




## Scheduling multi-objective enterprise resource planning implementation projects under human resource constraints and uncertainty

Kemal Subulan 

Department of Industrial Engineering, Dokuz Eylül University, Izmir, 35397, Turkey

### Highlights:

- Multi-objective, fully uncertain human resource constrained ERP implementation projects
- An interval programming based solution approach
- Project manager's risk appetite and compromise solutions

### Keywords:

- Resource investment project scheduling
- Enterprise resource planning
- Human resources
- Interval programming
- Risk appetite

### Article Info:

Research Article  
Received: 30.01.2019  
Accepted: 03.02.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.519652

### Correspondence:

Author: Kemal Subulan  
e-mail:  
kemal.subulan@deu.edu.tr  
phone: +90 232 301 7624

### Graphical/Tabular Abstract

In recent years, there has been a growing interest in ERP implementation project scheduling by considering human resource constraints and expert support. In most of the real-life settings, ERP project scheduling problems have multiple objectives and are surrounded by full of uncertainties. Therefore, compromise solutions should be found for the project schedule and human resource capacities according to the project manager's risk appetite.

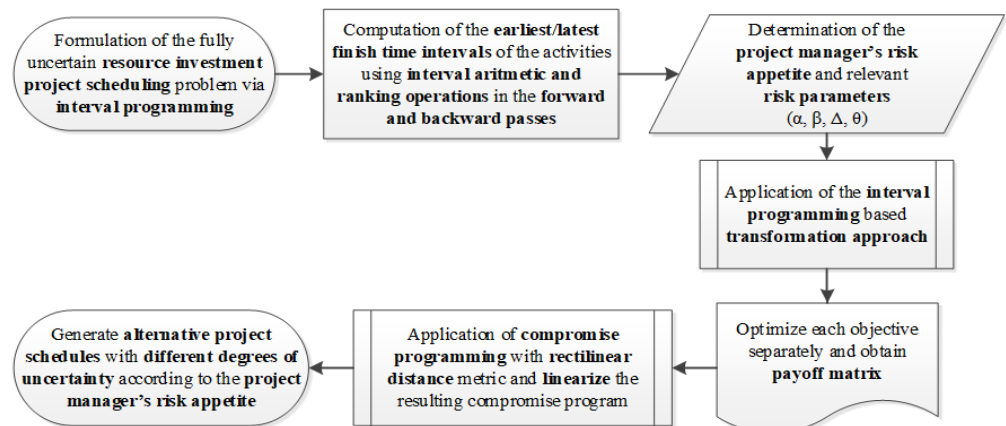


Figure A. The proposed approach for multi-objective fully uncertain ERP implementation projects

**Purpose:** The aim of this study is to model and solve a multi-objective fully uncertain ERP implementation project scheduling problem under human resource constraints. In the modelling phase, it is also targeted to consider the efficiency and reliability factors of different types of human resources. In the solution phase, it is aimed to generate alternative project schedules and human resource capacity levels which are appropriate for the project manager's risk appetite.

### Theory and Methods:

In the modelling phase, a basic discrete-time binary integer mathematical formulation of the resource-constrained project scheduling (RCPS) problem which was first presented by Pritsker et al. [10] is extended by considering all of the model parameters and decision variables as interval numbers. Moreover, as in the resource investment project scheduling (RIPS) problem [5], the resource capacities are defined as interval-valued decision variables. Afterwards, an interval programming based transformation approach of Subulan [9] for the classical fully uncertain resource-constrained project scheduling problem is also extended to solve the multi-objective fully uncertain resource investment project scheduling problem. Finally, compromise programming technique is applied to generate balanced project schedules.

### Results:

Crisp and risk-free project schedules with relatively high project makespan and human resource capacities are obtained for the risk-averse project managers. For risk seekers, completion times of the project activities and human resource capacities will take more imprecise values.

### Conclusion:

According to the project manager's risk appetite, the more applicable and information efficient project schedules and human resource capacity levels can be generated by the proposed approach.



## Çok amaçlı kurumsal kaynak planlaması uyarlama projelerinin insan kaynağı kısıtı ve belirsizlik altında çizelgelenmesi

Kemal Subulan\*<sup>ID</sup>

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 35397 Buca, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok amaçlı ve tamamen belirsiz, insan kaynağı kısıtlı KKP uyarlama projeleri
- Aralık programlama temelli bir çözüm yaklaşımı
- Proje yöneticisinin risk iştahı ve uzlaşık çözümler

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.01.2019

Kabul: 03.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.519652

#### Anahtar Kelimeler:

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme, kurumsal kaynak planlama, insan kaynakları, aralık programlama, risk iştahı

