovası İlave Sulama Şebekesi İnşaatı projesi 20 hafta sürede, toplam 608.326,53 YTL maliyet ile tamamlanmıştır. Matematiksel model kullanılarak elde edilmiş bulunan beklenen toplam proje süresi tahmini 19 hafta, beklenen toplam proje maliyeti tahmini ise 585.893,08 YTL oluşmuştur. Buna göre toplam proje süresi tahmini %5,26; toplam proje maliyeti tahmini %3,83 sapma ile proje gerçekleştirmelerini tahminde başarılı olmuştur.

Proje faaliyetlerinin gerçekleştirmelerinin beklenen faaliyet tamamlanma süresinde ve faaliyet süresi tahmin aralığında gerçekleştirmelerini gösteren grafik Şekil 4.23’de yer almaktadır:



Şekil 4.23. Faaliyet Tamamlanma Süreleri Tahminlerle Karşılaştırılması

Gerçekleştirilen 56 proje faaliyetinin 43’ü beklenen sürede, 12’si iyimses ve kötümser süre aralığında gerçekleşmiştir. Bir faaliyet ise faaliyetin gerçekleştirilmesi sırasında yaşanan ve önceden öngörülemeyen kamulaştırma problemi sebebiyle kötümser süre tahmininden daha uzun sürede tamamlanabilmiştir. Faaliyet gerçekleştirme sürelerinin uzman tecrübesine dayanılarak oluşturulan bulanık üçgen

sayı dağılımlarına uygun olması, kullanılan uzman tecrübesinin ve bu bilgiyi modellemede kullanılan matematiksel yöntemin tatminkar düzeyde olduğunu göstermiştir.

Projede kullanılan kaynakların proje süresince kullanımlarına dair gerçekleştirmeler, tahminler ve sapmalar Tablo 4.26’da gösterilmektedir:

Tablo 4.26. Toplam Proje Kaynakları Kullanımlarının Karşılaştırılması

Proje Kaynakları	Birim	Gerçekleşme	Tahmin	Sapma
Ekskavatörler	saat	5.697	5.395	5,60%
Kaynak Makinaları	saat	4.315	4.439	-2,80%
Transmikser	saat	1.926	2.021	-4,70%
İşçilik	saat	41.158	37.659	9,29%
Boru ve ek parçalar	m	23.988	23.704	1,20%
Hazır Beton	m ³	1.056	1.012	4,30%
İnşaat Demiri	kg	51.764	50.600	2,30%
Nakit Akışı	YTL	158.673	146.108	8,60%

Proje kaynakları kullanımları incelendiğinde toplam kaynak kullanımı gerçekleştirmeleriyle model tahminleri arasında %1,20 ile %9,29 oranında sapmalar bulunduğu görülmüştür. Toplam proje maliyetindeki sapma ise %3,83 olarak gerçekleşmiştir. Bu oranlar modelin kaynak kullanımı tahminlerinin gerçekleştirmeleri tahminde başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğine, matematiksel model kullanılarak elde edilen toplam proje süresi, toplam proje maliyeti, proje faaliyeti çizelgesi ve kaynak kullanımı tahminleri ile gerçekleştirmeler arasındaki sapmaların küçük olduğu ve model tahminlerinin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**5.1. Çalışmanın Özeti**

Bu çalışmada bulanık faaliyet süreli kaynak kısıtlı proje çizelgeleme proje problemi ele alınmıştır. Söz konusu problemin araştırılmasında, birinci aşamada proje faaliyet sürelerinde mevcut bulunan belirsizliklerinin matematiksel olarak modellenmesinde kullanılacak yöntem belirlenmiştir. İkinci aşamada KKPC probleminin zaman ve maliyet unsurları ile kaynak kısıtlarını uygun şekilde içerecek bir matematiksel model kurulması üzerinde çalışılmıştır. Üçüncü aşamada oluşturulan bulanık matematiksel modelin kesinleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Dördüncü aşamada, matematiksel modelde mevcut bulunan hesaplama karmaşıklığı incelenmiş ve çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın son kısmında ise, senaryo analizleri kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin performansı araştırılmış ve gerçek proje çalışması yapılarak pratik alandaki uygulaması gösterilmiştir.

Çalışmada öncelikle projelerde mevcut bulunan belirsizliğin modellenmesi amacıyla proje ağında yer alan faaliyetlerin süreleri için BIFPET (Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time) metodolojisine uygun olarak bulanık sayı üyelik fonksiyonları belirlenmiş ve faaliyet süreleri bulanık üçgen sayılar şeklinde modele dahil edilmiştir. Bu yaklaşım ile faaliyet sürelerinin proje yöneticisi tarafından uzman görüşü esas alınarak kullanılması mümkün hale gelmekte ve pratik uygulamada önemli kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca, özellikle proje faaliyetleriyle ilgili geçmiş bilgilere sahip olunmadığı durumlarda (örn. ürün geliştirme projelerinde) bu yaklaşım önem kazanmaktadır. Kullanılan bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşımı ile proje faaliyet sürelerinin belirli olduğunu varsayan deterministik yaklaşıma ve faaliyet sürelerinin bilinen bir istatistik dağılıma uygun olduğunu varsayan stokastik yaklaşıma göre, pratik kullanımı daha etkin olan bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan matematiksel model oluşturulmuştur. Model oluşturulurken projenin maliyet ve zaman amaçları göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan formülasyon ile hem toplam proje maliyetinin

en aza indirilmesi öngörülmüş hem de proje süresinin toplam maliyete etkisi göz önünde bulundurularak projenin mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan matematiksel modelde çoklu kaynak durumu öngörülmüştür. Kaynak maliyetlerinin sabit olduğu varsayımı kaldırılmış ve kaynak kullanımı maliyetinin proje süresince değiştiği durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde projenin minimum maliyetle ve zamanında tamamlanabilmesi için gereken kaynak dağılımının yapılması sağlanmıştır.

Üçüncü aşamada oluşturulan matematiksel modelin kesinleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Modelin bulanık modelin bulanık operatörler kullanılarak işlenmesi ve elde edilen bulanık sonuçların bir kesinleştirme yöntemi kullanılarak kesin hale getirilmesi yaklaşımında model büyüklüğü arttıkça optimal çözüme ulaşmanın zorlaşması sebebiyle, bulanık model oluşturulduktan sonra modelin kesinleştirilmesi ve kesinleştirilmiş modelin çözümlenmesi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda kesinleştirme işleminin erken aşamada kullanılması sonucunda bulanık değişkenlerin ifadesinde değer kaybı olacağı eleştirisi bulunmaktadır. Ancak, uygulamada özellikle karmaşık modellerde birinci yaklaşımın kullanılmasında yaşanan zorluklar sebebiyle ikinci tür yaklaşımların kullanıldığı gözlemlenmektedir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında ele alınan KKPC probleminin çözüm yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. Oluşturulan çekirdek model ile ilk sonuçların elde edilmesinin ardından modelin büyütülmesi üzerinde durulmuştur. Proje büyüklüğünün artmasıyla birlikte çözüm sürelerinde büyük uzamalar olması sebebiyle oluşturulan modelin etkin bir şekilde çözülmesi için uygun bir yöntem geliştirilmesi ele alınmıştır. KKPC probleminde mevcut olan hesaplama karmaşıklığı problemi incelenmiş ve farklı büyüklüklerdeki projeler ele alınmıştır. Oluşturulan karışık tamsayı matematiksel modelin çözümü için optimizasyon, sezgisel algoritma ve çözüm uzayının sınırlandırılması yaklaşımları kullanılarak proje büyüklüğüne bağlı olarak makul sürelerde optimal veya optimale yakın çözümler elde edilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde oluşturulan matematiksel modelin performansının değişik senaryolarda araştırılması amacıyla öncelikle senaryo analizleri yapılmıştır. Birinci grup senaryo analizinde, proje faaliyet sürelerinin modellenmesinde üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonları yerine yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının

kullanımı ele alınmıştır. İkinci grup senaryo analizinde, yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynak türleri kullanılarak elde edilen matematiksel model sonuçları incelenmiştir. Son olarak, oluşturulan matematiksel model gerçek projede kullanılmış, model sonuçları ile gerçek proje sonuçları karşılaştırılarak yöntemin pratik alandaki uygulaması gerçekleştirilmiştir.