#### ÖZET

Günümüzde, bilişim teknolojilerinin hızla gelişmesine paralel olarak, kurumsal kaynak planlama (KKP) yazılım ve uyarlama projeleri giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Bu bağlamda proje yöneticileri, planlama ve proje çizelgeleme safhalarında, belirsizlik içeren birçok durum ile karşı karşıya kalabilmektedir. Bu çalışmada, proje organizasyon şeması altında farklı görev/sorumluluklara sahip insan kaynağı kısıtı ve belirsizlik altında, çok amaçlı bir KKP uyarlama projesinin çizelgelenmesi hedeflenmektedir. Önerilen aralık programlama temelli çözüm yaklaşımı ile hem proje parametrelerine/girdilerine ait belirsizlikler, hem de karar değişkeni olarak tanımlanan çizelgeleme çıktılarına (aktivitelerin başlama ve/veya bitiş zamanları) ilişkin belirsizlikler ele alınabilmektedir. Bunun sonucunda, proje yöneticisinin risk iştahı doğrultusunda, birçok alternatif çizelgenin üretilmesi sağlanmıştır. Ayrıca önerilen yaklaşım ile çizelgeleme sürecinde, insan kaynağına ilişkin etkinlik ve güvenilirlik faktörleri dikkate alınabilmektedir. Son olarak, çalışma kapsamında sunulan bir uygulama çalışması ile KKP projelerinin tamamlanma zamanının en küçüklenmesinin yanı sıra, proje için ayrılan insan kaynağı kapasitesinin de en etkin şekilde kullanılması hedeflenerek, uygulanabilir uzlaşık çözümlerin üretilebileceği ortaya konulmuştur.

## Scheduling multi-objective enterprise resource planning implementation projects under human resource constraints and uncertainty

### H I G H L I G H T S

- Multi-objective and fully uncertain human resource-constrained ERP implementation projects
- An interval programming based solution approach
- Project manager's risk appetite and compromise solutions

#### Article Info

Research Article

Received: 30.01.2019

Accepted: 03.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.519652

#### Keywords:

Resource constrained project scheduling, enterprise resource planning, human resources, interval programming, risk appetite

#### ABSTRACT

Nowadays, there has been an increasing attention to enterprise resource planning (ERP) software implementation projects due to the rapid improvements in information technologies. In this context, project managers may face with several uncertainties during the project planning and scheduling phases. In this paper, scheduling of a multi-objective ERP implementation project is targeted under human resource constraints and uncertainty. Through the proposed interval programming based solution approach, uncertainties of the project parameters/inputs as well as the project schedules/outputs which represent the starting or completion times of the activities can be easily handled. Therefore, several alternative project schedules can be generated by making use of the proposed approach according to the risk appetite of the project managers. Additionally, efficiency and reliability factors of the human resources are also taken into account. Finally, computational results of a real-life application have shown that more applicable and reliable compromise solutions can be generated by the proposed approach considering both project makespan and effective utilization of the human resource capacities.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: kemal.subulan@deu.edu.tr / Tel: +90 232 301 7624

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde KKP kurulum ve uyarılma projeleri, işletmeler için süreçlerin, günlük alışkanlıkların ve farklı işletme fonksiyonlarına ait iş yapma biçimlerinin değiştiği, kapsamlı bir değişim projesi olarak karşımıza çıkmaktadır. KKP proje yönetimi, işletmelerde KKP sisteminin gerekliliğine karar verilmesinden, yazılım seçimine, kurulum ve uyarılmanın gerçekleştirilmesine, uyarlamalar sonrasında ise sürekli iyileştirme ve geliştirmelerin devam ettiği bütünsel bir süreçtir [1-3]. Bu bağlamda, KKP yazılımını satın alan işletme ve yazılım tedarikçisi, proje başlamadan önce proje ekibini, proje kapsamını, modül devreye alma süreçlerini, iletişim ve proje planlarını belirlemek durumundadır. Ayrıca, KKP tedarikçisinin yazılımı satın alacak işletme ile satış ve sözleşme öncesinde, proje planlarını hazırlaması ve modül devreye alma süreçlerini insan kaynağını dikkate alarak ortaya koyması, KKP projesinin uyarılma sürecinde her iki tarafa da büyük katkılar sağlayacaktır. KKP kurulum ve uyarılma projelerinin başarıya ulaşmasında, insan kaynağı ve uzman desteğinin katkısı yadsınamaz bir gerçektir. Söz konusu insan kaynağı, proje ekibi ve organizasyon şeması içerisinde yer alan farklı yetki, sorumluluk ve yeteneklere sahip; fonksiyonel, teknik ve eğitim danışmanlarından, KKP yazılım tedarikçisinin çözüm ortağı danışmanlarından, işletme bünyesinde çalışan teknik ve süreç danışmanlarından oluşmaktadır. Gerek KKP yazılım tedarikçisi, gerekse yazılımı satın alan işletme, minimum insan kaynağı kapasitesi ile projenin kabul edilebilir bir zamanda tamamlanmasını arzu etmektedir. Bir başka deyişle, potansiyel insan kaynağı kapasitesinin etkin ve efektif şekilde kullanımı hedeflenmektedir [4]. Bu araştırma motivasyonu ile bu çalışmada, kaynak kapasitesinin bir proje parametresi/girdisi olarak tanımlandığı klasik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (KKPÇ) probleminin aksine; KKP projesi boyunca gerekli olacak farklı türden insan kaynağı kapasiteleri, karar değişkeni olarak tanımlanmış ve bir proje çıktısı olarak çözüme yansıtılmıştır. Bilimsel yazında, kaynak kapasitelerinin değişken olarak tanımlandığı proje çizelgeleme problemi, kaynak yatırımlı proje çizelgeleme (KYPÇ) problemi olarak tanımlanmaktadır [5]. KKP projelerinde karşılaşılan diğer bir önemli husus ta, proje aktivite sürelerine ve aktivitelerin insan kaynağı gereksinimlerine ait belirsizliklerdir. KKP projelerinde aktivite süreleri, işletme ölçeğine, veri alt yapısına ve işletme süreçlerinin karmaşıklığına göre farklılık göstereceğinden, önceden net bir şekilde belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Bu sebeple, diğer proje parametreleri olan aktivitelerin en erken ve en geç başlama/bitiş zamanları da kesin ve net bir şekilde belirlenmemektedir. Benzer şekilde, proje aktivitelerinin proje ekibinde yer alan farklı türden insan kaynağına gereksinim duyacağı miktarlar, proje uygulaması başlamadan evvel net bir şekilde ortaya konamamaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri, işletme bünyesindeki proje çalışanlarının, KKP uyarılma projesi dışındaki odak işlerine de zaman ayırma ihtiyacı iken; KKP yazılım tedarikçisi tarafındaki insan kaynağının ise diğer müşteri