5.2. Sonuçlar

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar üç grupta değerlendirilmektedir. Birinci grupta oluşturulan matematiksel modelin çözümünde kullanılacak yöntemin belirlenmesi ve uygun çözüm yönteminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar incelenmiştir. İkinci grupta senaryo analizleri kullanılarak elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Üçüncü grupta ise yöntemin pratik alanda yapılan gerçek proje uygulamasında elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Ele alınan bulanık faaliyet süreli KKPÇ probleminin çözümünde problemin karmaşıklık seviyesine göre değişen üç yöntem kullanılmıştır. Proje büyüklüğü yüksek olmayan problemlerin çözümünde birinci yöntem olarak doğrudan optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde çözülemeyen problemlerin çözümü için problemin başlangıç çözümünü sağlayan bir sezgisel algoritma ikinci yöntem olarak kullanılmıştır. Çözüm uzayı büyüklüğü çok yüksek olan problemlerde ise başlangıç çözümünün sezgisel algoritmayla belirlenmesine ek olarak çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemiyle makul sürelerde optimal veya optimele yakın çözümler elde edilebilmiştir. Proje ağında yer alan faaliyet sayısının ve planlama periyodunun düşük olduğu problemlerde kullanılan karışık tamsayı matematiksel modelin çözümünde doğrudan optimizasyon yönteminin kullanılmasının yeterli olduğu görülmüştür. Faaliyet sayısı 4 – 10, kaynak sayısı 2-8 ve düşük-orta-yüksek öncelik ilişkileri olan projeler için optimal çözümler elde edilebilmiştir. Daha büyük problemler için ise doğrudan optimizasyon yöntemi yetersiz kaldığından sezgisel yöntemler kullanılmıştır.

KKPÇ probleminin büyüklüğü arttıkça doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde optimal veya optimele yakın sonuçlar elde edilmesi mümkün

olamamaktadır. Büyük boyutlu problemlerin makul sürelerde çözülebilmesini sağlamak amacıyla iyi bir başlangıç çözümün sezgisel yöntemlerle bulunması yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımla, doğrudan optimizasyon yöntemiyle çözülmesi mümkün olmayan faaliyet sayısı yüksek (25-100 faaliyet arası) ve öncelik ilişkileri düşük problemlerde de makul sürelerde optimal veya optimale yakın çözümler elde edilmesi mümkün olmuştur. Doğrudan optimizasyon ve başlangıç çözümünün sezgisel algoritmayla bulunması yöntemleriyle çözülemeyen problemler için çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla proje faaliyetlerinin en erken başlama ve en geç bitiş zamanları belirlenerek minimizasyon problemi için üst sınır belirlenmiştir. Bu şekilde büyük proje çizelgeleme problemler için de makul süreler içerisinde optimal veya optimale yakın çözümler elde edilebilmiştir. Model çözümleri ile proje faaliyetlerinin çizelgelemesi yapılırken planlama döneminde özellikle mevsimsel etkilere göre değişen kaynak kullanım maliyetleri gözönünde bulundurularak proje toplam maliyetinin ağırlığını oluşturan kaynak kullanımlarının optimal olarak belirlenmesi sağlanmıştır.

Senaryo analizlerinde elde edilen sonuçlarda, birinci grup senaryo analizlerinde proje faaliyet sürelerinin modellenmesinde üçgen bulanık sayı üyelik fonksiyonları yerine yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda proje faaliyet sürelerinin üçgen ve yamuk bulanık sayı olarak modele dahil edildiği senaryolarda toplam proje maliyetinin beklenen değerleri arasındaki en büyük fark %5,13 olarak gerçekleşmiştir. Çalışmaların %51'indeki farkın %2'den küçük olduğu, %33'ündeki farkın %2 ile %4 arasında olduğu ve %16'sındaki farkın %4'ten büyük olduğu görülmektedir. Buna göre proje maliyetinin beklenen değerinin belirlenmesinde üçgen veya yamuk bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının kullanılmasının model sonuçlarını önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılmaktadır.

İkinci grup senaryo analizinde, yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynak türleri kullanılarak elde edilen matematiksel model sonuçları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda dört yenilenebilir proje kaynağı, üç yenilenemeyen proje kaynağı ve bir çift kısıtlı proje kaynağı bulunan senaryoda faaliyet sayıları dört ile yüz arasında ve öncelik ilişkileri düşük, orta ve yüksek seviyede değiştirilerek model

sonuçları elde edilmiştir. Yapılan senaryo analizinde kaynak kullanım oranları ortalaması yenilenebilir kaynaklar için %80,25, yenilenemeyen kaynaklar için %94,22; çift kısıtlı kaynaklar için %78,04 olarak belirlenmiştir. Ele alınan projelerde yenilenebilir kaynakların proje süresince dönemsel kullanımlarının yenilenemeyen kaynaklara göre daha dengeli bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak toplam proje süresince yenilenemeyen kaynakların kullanım oranlarının yenilenebilir kaynakların kullanım oranlarından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Çift kısıtlı kaynakların kullanımları ise hem dönemsel olarak hem de proje süresince kısıtlı olduğu için kullanım oranları en düşük seviyede kalmaktadır.

Son olarak, oluşturulan matematiksel model gerçek projede kullanılmış, model sonuçları ile gerçek proje sonuçları karşılaştırılarak yöntemin pratik alandaki uygulaması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, proje kapsamında gerçekleştirilecek olan 56 adet faaliyet tespit edilmiş ve faaliyetlerin öncelik sırasına göre teknik kısıtlar belirlenmiştir. Projenin yürütülmesinde kullanılan yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklar türde sekiz adet proje kaynağıyla ilgili kullanım maliyetleri ve kısıtları tespit edilmiştir. Faaliyet kaynak ihtiyaçlarının belirlenmesinden sonra proje faaliyet süreleri dağılımlarının üçgen bulanık sayı dağılımına uygun olarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Dağılımların belirlenmesinde BIFPET metodolojisinde öngörüldüğü biçimiyle uzman görüşüne başvurulmuştur.

Proje verilerinin düzenlenerek matematiksel modelde kullanılacak hale getirilmesinden sonra oluşturulan matematiksel model için doğrudan optimizasyon yöntemiyle makul sürelerde tamsayı çözüm elde edilememesi sonucunda sezgisel algoritmayla başlangıç çözümü belirlenerek matematiksel modele eklenmiş ve çözüm süresinin kısaltılması için çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemi kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan matematiksel model çözümlenerek toplam proje süresi ve toplam proje maliyetleri hesaplanmıştır. Elde edilen model sonuçlarına göre proje planlamasında kullanılmak üzere proje planlama çizelgesi hazırlanmış, proje kritik yolları ve proje kaynakları kullanımları belirlenmiştir.