işletmelerin isteklerine de vakit ayırmak durumunda olmasıdır. Tüm bu sebeplerden dolayı, KKP projelerinde aktivitelerin insan kaynağı gereksinimleri ve dolayısıyla da insan kaynağı kapasiteleri de belirsizlik içermektedir. Tüm proje parametrelerinin belirsizlik içerdiği, tamamen belirsiz KYPÇ problemlerinde, proje yöneticilerine çözüm olarak tek bir deterministik çizelge sunmak olanaksızdır [6-8]. Bir başka deyişle, çözümün kendisi de belirsizlik içerebilir ve proje yöneticisinin risk iştahı doğrultusunda farklı çözümler üretilebilmektedir. Böyle bir durumda, proje çizelgesinin içereceği belirsizlik, karar vericinin riske karşı tutumu doğrultusunda değişkenlik gösterecektir [9-10]. Bu araştırma motivasyonu ile bu çalışmada, hem proje parametrelerine hem de proje çıktılarında ait belirsizlikler, aralık sayıların kullanımı ile ele alınmış olup, çözüm aşamasında problemin belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmesinde, aralık aritmetik operasyonlar, aralık sıralama ve aralık programlama tabanlı bir matematiksel programlama yaklaşımı önerilmiştir.

Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda incelenen çalışmalar, problem tipi (KKPÇ ve KYPÇ), belirsizlik türü, çok amaçlılık, proje yöneticilerinin riske karşı tutumu, belirsizlik içeren proje parametreleri ve karar değişkenleri, önerilen çözüm yaklaşımları açısından Tablo 1 yardımıyla özetlenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, belirsizlik altında KKPÇ problemlerinin modellenmesi ve çözümüne yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen, KYPÇ probleminin çözümüne yönelik gerçekleştirilen çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Diğer bir deyişle, KYPÇ problemi genellikle tüm proje parametre/girdilerinin kesinlik içerdiği varsayımı altında ele alınmıştır [27-29]. Ayrıca, KKPÇ ve KYPÇ problemleri için belirsizlik altında ortaya çıkabilecek proje riskleri veya risk durumları birçok çalışma tarafından dikkate alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında, önerilen çözüm yaklaşımı ile proje yöneticisinin farklı risk durumlarına karşı duyarlılığı dikkate alınabilmekte ve belirsizlik düzeyleri birbirinden farklı çeşitli alternatif proje çizelgeleri üretilebilmektedir. Ayrıca, literatürdeki mevcut çalışmaların birçoğu, sadece projenin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi hedefine odaklanmaktadır. Bu çalışmada ise proje tamamlanma süresinin en küçüklenmesinin yanı sıra; insan kaynağı kapasitesinin etkin şekilde kullanımı da hedeflenmektedir. Ayrıca, Tablo 1’de sunulan birçok çalışmada, belirsizlik içeren birçok proje parametresine bulunmasına rağmen, deterministik proje çizelgeleri üretilmiştir. Bu çalışmada, önerilen çözüm yaklaşımı ile tüm proje girdilerinin belirsizlik içermesinden ötürü, çözüm esnasında bilgi kayıplarının yaşanmaması ve de girdilere ait belirsizliklerin proje çizelgelerine yansıtılabilmesi amacıyla, riski sevmeyen proje yöneticileri için sunulan deterministik çizelgelere ek olarak; riskli seven proje yöneticileri için farklı düzeylerde belirsizlik içeren çeşitli çizelge alternatifleri üretilebilmektedir. Ayrıca, Tablo 1’de görüldüğü üzere literatürde, tamamen belirsiz çok amaçlı KYPÇ probleminin çözümü için proje yöneticisinin riske karşı tutumunu dikkate alan herhangi bir çözüm yaklaşımına rastlanmamıştır. Sonuç olarak, bu çalışma