Ele alınan proje 20 hafta sürede, toplam 608.326,53 YTL maliyet ile tamamlanmıştır. Matematiksel model kullanılarak elde edilmiş bulunan beklenen toplam proje süresi tahmini 19 hafta, beklenen toplam proje maliyeti tahmini ise

585.893,08 YTL olarak belirlenmiştir. Buna göre matematiksel model kullanılarak yapılan toplam proje süresi tahmini ile proje gerçekleşmesi arasında %5,26; toplam proje maliyeti tahmini ile proje gerçekleşmesi arasında %3,83 farklılık bulunmaktadır. Gerçekleştirilen 56 proje faaliyetinin %76,79'u beklenen sürede, %21,43'ü iyimser ve kötümser süre aralığında, %1,79'u ise beklenen zaman aralığı dışında tamamlanmıştır. Proje kaynakları kullanımları incelendiğinde toplam kaynak kullanımı gerçekleştirmeleriyle model tahminleri arasında %1,20 ile %9,29 oranında sapmalar bulunduğu görülmüştür. Toplam proje maliyetindeki sapma ise %3,83 olarak gerçekleşmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre, toplam proje süresi, toplam proje maliyeti, proje faaliyeti çizelgesi ve kaynak kullanımları ile ilgili matematiksel model sonuçları kullanılarak proje gerçekleştirmelerinin doğru şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Bu sonucun elde edilmesi, uzman tecrübesine dayanılarak oluşturulan bulanık üçgen sayı üyelik fonksiyonlarının proje faaliyet sürelerinde mevcut bulunan belirsizliğin modellenmesinde kullanılmasına dayanan matematiksel yöntemin uygunluğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, yapılan çalışmanın sonucunda gerçek projelerde mevcut bulunan belirsizliğin matematiksel olarak modellenmesi, oluşturulan modelin uygun yöntem belirlenerek çözülmesi ve elde edilen sonuçlarla proje faaliyet ve kaynak çizelgelemeleri yapılarak, gerçek projelerde zaman ve maliyet risklerinin proje yöneticileri tarafından yönetilebilmesini sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir.

5.3. Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada ele alınan bulanık faaliyet süreli kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (KKPÇ) problemi ile ilgili olarak bundan sonraki dönemde yapılabilecek çalışmalar üç alanda toplanmaktadır. Bu alanlardan birincisi, ele alınan proje ağında mevcut bulunan belirsizliklerin modellenmesinde kullanılacak yöntemle ilgili yapılabilecek çalışmaları kapsamaktadır. İkinci alandaki çalışmalar matematiksel modelin kapsamının genişletilmesini konu alabilecektir. Çalışma yapılabilecek

üçüncü alan ise oluşturulacak matematiksel modelin çözüm yönteminin geliştirilmesi alanıdır.

Çalışma yapılabilecek birinci konu matematiksel modele dahil edilen proje faaliyetlerindeki belirsizliklerin modellenmesinde uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının belirlenmesidir. Proje uzmanlarından alınan bilginin modellenmesinde kayıp yaşanmaması ve aynı zamanda model sonuçlarında iyi sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının araştırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, uygun bulanık sayı üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde ele alınan projede kullanılacak faaliyetlerin özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Oluşturulan matematiksel modelin kapsamını genişletmek üzere yapılacak çalışmalar ikinci alanı oluşturmaktadır. Modelde proje faaliyet sürelerinde mevcut bulunan belirsizliğin modellenmesi amacıyla bulanık dağılımlar kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesi amacıyla kaynak kullanım maliyetlerindeki ve kaynak kullanım miktarlarındaki belirsizliklerin de bulanık dağılımlar kullanılarak modele dahil edilmesi mümkündür. Ayrıca, bu çalışmada ele alınan tek proje durumu genişletilerek çoklu proje durumu üzerinde çalışma yapılabilecektir.

Konu üzerinde çalışma yapılabilecek üçüncü alan ise çözüm yönteminin geliştirilmesi konusudur. Literatürde KKPC problemi hesaplama karmaşıklığı olan bir problem türü olarak tanımlanmıştır. Problemin çözümünde kullanılan başlıca yöntemler arasında dal-sınır algoritmaları, sezgisel algoritmalar ve metasezgisel yöntemler yer almaktadır. Başlangıç çözümlerinin bulunması ve çözüm uzayının sınırlandırılması yöntemleri problemin optimal veya optimale yakın çözülmesinde büyük önem taşımakta olup iyi başlangıç çözümlerinin bulunması ve aranacak çözüm uzayını iyi bir şekilde sınırlayan yöntemler üzerinde çalışma yapılabilecektir. Ayrıca, başlangıç çözümü bulunmuş ve çözüm uzayı sınırlandırılmış problemin çözümünde özellikle genetik algoritma, benzetilmiş tavlama, tabu arama gibi metasezgisel arama yöntemleri kullanılarak problemin çözülmesi üzerinde çalışmalar yapılması mümkün bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- AHUJA, R. K., MAGNANTI, T. L., ORLIN, J. B., 1993. Network Flows: Theory, Algorithm, Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- BAAR T., BRUCKER, P., KNUST, S., 1997. Tabu-search algorithms for the resource-constrained project scheduling problem. Working Paper, Universitat Osnabruck.
- BAPTISTELLA, L. F. B., OLLERO, A., 1980. Fuzzy Methodologies for Interactive Multicriteria Optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 10: 355-365.
- BOULEIMEN K., LECOCQ, H., 1998. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. Technical Report, Service de Robotique et Automatisation, Universit de Liege.
- BONNAL, P., GOURC, D., LACOSTE, G. 2004. Where Do We Stand with Fuzzy Project Scheduling. Journal of Construction Management And Engineering, 130: 114-123.
- BRUCKER, P., DREXEL, A., MÖHRING, R., NEUMANN, K., PESCH, E., 1999. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. European Journal of Operational Research, 112: 3-41.
- CHAKRABORTY, T.K., 1994. A Class of Single Sampling Inspection Plans Based on Probabilistic Programming Problem. Fuzzy Sets and Systems, 63: 35-42.
- CHUNAS S., KAMBUROWSKI, J., 1981. The Use of Fuzzy Variables in PERT. Fuzzy Sets and Systems, 1: 11-19.
- DAVIS, E.W., 1983. Project Management: Techniques, Applications and Managerial Issues. Industrial Engineering & Management Press.
- DEMEULEMEESTER, E., VANHOUCKE, M., HERROELEN, W., 2003. RanGen: A random generator for activity-on-the-node networks. Journal of Scheduling 6: 17-38.
- EVANS, G.W., 1989. Applications of fuzzy set methodologies in IE. Oxford Press.
- FORTEMPS, P., ROUBENS, M., 1996. Ranking and defuzzification methods based on area compensation. Fuzzy Sets and Systems 82: 319-330.