**Tablo 1.** Literatür araştırması özeti ve sınıflandırma tablosu (Summary of the literature review and classification table)

Bilimsel Çalışmalar	Problem Tipi	Belirsizlik Türü	Çok Amaçlılık	Risk İştahı	Belirsizlik içeren proje parametreleri & değişkenleri				Çözüm Yöntemi
					Aktivite Süreleri	Kaynak Gereksinimi	Kaynak Kapasitesi	Proje Çizelgeleri	
Yamashita vd. [11]	KYPÇ	Stokastik	-	√	-	-	-	-	Gürbüz eniyileme ve dağıtık arama algoritması
Artigues vd. [12]	KKPÇ	Stokastik	√	-	√	-	-	-	Gürbüz eniyileme ve senaryo gevşetme algoritması
Xiong vd. [13]	KYPÇ	Stokastik	√	-	√	-	-	-	Bilgi tabanlı, çok amaçlı evrimsel algoritma
Li & Womer [14]	KKPÇ	Stokastik	-	-	√	-	-	-	Dinamik programlama
Chakraborty vd. [15]	KKPÇ	Stokastik	-	√	√	-	-	-	Gürbüz eniyileme ve dal-kesme algoritması
Tao vd. [16]	KKPÇ	Stokastik	-	√	√	-	-	-	Şans kısıt modeli ve melez algoritmalar
Uysal vd. [17]	KKPÇ	Stokastik	-	-	-	√	-	-	Şans kısıtlı karışık tamsayılı programlama
Rostami vd. [18]	KKPÇ	Stokastik	-	-	√	-	-	-	İki aşamalı yerel arama algoritması
Bhaskar vd. [19]	KKPÇ	Bulanık	-	-	√	-	-	-	Paralel çizelge geliştirme kuralına dayalı sezgisel yöntem
Atli & Kahraman [6]	KKPÇ	Bulanık	-	√	√	-	-	√	Genişletilmiş bulanık kritik yol metodu ve Tabu arama algoritması
Knyazeva vd. [20]	KKPÇ	Bulanık	-	-	√	-	-	√	Kombine bulanık ve niteleyici olasılık yaklaşımları
Youseffi [8]	KKPÇ	Bulanık	-	-	√	√	√	√	Bulanık karınca kolonisi algoritması
Xu & Zhang [21]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	√	-	-	√	-	-	Bulanık mantık kontrolörü ile melez genetik algoritma
Zhang vd. [22]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	√	-	√	-	√	-	İki aşamalı parçacık sürüsü eniyileme algoritması
Xu & Feng [23]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	√	-	√	√	-	-	Kombinatorik öncelik tabanlı melez parçacık sürüsü eniyileme algoritması
Chen vd. [24]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	-	-	√	√	-	-	Gürbüz eniyileme
Alipouri vd. [25]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	-	-	√	-	-	√	Kaynak akış şebekesi tabanlı karışık tamsayılı programlama
Alipouri vd. [26]	KKPÇ	Bulanık & Stokastik	-	-	√	-	-	√	Öz uyarlamalı evrimsel farklar algoritması
Subulan [10]	KKPÇ	Aralık	-	√	√	√	√	√	temelli hiper sezgiseller
Mevcut çalışma	KYPÇ	Aralık	√	√	√	√	√	√	Sınırlandırılmış aralık aritmetik ve aralık programlama
									Sınırlandırılmış aralık aritmetik temelli uzlaşık programlama

kapsamında önerilen matematiksel programlama modeli ve çözüm yaklaşımının avantajları ve literatürdeki diğer çalışmalardan üstünlükleri aşağıda belirtilmiştir. (i) Literatürdeki birçok çalışmada, sadece proje girdilerine/parametrelerine ilişkin belirsizlikler dikkate alınmışken, önerilen matematiksel programlama modeli ile hem proje parametreleri hem de proje çıktılarına/çizelgelere ilişkin belirsizlikler dikkate alınabilmektedir. (ii) Önerilen

modelde, aktivite sürelerini, kaynak faydalı kullanım oranlarını ve de kaynak kapasitelerini etkilediği düşünülen, insan kaynağına ilişkin etkinlik ve güvenilirlik faktörlerine yer verilmiştir. (iii) Literatürde, genellikle projenin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi hedefine odaklanan birçok çalışmanın aksine, önerilen model ile aynı zamanda insan kaynağı kapasitesinin en etkin şekilde kullanımı da hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, çelişen

hedeflerin eş zamanlı olarak ele alınabilmesi ve proje yöneticilerine uzlaşık çözümlerin sunulabilmesi amacıyla, çok amaçlı bir eniyileme yaklaşımı olan uzlaşık programlamadan yararlanılmıştır. (iv) Önerilen çözüm yaklaşım ile tamamen belirsiz insan kaynağı kısıtlı KKP proje çizelgeleme problemi, belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmektedir. Ayrıca, dönüştürme esnasında ortaya çıkabilecek farklı risk durumları dikkate alınarak; riskten bağımsız ve de daha güvenilir çözümler üretilebilmektedir. (v) Önerilen çözüm yaklaşımı ile proje yöneticisinin riske karşı tutumu dikkate alınabilmekte olup, belirsizlik düzeyleri birbirinden farklı çeşitli alternatif proje çizelgeleri üretilebilmektedir. Riski sevmeyen veya kısmen seven proje yöneticileri için belirsizlik düzeyi düşük veya deterministik çizelgeler; riski seven proje yöneticileri için ise belirsizlik düzeyi nispeten yüksek aralık sayılar ile ifade edilen proje çizelgeleri üretilebilmektedir. Riski sevmeyen proje yöneticileri için oluşturulan çizelgeler ise genellikle daha uzun tamamlanma zamanına sahip olmakta ve de insan kaynağına ilişkin daha fazla kapasite gerektirmektedir.

## 2. PROBLEMİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYONU (MATHEMATICAL FORMULATION OF PROBLEM)

Bu bölümde, çok amaçlı ve tamamen belirsiz insan kaynağı kısıtlı KKP proje çizelgeleme problemine ait matematiksel formülasyon, Pritsker vd. [30] tarafından klasik KKPC problemi için geliştirilen kesikli zamanlı ikili tamsayılı programlama modelinin, aralık sayılar kullanılarak revize edilmesiyle elde edilmiştir. Klasik KKPC ve KYPÇ problemlerinin matematiksel formülasyonlarından farklı olarak; aktivite sürelerindeki belirsizlikler, aktivitelerin en erken ve en geç bitiş zamanlarına yansıtılmış ve klasik problemde tek bir kesikli zaman periyodu için tanımlanan karar değişkenleri, bir zaman aralığı için tanımlanmıştır. Bu sayede tamamen belirsiz ortamlarda, karar değişkenleri

olarak tanımlanan proje aktivitelerinin tamamlanma zamanlarına ilişkin belirsizlikler de dikkate alınabilmektedir. Problemin matematiksel formülasyonuna ait notasyon Tablo 2’de verilmiştir. Matematiksel modelde kullanılan ve projenin tamamlanma zamanının üst sınırı olarak tanımlanan  $T$ , insan kaynağı kısıtları dikkate alınmadan, tüm aktivite sürelerinin toplamının üst sınırı kullanılarak Eş. 1’deki gibi hesaplanmıştır.

$$t^{\pm} \in T \text{ or } [t, \bar{t}] \in T = \max \left( \sum_j [d_j, \bar{d}_j] \right) \quad (1)$$

Elde edilen  $T$  üst sınır değeri, önerilen dönüştürme yaklaşımının matematiksel programlama modelinin bir eniyileme yazılımında kodlanması durumunda, tanımlanması gereken toplam zaman periyoduna karşılık gelmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında, çok amaçlı, tamamen belirsiz ve insan kaynağı kısıtlı KKP proje çizelgeleme problemine ait aralık programlama modeli Eş. 2 – 7’de verilmiştir.

$$f_1 = ENK [Z_1, \bar{Z}_1] = \sum_j \sum_{[t, \bar{t}] \in [EFT_j, EFT_j]}^{[LFT_j, LFT_j]} [t, \bar{t}] \cdot x_{j[t, \bar{t}]} \quad (2)$$

$$f_2 = ENK [Z_2, \bar{Z}_2] = \sum_r^R [K_r, \bar{K}_r] \quad (3)$$

$$\sum_{[t, \bar{t}] \in [EFT_j, EFT_j]}^{[LFT_j, LFT_j]} x_{j[t, \bar{t}]} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{[t, \bar{t}] \in [EFT_i, EFT_i]}^{[LFT_i, LFT_i]} [t, \bar{t}] \cdot x_{i[t, \bar{t}]} \lesssim$$

$$\sum_{[t, \bar{t}] \in [EFT_j, EFT_j]}^{[LFT_j, LFT_j]} \left( [t, \bar{t}] - [d_j, \bar{d}_j] \right) \cdot x_{j[t, \bar{t}]} \quad \forall j \in J, \forall i \in P_j \quad (5)$$

**Tablo 2.** Problemin matematiksel modeline ait notasyon (Notation of the mathematical model of the problem)

İndis ve kümeler	
$J$	çizelgenecek proje aktivitelerinin kümesi
$T$	tüm aktivite sürelerinin toplanması ile elde edilen projenin tamamlanma zamanına ait üst sınır
$R$	farklı yetki, sorumluluk ve yeteneklere sahip insan kaynaklarının kümesi
$P_j$	$j$ aktivitesine ait öncül aktivitelerin kümesi
$S_j$	$j$ aktivitesine ait ardıl aktivitelerin kümesi
$t^{\pm}$	insan kaynağının herhangi bir proje aktivitesine atandığı belirsiz bir zaman aralığı
Model parametreleri	
$EFT_j^{\pm}$	$j$ aktivitesinin en erken bitişine ait bir zaman aralığı
$LFT_j^{\pm}$	$j$ aktivitesinin en geç bitişine ait bir zaman aralığı
$d_j^{\pm}$	$j$ aktivitesinin minimum kaynak gereksinimi ile tamamlanabileceği maksimum süre aralığı (gün)
$k_{jr}^{\pm}$	$j$ aktivitesinin $r$ tipi insan kaynağından gereksinim duyacağı minimum miktar (adam x gün)
$E_{jr}^{\pm}$	$r$ tipi insan kaynağının $j$ proje aktivitesini gerçekleştirme etkinliği
$R_r^{\pm}$	$r$ tipi insan kaynağının proje boyunca güvenilirlik faktörü
Model karar değişkenleri	
$Kr^{\pm}$	her bir zaman aralığında mevcut maksimum $r$ tipi insan kaynağı miktarı (adam x gün)
$x_{jt^{\pm}}$	$\begin{cases} 1 & \text{Eğer } j \text{ aktivitesi } t^{\pm} \text{ zaman aralığında tamamlanıyorsa} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases}$