- GEUNES, J., O'BRIEN, W.J., 2001. Resource Constrained Project Scheduling - Past Work and New Directions. Research Report 2001-6, Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida.
- HAPKE, M., JASZKIEWICZ, A., SLOWINSKI, R., 2000. Pareto Simulated Annealing For Fuzzy Multi-Objective Combinatorial Optimization. *Journal Of Heuristics*, 6: 329-345.
- HARTMANN, S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logistics*.
- HERROELEN, W., LEUS, R., 2005. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, 289-306.
- JANKO, W.H., 1990. Progress in fuzzy sets and systems. Kluwer Academic Publishers.
- KACPRZYK, J., 1993. Optimization models using fuzzy sets & possibility theory. Academic Press.
- KELLEY, J.E. The critical path method: Resource planning and scheduling, in: J.F. Muth, G.L. Thompson (Eds.),
- KIM, K. W., YUN, Y., YOON, J., GEN, M., YAMAZAKI, G., 2005. Hybrid Genetic Algorithm With Adaptive Search Abilities For Resource-Constrained Multiple Project Scheduling. *Computers In Industry*, 56: 143-160.
- KLIR, G.J., FOLGER T.A., 1998. Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. Kluwer Academic Publications.
- KOLISCH, R., DREXL, A., 1997. Local search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. *IIE Transactions*, 29: 987-999.
- KORVIN, A.DE, KLEYLE, R., 2000. A fuzzy set approach to resource procurement for multi-phase projects subject to flexible budgetary constraints. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 9: 225-233.
- KUCHTA, D., 2001. Use of fuzzy numbers in project risk (criticality) assessment. *International Journal of Project Management*, 19: 305-310.
- LAI, Y.J., HWANG, C.L., 1992. Fuzzy Mathematical Programming Methods and Applications. Springer Verlag, Heidelberg.
- LESTER A., 1991. Project Planning and Control. Butterworth-Heinmann.

- LIBERATORE, M. J., 2002. Project Schedule Uncertainty Analysis Using Fuzzy Logic. *Project Management Journal*, Dec.2002: 15-22.
- LILIEN, G., 1987. MS/OR. A mid-life Crisis. *Interfaces*, 17: 53-59.
- LIU, S.-T., 2003. Fuzzy Activity Times in Critical Path and Project Crashing Problems. *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 34: 161-172.
- LOWEN R., ROBINS, M., 1993. *Fuzzy Logic*. Kluwer Academic Publishers.
- MIKA M., WALIGORA, G., WEGLARZ, J., 2008. Tabu Search For Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem With Schedule-Dependent Setup Times. *European Journal Of Operational Research*, 187:1238-1250.
- MINGOZZI, A., MANIEZZO, V., RICCIARDELLI, S., BIANCO, L., 1998. An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling based on a new mathematical formulation. *Management Science*, 44: 714-729.
- MODER J.J., PHILLIPS C.R., DAVIS E.W., 1983. *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*. Van Nostrad Reinhold.
- OBERGUGGENBERGER, M., FETZ, T., JAGER, J., KÖLL, D., KRENN, G., LESSMANN, H., STARK, R.F., 1999. Fuzzy models in Geotechnical Engineering and Construction Management. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 14: 93-106.
- ÖZDAMAR, L., ALANYA, E., 2000. Uncertainty modelling in software development projects (with case study). *Annals of Operations Research* 102: 157–178.
- ÖZDAMAR, L., ULUSOY, G., 1995. A survey on the resource-constrained project scheduling problem. *IIE Transactions*, 27: 574-586.
- ÖZSU, M.T., 1986. *Proje Planlama ve Denetim Teknikleri*. Türkiye Bilişim Derneği Yayınları.
- PATTERSON, J.H., 1984. A comparison of exact procedures for solving the multiple constrained resource project scheduling problem. *Management Science* 30: 854–867.
- PATTERSON, J.H., SLOWINSKI, R., TALBOT, F.B., WEFLGLARZ, J., 1990. Computational experience with a backtracking algorithm for solving a

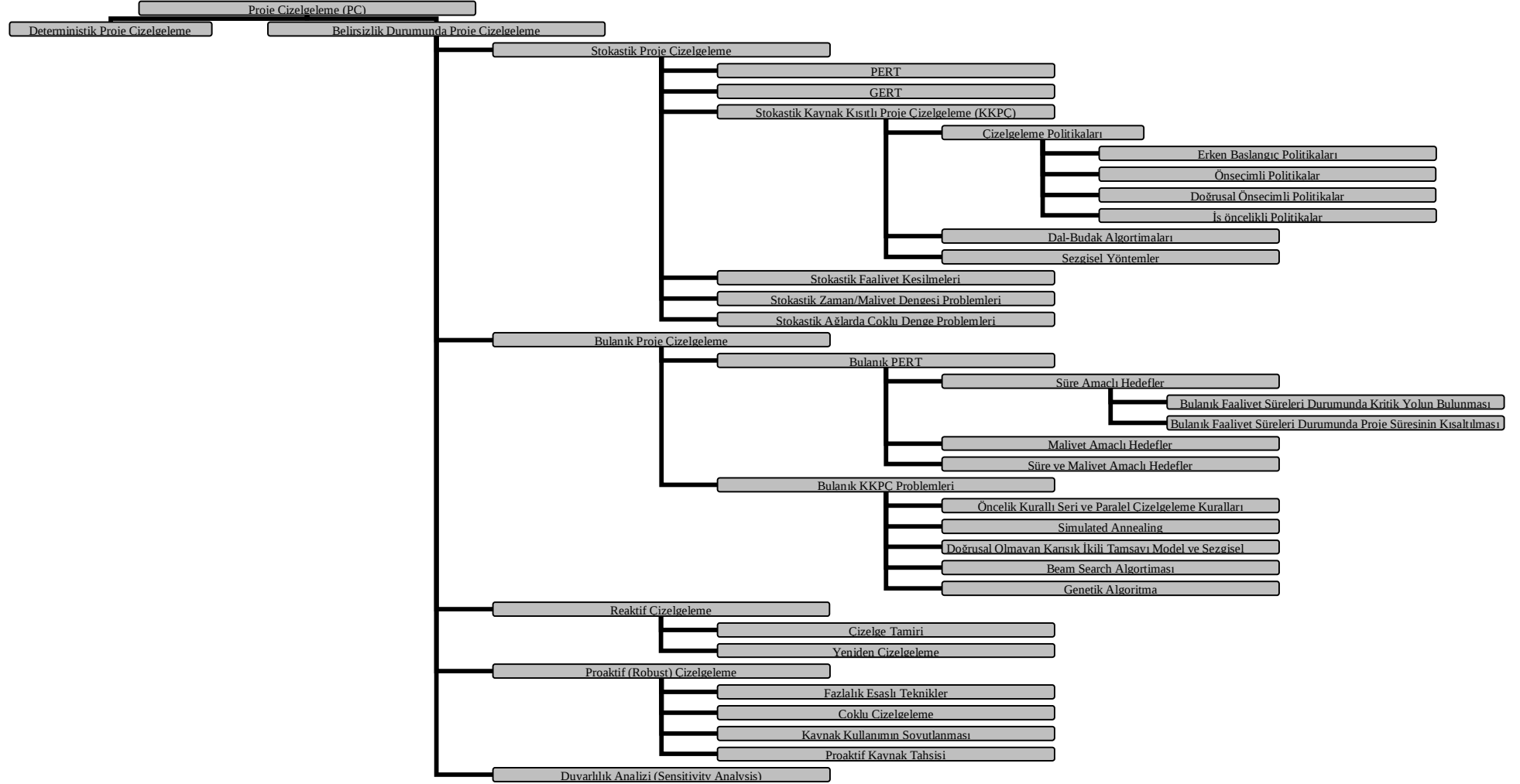
- general class of resource constrained scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 90: 68-79.
- RUBIN, P.A., NARASIHMAN, R., 1984. Fuzzy Goal Programming with Nested Priorities. *Fuzzy Sets and Systems*, 42: 115-129.
- SAKAWA, M., NISHIZAKI, I., VEMURA Y., 2002. A decentralized two-level transportation problem in a housing material manufacturer: Interactive fuzzy programming approach. *European Journal of Operational Research*, 141: 167-185.
- SHIPLEY, M.F., KORVIN, A. DE, KHURSHEED, O., 1997. BIFPET methodology versus PERT in project management: fuzzy probability instead of the beta distribution, *Journal of Engineering and Technology Management*, 14: 49-65.
- STINSON, J.P., DAVIS, E.W., KHUMAWALA, B.M., 1978. Multiple resource-constrained scheduling using branch and bound. *AIIE Transactions*, 10: 252-259.
- TAVARES, L.V., 2002. A review of the contribution of Operations Research to Project Management. *European Journal of Operational Research*, 136: 1-18.
- TERANO, T., 1992. *Fuzzy systems theory and its applications*. Academic Press.
- WANG, J., 2002. A fuzzy project scheduling approach to minimize risk for product development. *Fuzzy Sets and Systems*, 127: 99-116.
- WANG, J., 2004. A Fuzzy Robust Project Scheduling For Product Development Projects. *European Journal Of Operational Research*, 152: 180-194.
- YAGER, R. R., 1981. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval. *Information Science*, 24: 143-161.
- YANG, K.K., TALBOT, F.B., PATTERSON, J.H., 1992. Scheduling a Project to maximize its net present value: An integer programming approach, *European Journal of Operational Research*, 64, 188-198.
- ZENELY, M., 1986. Optimal System Design with Multiple Criteria. *Engineering Cost and Production Economics*, 10: 89-94.
- ZHENG, D. X. M., NG, S. T., 2005. Stochastic Time Cost Optimization Model Incorporating Fuzzy Sets Theory And Nonreplaceable Front. *Journal Of Construction Management And Engineering*, 131: 176-186.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılı Adana doğumlu. İlk ve orta eğitimini Adana’da tamamladı. 1999 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Bilkent Üniversitesi’nde İşletme Yüksek Lisans Programı’nı 2001 yılında tamamladı. Aynı yıl başladığı Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda doktora programına devam etmektedir.

EKLER

EK-1. PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ TAKSONOMİSİ



EK 2. MATEMATİKSEL MODEL KODU

Sets

i faaliyetler / 1*10 /

j kaynaklar / 1*2 /

t hafta /1*25/ ;

Alias (i,k), (t,u);

Scalar hdf /20/;

Parameters

a(t) proje gecikme cezası ve erken bitirme primi

/

1 1

2 2

3 3

4 4

5 5

6 6

7 7

8 8

9 9

10 10

11 11

12 12

13 13

14 14

15 15

16 16

17 17

18 18

19 19

20 20

21 21

22 22

23 23

24 24

25 25

/

d(i) faaliyet i'nin süresi

/

1 6

2 12

3	5
4	8
5	4
6	4
7	3
8	3
9	4
10	5
/	

rsclim(j) kaynak j'nin kullanılabilir miktarı
/ 1 28
2 36 / ;

Table
req(i,j) faaliyet i'nin yurutulmesi için gerekli kaynak j miktarı

	1	2
1	3	0
2	5	3
3	4	2
4	4	2
5	5	0
6	4	2
7	4	3
8	0	4
9	2	1
10	4	0;

Table
c(t,j) kaynak j'nin hafta t'de kullanım maliyeti

	1	2
1	1	3
2	1	3
3	1	3
4	1	3
5	1	2
6	1	2
7	1	2
8	1	3
9	1	3
10	1	3
11	2	3
12	2	4
13	2	4
14	2	4
15	2	4

```

16    2    4
17    2    3
18    2    3
19    2    3
20    2    3
21    1    2
22    1    2
23    1    2
24    1    2
25    1    2
;

```

Table

prec(i,i) oncelik matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

;

Variables

z amac fonksiyonu

$X(i,j,t)$ faaliyet i'nin t zamaninda kullandigi kaynak j miktarı

$Sb(i,t)$ faaliyet baslangic zamani degiskeni

$Eb(i,t)$ faaliyet bitis zamani degiskeni

$Ab(i,t)$ faaliyet devam zamani degiskeni ;

Free Variables z;

Binary variables Sb, Eb, Ab ;

Positive Variables X;

Equations

cost amac fonksiyonu

$rlim(j,t)$ kaynak kapasitesi kisitleri

$rusage(i,j,t)$ kaynak kullanim kisitlari

$onclk(i,k,t)$ oncelik kisitlari

$sure1(i,t)$ faaliyet sureleri kisitlari

sure2(i) faaliyet sureleri kisitlari
sure3(i,t,u) faaliyet sureleri kisitlari

dgr1(i) dogruluk kisitlari
dgr2(i) dogruluk kisitlari
dgr3(i,t) dogruluk kisitlari
dgr4(i,t) dogruluk kisitlari;

*Amac Fonksiyonu

cost.. z =e= sum((i,j,t), c(t,j)*X(i,j,t)) + sum(t, a(t)*(ord(t)-hdf)*Eb("10",t));

*Kaynak Kapasitesi Kisitlari;

rlim(j,t).. sum(i, X(i,j,t)) =l= rsclim(j) ;

*Kaynak Kullanim Kisitlari;

rusage(i,j,t).. X(i,j,t) =e= req(i,j)*Ab(i,t) ;

*Oncelik Kisitlari;

onclk(i,k,t).. sum(u\$(ord(u) ge ord(t)+1), Sb(k,u)) =g= prec(i,k)*Eb(i,t);

*Faaliyet Suresi Kisitlari;

sure1(i,t)\$((ord(t)+d(i) le 10)).. Eb(i,t+d(i)) =e= Sb(i,t);

sure2(i).. sum(t,Ab(i,t)) =e= d(i)+1;

sure3(i,t,u)\$((ord(u) ge ord(t)) and (ord(u) le ord(t)+d(i)-1)).. Ab(i,u) =g= Sb(i,t);

*Dogruluk Kisitlari;

dgr1(i).. sum(t, Sb(i,t)) =e= 1;

dgr2(i).. sum(t, Eb(i,t)) =e= 1;

dgr3(i,t).. Ab(i,t) =g= Sb(i,t);

dgr4(i,t).. Ab(i,t) =g= Eb(i,t);

model remzi /all/ ;

remzi.workspace = 1250 ;

remzi.iterlim=1000000;

remzi.reslim=1200;

remzi.optca=0.00000;

remzi.optcr=0.00000;

solve remzi using mip minimizing z ;

display Sb.l, Eb.l, Ab.l, X.l;

EK 3. MATEMATİKSEL MODEL SONUÇLARI

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 1
General Algebraic Modeling System
Compilation

```
1
2 Sets
3   i faaliyetler / 1*10 /
4   j kaynaklar / 1*2 /
5   t hafta /1*25/ ;
6
7 Alias (i,k), (t,u);
8
9 Scalar hdf /20/;
10
11 Parameters
12
13 a(t) proje gecikme cezasi ve erken bitirme primi
14 /
15 1      1
16 2      2
17 3      3
18 4      4
19 5      5
20 6      6
21 7      7
22 8      8
23 9      9
24 10     10
25 11     11
26 12     12
27 13     13
28 14     14
29 15     15
30 16     16
31 17     17
32 18     18
33 19     19
34 20     20
35 21     21
36 22     22
37 23     23
38 24     24
```

```

39 25      25
40 /
41
42 d(i) faaliyet i'nin suresi
43 /
44 1        6
45 2        12
46 3        5
47 4        8
48 5        4
49 6        4
50 7        3
51 8        3
52 9        4
53 10       5
54 /
55