$$\sum_j \frac{[k_{jr}, \overline{k_{jr}}]}{[E_{jr}, \overline{E_{jr}}]} \cdot \sum_{[\underline{t}, \overline{t}] \in [\underline{t}, \overline{t}]}^{[\underline{t+d_j-1}, \overline{t+d_j-1}]} x_{j[\underline{t}, \overline{t}]} \approx$$

$$[K_r, \overline{K_r}] \cdot [R_r, \overline{R_r}] \quad \forall r \in R, \forall t^\pm = \{[\underline{t}, \overline{t}] \mid \underline{t} = \overline{t} \in T\} \quad (6)$$

$$x_{j[\underline{t}, \overline{t}]} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall t^\pm = \{[\underline{t}, \overline{t}] \mid \underline{t} \leq \overline{t} \in T\}$$

$$[K_r, \overline{K_r}] \geq 0 \quad \forall r \in R \quad (7)$$

Eş. 2 – 7’de verilen aralık programlama modelini, klasik KKPÇ ve KYPÇ problemlerinin matematiksel formülasyonundan ayıran temel farklar şu şekilde özetlenebilir. (i) Tüm parametre ve karar değişkenlerinin belirsizlik içerdiği, tamamen belirsiz ortamları ele alabilmesi ve (ii) proje ekibi içerisinde yer alan farklı türden insan kaynağının (KKP yazılım tedarikçisi, müşteri işletme ve çözüm ortağı tarafı) proje aktivitelerini gerçekleştirme etkinlikleri ile proje ufku boyunca güvenilirlik faktörlerini dikkate alabilmesidir. Bu sayede, insan kaynağı kapasitesinin proje boyunca etkin ve efektif bir şekilde kullanılmasına yönelik bir amaç fonksiyonu modele eklenebilmiştir. Eş. 2’de formüle edilen amaç fonksiyonu ile KKP projesinin tamamlanma zamanı en küçüklenmektedir. Eş. 3’te formüle edilen diğer amaç fonksiyonu ile proje süresi boyunca, aktivitelerin gerçekleştirilmesi için gerekli minimum insan kaynağı kapasitesinin (adam x gün) tüketilmesi hedeflenmiştir. Eş. 4’e göre, bir proje aktivitesi en erken ve en geç bitiş zaman aralıklarının kapsadığı sadece tek bir zaman aralığında tamamlanabilecektir. Eş. 5, proje aktiviteleri arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanmasını garanti etmektedir. Aktivite sürelerinin belirsizlik içermesi durumunda, öncül olan bir aktivitenin tamamlanma zaman aralığı ile ardıl olan diğer bir aktivitenin başlama zaman aralığının çakışması riski söz konusu olabilmektedir. Eş. 6’da insan kaynağı kapasitesinin aşılması engellenmiştir. İnsan kaynağı kapasitesinin karar değişkeni olarak tanımlandığı KYPÇ problemlerinde, kaynak kapasitesi ne kadar fazla belirlenirse, proje o kadar erken zamanda bitecek, kapasite ne kadar az belirlenirse, projenin bitışı o kadar uzayacaktır. Bu nedenle, çelişen bu iki hedefin eş zamanlı olarak ele alınması ve proje yöneticilerine uzlaşık çözümler sunulması gerekmektedir. Eş. 6’da formüle edilen insan kaynağı kapasite kısıtını, bilimsel yazındaki mevcut çalışmalarda verilen klasik kapasite kısıtından ayıran bir diğer önemli husus ta, insan kaynağının proje aktivitesini gerçekleştirirken sahip olduğu etkinlik ve proje boyunca edindiği güvenilirlik faktörlerini dikkate alabilmesidir. Eş. 7’de proje aktivitelerinin tamamlanma zaman aralıkları, ikili tamsayı değişken olarak tanımlanmıştır. Proje boyunca gereksinim duyulan insan kaynağı kapasiteleri (adam x gün) cinsinden ifade edilip, sürekli değişkenler olarak tanımlanmıştır. Eş. 2 – 7 ile önerilen model, temel olarak Subulan [9-10] tarafından tamamen belirsiz KKPÇ problemleri için geliştirilen modeli esas almaktadır. Ele alınan problemin ve önerilen çözüm yaklaşımının, Subulan [9-10]’dan farklılaşan yönleri aşağıda özetlenmiştir. Subulan [9-10] kaynak kapasitelerinin birer girdi/model parametresi olarak tanımlandığı klasik KKPÇ problemi için, aralık