```

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 2
General Algebraic Modeling System
Compilation

```

56 rsclim(j) kaynak j'nin kullanilabilir miktarı
57 / 1 28
58 2 36 / ;
59
60 Table
61 req(i,j) faaliyet i'nin yurutulmesi icin gerekli kaynak j miktarı
62      1      2
63 1      3      0
64 2      5      3
65 3      4      2
66 4      4      2
67 5      5      0
68 6      4      2
69 7      4      3
70 8      0      4
71 9      2      1
72 10     4      0;
73
74 Table
75 c(t,j) kaynak j'nin hafta t'de kullanim maliyeti
76      1      2
77 1      1      3
78 2      1      3

```

```

79 3      1      3
80 4      1      3
81 5      1      2
82 6      1      2
83 7      1      2
84 8      1      3
85 9      1      3
86 10     1      3
87 11     2      3
88 12     2      4
89 13     2      4
90 14     2      4
91 15     2      4
92 16     2      4
93 17     2      3
94 18     2      3
95 19     2      3
96 20     2      3
97 21     1      2
98 22     1      2
99 23     1      2
100 24     1      2
101 25     1      2

```

```
102 ;
```

```
103
```

```
104 Table
```

```
105 prec(i,i) oncelik matrisi
```

```

106      1      2      3      4      5      6      7
      8      9     10
107 1      0      0      0      0      0      1      0
      0      0      0
108 2      0      0      0      0      0      0      1

```

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 3
General Algebraic Modeling System
Compilation

```

      0      0      0
109 3      0      0      0      0      0      0      0
      1      0      0
110 4      0      0      0      0      0      0      0
      0      1      0
111 5      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      1
112 6      0      0      0      0      0      0      0

```

```

113 7      0      0      0      0      0      0      0      0
114 8      0      0      0      0      0      0      0      0
115 9      0      0      0      0      0      0      0      0
116 10     0      0      0      0      0      0      0      0
117 ;
118
119 Variables
120 z      amac fonksiyonu
121 X(i,j,t) faaliyet i'nin t zamaninda kullandigi kaynak j miktarı
122 Sb(i,t) faaliyet baslangic zamani degiskeni
123 Eb(i,t) faaliyet bitis zamani degiskeni
124 Ab(i,t) faaliyet devam zamani degiskeni ;
125
126
127 Free Variables z;
128 Binary variables Sb, Eb, Ab ;
129 Positive Variables X;
130
131 Equations
132 cost      amac fonksiyonu
133 rlim(j,t) kaynak kapasitesi kisitleri
134 rusage(i,j,t) kaynak kullanim kisitlari
135 onclk(i,k,t) oncelik kisitlari
136
137 sure1(i,t) faaliyet sureleri kisitlari
138 sure2(i)   faaliyet sureleri kisitlari
139 sure3(i,t,u) faaliyet sureleri kisitlari
140
141 dgr1(i)    dogruluk kisitlari
142 dgr2(i)    dogruluk kisitlari
143 dgr3(i,t)  dogruluk kisitlari
144 dgr4(i,t)  dogruluk kisitlari;
145
146 *Amac Fonksiyonu
147 cost.. z =e= sum((i,j,t), c(t,j)*X(i,j,t)) + sum(t, a(t)*(ord(t)-hdf)
148                                     *Eb("10",t));
149
149 *Kaynak Kapasitesi Kisitlari;
150 rlim(j,t)..      sum(i, X(i,j,t)) =l= rsclim(j) ;
151
152 *Kaynak Kullanim Kisitlari;

```

153 rusage(i,j,t).. X(i,j,t) =e= req(i,j)*Ab(i,t) ;

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 4
General Algebraic Modeling System
Compilation

154
155 *Oncelik Kisitlari;
156 onclk(i,k,t).. sum(u\$(ord(u) ge ord(t)+1), Sb(k,u)) =g= prec(i,k)*Eb(i,t);
157
158
159 *Faaliyet Suresi Kisitlari;
160 sure1(i,t)\$((ord(t)+d(i) le 10)).. Eb(i,t+d(i)) =e= Sb(i,t);
161
162 sure2(i).. sum(t,Ab(i,t)) =e= d(i)+1;
163
164 sure3(i,t,u)\$((ord(u) ge ord(t)) and (ord(u) le ord(t)+d(i)-1)).. Ab(i,u)
=g= Sb(i,t);
165
166
167 *Dogruluk Kisitlari;
168
169 dgr1(i).. sum(t, Sb(i,t)) =e= 1;
170
171 dgr2(i).. sum(t, Eb(i,t)) =e= 1;
172
173 dgr3(i,t).. Ab(i,t) =g= Sb(i,t);
174
175 dgr4(i,t).. Ab(i,t) =g= Eb(i,t);
176
177
178 model remzi /all/ ;
179 remzi.workspace = 1250 ;
180 remzi.iterlim=1000000;
181 remzi.reslim=1200;
182 remzi.optca=0.00000;
183 remzi.optcr=0.00000;
184 solve remzi using mip minimizing z ;
185 display Sb.l, Eb.l, Ab.l, X.l;

COMPILATION TIME = 0.000 SECONDS 0.7 Mb WIN-19-114

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 11 SINGLE EQUATIONS 4731
 BLOCKS OF VARIABLES 5 SINGLE VARIABLES 1251
 NON ZERO ELEMENTS 36290 DISCRETE VARIABLES 750

GENERATION TIME = 0.062 SECONDS 3.0 Mb WIN-19-114

EXECUTION TIME = 0.062 SECONDS 3.0 Mb WIN-19-114

SOLVE SUMMARY

MODEL remzi OBJECTIVE z
 TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER OSL2 FROM LINE 184

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 382.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.367 1200.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 956 1000000

OSL Version 2 Mar 1, 2000 WIN.O2.SE 19.1 005.038.038.WAT (7A010)

Work space requested by user -- 1250.00 Mb
 Work space requested by solver -- 10.48 Mb

---- 185 VARIABLE Sb.L faaliyet baslangic zamani degiskeni

	5	7	21	24	25
1				1.000	
2			1.000		
3			1.000		
4			1.000		
5		1.000			
6				1.000	
7				1.000	
8				1.000	
9				1.000	
10	1.000				

---- 185 VARIABLE Eb.L faaliyet bitis zamani degiskeni

	1	10	21	22	24	25
1					1.000	
2				1.000		
3					1.000	
4			1.000			
5	1.000					
6						1.000
7				1.000		
8					1.000	
9				1.000		
10		1.000				

---- 185 VARIABLE Ab.L faaliyet devam zamani degiskeni

	1	3	5	6	7	8
1	1.000		1.000		1.000	
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3			1.000			
4	1.000		1.000	1.000	1.000	
5	1.000				1.000	1.000

6		1.000	1.000	1.000	
7		1.000			
8		1.000	1.000	1.000	
9			1.000	1.000	
10		1.000	1.000	1.000	1.000