programlama temelli bir çözüm yaklaşımı önermiştir. Bu çalışmada ise, yenilenebilir insan kaynağı kapasitelerinin birer çıktı/model değişkeni olarak tanımlandığı, KYPÇ probleminin çözümü hedeflenerek önerilen çözüm yaklaşımı genişletilmiştir. Diğer bir deyişle, sadece projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesi hedefine odaklanan Subulan’ın [9-10] yanı sıra; bu çalışmada, farklı türden insan kaynağı kapasiteleri için tanımlanan karar değişkenleri yardımıyla, çok amaçlı KYPÇ problemi ele alınmış ve proje süresince gerekli olacak toplam insan kaynağı kapasitesinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle de, çelişen hedeflerin eş zamanlı olarak ele alınabilmesi ve proje yöneticisine uzlaşık çözümler üretilebilmesi amacıyla, çok amaçlı bir eniyileme tekniği olan uzlaşık programlama yaklaşımından faydalanılmıştır. Ayrıca, Subulan [9-10]’dan farklı olarak, önerilen modele ait kaynak kısıtında (Eş. 6), özellikle KKP uyarlama projeleri için önem taşıyan insan kaynağına ilişkin etkinlik/güvenilirlik faktörleri birer model parametresi olarak tanımlanarak dikkate alınabilmiştir. Son olarak, Subulan [9-10] tarafından önerilen ve bir sınılaştırılmış doğal gaz tankı inşaat projesinin çizelgelenmesi üzerinde test edilen çözüm yöntemi, sözü edilen değişiklikler ile genişletilerek, temel bir Endüstri Mühendisliği uygulaması olan KKP uyarlama projelerinin insan kaynağı kısıtı altında çizelgelenmesi hedeflenmiştir. Aktivitelerin en erken ve en geç tamamlanma zamanları, klasik ileri ve geri geçiş [31] hesaplamalarının aralık sayılar kullanılarak, Eş. 8–11’deki gibi revize edilmesiyle hesaplanmıştır [10]. Eş. 9 ve 11’de aralık toplama ve çıkarma aritmetik operasyonları kullanılmıştır. Eş. 8’de ise ileri geçiş kapsamında, ilgili aktivitenin öncülleri arasından maksimum en geç bitiş zaman aralığına sahip olan kullanılarak, en erken başlama zaman aralığı hesaplanabilmektedir. Eş. 11’de ise geri geçiş kapsamında, ilgili aktivitenin ardılları arasından minimum en geç başlama zaman aralığına sahip olan kullanılarak, en geç bitiş zaman aralığı hesaplanmıştır. Eş. 8 ve 10’da maksimum/minimum operatörlerinin kullanımı, aralık sayıların ikili karşılaştırılmasını gerektirmektedir.

$$[EST_j, \overline{EST}_j] = \text{Max} \left\{ \left[ \overline{EFT}_i, \overline{EFT}_i \right] \right\}_{i \in P_j} \quad (8)$$

$$[EFT_j, \overline{EFT}_j] = [EST_j, \overline{EST}_j] \oplus [d_j, \overline{d}_j] \quad (9)$$

$$[LFT_j, \overline{LFT}_j] = \text{Min} \left\{ \left[ \underline{LST}_i, \underline{LST}_i \right] \right\}_{i \in S_j} \quad (10)$$

$$[LST_j, \overline{LST}_j] = [LFT_j, \overline{LFT}_j] \ominus [d_j, \overline{d}_j] \quad (11)$$

Karşılaştırılan aralık sayılar birbiriyle kesişmiyorsa, Eş. 12’de verildiği üzere sıkı bir kısmi sıralama kuralı kullanılabilir [32]. Ancak bu kuralın, birbirini kapsayan veya çakışan iki aralık sayının karşılaştırılmasında kullanılması önerilmemektedir [33]. Bunun yerine, kesişen aralık sayıların orta noktası ve yarı aralıklarının kullanımına dayanan ve Eş. 13’te verilen bir sıralama indeksi kullanılabilir [33-34].

$$\left[ \underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i \right] < \left[ \underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j \right] \Rightarrow \overline{EFT}_i < \underline{EFT}_j \quad (12)$$

$$\mathcal{A}_\odot \left\{ \left[ \underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i \right], \left[ \underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j \right] \right\} = \frac{m(\underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j) - m(\underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i)}{w(\underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j) + w(\underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i)} \quad (13)$$

Hesaplanan sıralama indeksi,  $\mathcal{A}_\odot \left\{ \left[ \underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i \right], \left[ \underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j \right] \right\}$  değerinin 1'e eşit veya büyük olması durumunda,  $\left[ \underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j \right] > \left[ \underline{EFT}_i, \overline{EFT}_i \right]$  karşılaştırması kabul edilmekte; indeks değerinin '0' çıkması durumunda ise söz konusu karşılaştırma sonucu reddedilmektedir.