+	9	10	21	22	23	24
---	---	----	----	----	----	----

1		1.000		1.000		1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3			1.000	1.000	1.000	1.000
4			1.000	1.000	1.000	1.000
5	1.000	1.000				
6					1.000	

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 139
 General Algebraic Modeling System
 Execution

185 VARIABLE Ab.L faaliyet devam zamani degiskeni

+	9	10	21	22	23	24
---	---	----	----	----	----	----

7			1.000		1.000	
9			1.000		1.000	
10	1.000	1.000				

+	25
---	----

1	1.000
2	1.000
3	1.000
4	1.000
6	1.000
7	1.000
8	1.000
9	1.000

---- 185 VARIABLE X.L faaliyet i'nin t zamaninda kullandigi kaynak j
 miktari

	1	3	5	6	7	8
1.1	3.000		3.000		3.000	
2.1	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000

2.2	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
3.1			4.000			
3.2			2.000			
4.1	4.000		4.000	4.000	4.000	
4.2	2.000		2.000	2.000	2.000	
5.1	5.000			5.000	5.000	
6.1		4.000	4.000	4.000		
6.2		2.000	2.000	2.000		
7.1		4.000				
7.2		3.000				
8.2		4.000	4.000	4.000		
9.1			2.000	2.000		
9.2			1.000	1.000		
10.1		4.000	4.000	4.000	4.000	

+	9	10	21	22	23	24
---	---	----	----	----	----	----

1.1		3.000		3.000		3.000
2.1	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
2.2	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
3.1			4.000	4.000	4.000	4.000
3.2			2.000	2.000	2.000	2.000
4.1			4.000	4.000	4.000	4.000
4.2			2.000	2.000	2.000	2.000
5.1	5.000	5.000				
6.1					4.000	
6.2					2.000	
7.1			4.000		4.000	

GAMS 2.50D Windows NT/95/98 10/20/08 23:14:46 PAGE 140
General Algebraic Modeling System
Execution

185 VARIABLE X.L faaliyet i'nin t zamanında kullandığı kaynak j miktarı

+	9	10	21	22	23	24
7.2				3.000		3.000
9.1				2.000		2.000
9.2				1.000		1.000
10.1	4.000	4.000				
+	25					

1 .1	3.000
2 .1	5.000
2 .2	3.000
3 .1	4.000
3 .2	2.000
4 .1	4.000
4 .2	2.000
6 .1	4.000
6 .2	2.000
7 .1	4.000
7 .2	3.000
8 .2	4.000
9 .1	2.000
9 .2	1.000

EXECUTION TIME = 0.218 SECONDS 1.4 Mb WIN-19-114

***** FILE SUMMARY

INPUT C:\WINDOWS\GAMSDIR\TEZMDL1.GMS
OUTPUT C:\WINDOWS\GAMSDIR\TEZMDL1.LST

EK 4. BAŞLANGIÇ ÇÖZÜMÜ BELİRLENMİŞ MATEMATİKSEL MODEL

Sets

i activities / 1*50 /

j resources / 1*4 /

t weeks /1*25/ ;

Alias (i,k), (t,u);

Scalar fs /50/;

Scalar tgun /25/;

Scalar hdf /20/;

Parameters

d(i) duration of activity i

/

1	6
2	12
3	5
4	8
5	4
6	4
7	3
8	3
9	4
10	5
11	9
12	4
13	2
14	2
15	2
16	4
17	5
18	5
19	6
20	7
21	5
22	5
23	2
24	1
25	5
26	6
27	7
28	1

29	2
30	1
31	1
32	1
33	8
34	4
35	6
36	3
37	4
38	2
39	3
40	1
41	4
42	2
43	2
44	4
45	5
46	5
47	4
48	7
49	8
50	3

rsclim(j) resource j availability
/ 1 98
2 96
3 82
4 85 / ;

Table
c(t,j) cost of resource j at time t

	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	1	2	3	4
3	1	2	3	4
4	1	2	3	4
5	1	2	3	4
6	1	2	3	4
7	1	2	3	4
8	1	2	3	4
9	1	2	3	4
10	1	2	3	4
11	1	2	3	4
12	1	2	3	4
13	1	2	3	4
14	2	2	3	4

15	2	2	3	4
16	2	2	3	4
17	2	2	3	4
18	2	2	3	4
19	2	2	3	4
20	2	2	3	4
21	2	2	3	4
22	2	2	3	4
23	2	2	3	4
24	2	2	3	4
25	2	2	3	4
;				

Table
req(i,j) activity i requires number of resource j

	1	2	3	4
1	3	0	0	0
2	5	3	3	2
3	4	2	4	2
4	4	2	2	2
5	5	0	0	0
6	4	2	2	2
7	4	3	3	2
8	0	4	2	0
9	2	1	5	3
10	4	0	0	0
11	5	0	0	0
12	3	0	0	1
13	3	2	0	1
14	3	0	3	2
15	4	2	2	2
16	5	2	2	0
17	5	2	4	2
18	4	2	4	3
19	5	2	3	4
20	4	0	0	0
21	5	1	0	0
22	0	1	0	0
23	5	1	0	0
24	2	0	0	0
25	2	4	0	0
26	0	2	0	0
27	0	2	0	0
28	2	2	0	0
29	4	0	0	0
30	4	0	0	0

31	5	3	0	0
32	0	2	0	0
33	4	2	0	0
34	4	0	0	0
35	2	0	0	0
36	0	0	0	0
37	0	0	0	0
38	1	0	0	0
39	0	4	0	0
40	4	3	0	0
41	0	0	0	0
42	3	3	0	0
43	3	2	0	0
44	2	2	0	0
45	2	0	0	0
46	5	0	0	0
47	2	2	0	0
48	2	2	0	0
49	4	2	0	0
50	4	0	0	0
;				

Table
prec(i,i) if activity i precedes activity j equals 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50			
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
;													

Table
Sini(i,t) initial values of S

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
;													

Table

Aini(i,t) initial values of A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

;

Variables

z total cost

X(j,t) number of resource j used at day t

Sb(i,t) equals 1 if activity i starts at day t

Ab(i,t) equals 1 if activity i is continuing at day t ;

Free Variables z,X ;

Binary variables Sb, Ab ;

Sb.lo(i,t)= Sini(i,t);

Ab.l(i,t)= Aini(i,t);

display Sb.l, Ab.l;

Equations

cost define objective function

rlim(j,t) number of resource 1 used at t cannot exceed the limit

rusage(j,t) resource usage constraint

onclk(i,k,t) precedence constraints

sure5(i,t) faaliyet sureleri kisitlari

dgr1(i) dogruluk kisitlari

dgr3(i,t) dogruluk kisitlari

sure2(i) faaliyet sureleri kisitlari

sure3(i,t,u) faaliyet sureleri kisitlari ;

*Amac Fonksiyonu

cost.. z =e= sum((i,j,t), c(t,j)*X(j,t))+sum(t, (ord(t)+3-hdf)*Sb("50",t))*5;

*RESOURCE LIMIT constraints;

rlim(j,t).. X(j,t) =l= rsclim(j) ;

*RESOURCE USAGE constraints;

rusage(j,t).. X(j,t) =e= sum(i, req(i,j)*Ab(i,t)) ;

```

*precedence constraints;
onclk(i,k,t).. sum(u$(ord(u) ge ord(t)+0+D(i)), Sb(k,u)) =g= prec(i,k)*Sb(i,t);

*!DURATION CONSTRAINTS;
sure5(i,t)$((ord(t) ge tgun+1-d(i))).. Sb(i,t) =e= 0;

*!BINARY CONVERSION CONSTRAINTS;
dgr1(i).. sum(t, Sb(i,t)) =e= 1;

*!INTEGRITY Constraints;
dgr3(i,t).. Ab(i,t) =g= Sb(i,t);
sure2(i).. sum(t,Ab(i,t)) =e= d(i)+1;
sure3(i,t,u)$((ord(u) ge ord(t)) and (ord(u) le ord(t)+d(i))).. Ab(i,u) =g= Sb(i,t);

model remzi /all/ ;
remzi.workspace = 1250 ;
remzi.iterlim=100000;
remzi.reslim=60;
remzi.optca=0.00000;
remzi.optcr=0.00000;
solve remzi using mip minimizing z ;

```

EK 5. ÇÖZÜM UZAYI SINIRLANDIRILMIŞ MATEMATİKSEL MODEL

Sets

i activities / 1*100 /

j resources / 1*2 /

t weeks /1*25/ ;

Alias (i,k), (t,u);

Scalar fs /50/;

Scalar tgun /25/;

Scalar hdf /20/;

Parameters

d(i) duration of activity i

/

1 6

2 2

3 5

4 8

5 4

6 4

7 3

8 3

9 4

10 5

11 9

12 4

13 2

14 2

15 2

16 4

17 5

18 5

19 6

20 7

21 5

22 5

23 2

24 1

25 5

26 6

27 7

28 1

29 2

30	1
31	1
32	1
33	8
34	4
35	6
36	3
37	4
38	2
39	3
40	1
41	4
42	2
43	2
44	4
45	5
46	5
47	4
48	7
49	8
50	3
51	4
52	6
53	2
54	5
55	8
56	4
57	4
58	3
59	3
60	4
61	5
62	9
63	4
64	2
65	2
66	2
67	4
68	5
69	5
70	6
71	7
72	5
73	5
74	2
75	1

76	5
77	6
78	7
79	2
80	2
81	1
82	3
83	1
84	8
85	4
86	6
87	3
88	4
89	2
90	3
91	1
92	4
93	2
94	2
95	4
96	5
97	5
98	4
99	7
100	8
/	

rsclim(j) resource j availability
/ 1 128
2 136 / ;

Table
c(t,j) cost of resource j at time t

	1	2
1	1	2
2	1	2
3	1	2
4	1	2
5	1	2
6	1	2
7	1	2
8	1	2
9	1	2
10	1	2
11	1	2
12	1	2

13	1	2
14	2	2
15	2	2
16	2	2
17	2	2
18	2	2
19	2	2
20	2	2
21	2	2
22	2	2
23	2	2
24	2	2
25	2	2

;

Table
req(i,j) activity i requires number of resource j

	1	2
1	3	0
2	5	3
3	4	2
4	4	2
5	5	0
6	4	2
7	4	3
8	0	4
9	2	1
10	4	0
11	5	0
12	3	0
13	3	2
14	3	0
15	4	2
16	5	2
17	5	2
18	4	2
19	5	2
20	4	0
21	5	1
22	0	1
23	5	1
24	2	0
25	2	4
26	0	2
27	0	2

28	2	2
29	4	0
30	4	0
31	5	3
32	0	2
33	4	2
34	4	0
35	2	0
36	0	0
37	0	0
38	1	0
39	0	4
40	4	3
41	0	0
42	3	3
43	3	2
44	2	2
45	2	0
46	5	0
47	2	2
48	2	2
49	4	2
50	4	0
51	4	0
52	3	0
53	5	3
54	4	2
55	4	2
56	5	0
57	4	2
58	4	3
59	0	4
60	2	1
61	4	0
62	5	0
63	3	0
64	3	2
65	3	0
66	4	2
67	5	2
68	5	2
69	4	2
70	5	2
71	4	0
72	5	1
73	0	1

```

74    5    1
75    2    0
76    2    4
77    0    2
78    0    2
79    2    2
80    4    0
81    4    0
82    5    3
83    0    2
84    4    2
85    4    0
86    2    0
87    0    0
88    0    0
89    1    0
90    0    4
91    4    3
92    0    0
93    3    3
94    3    2
95    2    2
96    2    0
97    5    0
98    2    2
99    2    2
100   4    2
;

```

Table

prec(i,i) if activity i precedes activity j equals 1

```

    1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46
47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69
70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92
93 94 95 96 97 98 99 100
1  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
;

```

Table

Sini(i,t) initial values of S

```

    1    2    3    4    5    6    7    8    9    10    11    12    13
14    15    16    17    18    19    20    21    22    23    24    25

```

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

;

Table
Aini(i,t) initial values of A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

;

Table
Sup(i,t) upper bound for values of S

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0		
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0		
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0		

;

Table
Aup(i,t) upper bound for values of A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		

;

Variables

z total cost

$X(j,t)$ number of resource j used at day t

$Sb(i,t)$ equals 1 if activity i starts at day t

$Ab(i,t)$ equals 1 if activity i is continuing at day t ;

Free Variables z, X ;

Binary variables Sb, Ab ;

$Sb.l(i,t) = Sini(i,t)$;

$Sb.up(i,t) = Sup(i,t)$;

$Ab.l(i,t) = Aini(i,t)$;

$Ab.up(i,t) = Aup(i,t)$;

Equations

cost define objective function

$rlim(j,t)$ number of resource 1 used at t cannot exceed the limit

$rusage(j,t)$ resource usage constraint

$onclk(i,k,t)$ precedence constraints

$sure5(i,t)$ faaliyet sureleri kisitlari

$dgr1(i)$ dogruluk kisitlari

$dgr3(i,t)$ dogruluk kisitlari

$sure2(i)$ faaliyet sureleri kisitlari

$sure3(i,t,u)$ faaliyet sureleri kisitlari ;

*Amac Fonksiyonu

cost.. $z = e = \sum((i,j,t), c(t,j)*X(j,t)) + \sum(t, (ord(t)+3-hdf)*Sb("50",t))*5$;

*RESOURCE LIMIT constraints;

$rlim(j,t) .. X(j,t) = l = rsclim(j)$;

*RESOURCE USAGE constraints;

$rusage(j,t) .. X(j,t) = e = \sum(i, req(i,j)*Ab(i,t))$;

*precedence constraints;

$onclk(i,k,t) .. \sum(u$(ord(u) ge ord(t)+1+D(i)), Sb(k,u)) = g = prec(i,k)*Sb(i,t)$;

*!DURATION CONSTRAINTS;

$sure5(i,t)$(ord(t) ge tgun+1-d(i)) .. Sb(i,t) = e = 0$;

*!BINARY CONVERSION CONSTRAINTS;

$dgr1(i) .. \sum(t, Sb(i,t)) = e = 1$;

*!INTEGRITY Constraints;

$dgr3(i,t) .. Ab(i,t) = g = Sb(i,t)$;

```

sure2(i)..      sum(t,Ab(i,t)) =e= d(i)+1;
sure3(i,t,u)$((ord(u) ge ord(t)) and (ord(u) le ord(t)+d(i))).. Ab(i,u) =g= Sb(i,t);

```

```

model remzi /all/ ;
remzi.workspace = 1250 ;
remzi.iterlim=100000;
remzi.reslim=120;
remzi.optca=0.00000;
remzi.optcr=0.00000;
solve remzi using mip minimizing z ;

```