### 3. ARALIK PROGRAMLAMA TEMELLİ BİR DÖNÜŞTÜRME YAKLAŞIMI (A TRANSFORMATION APPROACH BASED ON INTERVAL PROGRAMMING)

Bu bölümde, Subulan [9-10] tarafından tamamen belirsiz klasik KKPÇ problemlerinin çözümü için geliştirilen dönüştürme yaklaşımı genişletilerek, çok amaçlı KYPÇ problemlerinin insan kaynağı kısıtı altında ve etkinlik/güvenilirlik faktörleri dikkate alınarak çözümü hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşım temel olarak, aralık aritmetik operasyonlar, aralık sıralama ve aralık doğrusal programlamaya dayanmaktadır. Önerilen yaklaşımda aralık aritmetik operasyonlar gerçekleştirilirken, proje yöneticisinden sağlanan ek bilgiler veya kısıtlar ile proje yöneticisinin risk iştahı dikkate alınabilmektedir. Eş. 2 ile verilen projenin tamamlanma zamanının en küçüklenmesi hedefi, tüm aktivitelerin tamamlanma zamanlarının orta noktaları kullanılarak, Eş. 14'te belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüştür. Benzer şekilde Eş. 15'te, proje boyunca gerekli olacak toplam insan kaynağı kapasitesinin orta noktası en küçüklenmektedir.

$$f_1 = ENK m \left( \left[ \underline{Z}_1, \overline{Z}_1 \right] \right) = \sum_j \sum_{\substack{[LFT_j, LFT_j] \\ [t, \bar{t}] \in [\underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j]}} \frac{(t + \bar{t})}{2} \cdot x_{j[t, \bar{t}]} \quad (14)$$

$$f_2 = ENK m \left( \left[ \underline{Z}_2, \overline{Z}_2 \right] \right) = \sum_r^R \frac{(K_r + \overline{K}_r)}{2} \quad (15)$$

Eş. 14-15'te formüle edilen çelişen amaçların eş zamanlı olarak ele alınması ve proje yöneticisine uzlaşık çözümler üretilebilmesi amacıyla,  $p = 1$  olması halinde dik doğrusal uzaklıklar toplamının en küçüklendiği uzlaşık programlama tekniğinden yararlanılmıştır. Bu hususta, dik doğrusal mesafe metriği ile elde edilen uzlaştırıcı amaç fonksiyonu ile her iki amaç fonksiyonunun ayrı ayrı eniyilenmesi sonucunda elde edilen en uygun amaç fonksiyonu değerlerinden ( $f_1^*$  ve  $f_2^*$ ), pozitif ve negatif yöndeki mutlak sapmaların toplamı en küçüklenmektedir [35]. Eş. 16'da formüle edilen uzlaştırıcı amaç fonksiyonu, mutlak değer fonksiyonlarının kullanılması nedeniyle, doğrusal değildir

ve Eş. 17 – 20 ile doğrusal hale dönüştürülebilmektedir [36]. Eş. 4'te verilen kısıt, aralık doğrusal programlama ve çok indisli karar değişkenlerinin [37] kullanımı ile Eş. 21'de verilen forma dönüştürülmüştür.

$$ENK \left| m \left( \left[ \underline{Z}_1, \overline{Z}_1 \right] \right) - f_1^* \right| + \left| m \left( \left[ \underline{Z}_2, \overline{Z}_2 \right] \right) - f_2^* \right| \quad (16)$$

$$ENK f_1^+ + f_1^- + f_2^+ + f_2^- \quad (17)$$

$$m \left( \left[ \underline{Z}_1, \overline{Z}_1 \right] \right) - f_1^* + f_1^+ - f_1^- = 0 \quad (18)$$

$$m \left( \left[ \underline{Z}_2, \overline{Z}_2 \right] \right) - f_2^* + f_2^+ - f_2^- = 0 \quad (19)$$

$$f_1^+, f_1^-, f_2^+, f_2^- \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{[LFT_j] \\ [t, \bar{t}] \in [\underline{EFT}_j]}} \sum_{\substack{[LFT_j] \\ [\bar{t}, t] \in [\underline{EFT}_j]}} x_{j[t, \bar{t}]} = 1 \quad \forall j \in J \quad (21)$$

Belirsizlik altında proje çizelgeleme problemlerinde karşılaşılan risk durumlarından biri de, aktivitelerin başlama zaman aralığının negatif alt sınır değeri içermesidir. Bir başka ifadeyle, bir aktivitenin tamamlanma zaman aralığından, belirsiz aktivite süresinin çıkarılmasıyla elde edilen zaman aralığı, sıfırı içeren ancak negatif bir alt sınıra sahip bir aralık sayı olabilmektedir. Bu durum, özellikle risk sevmeyen proje yöneticileri için kabul edilebilir değildir. Bu risk durumunun temel sebebi, standart bulanık veya aralık aritmetik operasyonlarından çıkarma işlemidir. Bunun önüne geçebilmek için, ek kısıtlar altında sınırlandırılmış bulanık aritmetik operasyonlardan [38] yola çıkarak, Eş. 22'deki ek bir kısıt modele eklenmiş ve bu kısıt, sınırlandırılmış aralık aritmetik operasyonlar [39] kullanılarak, Eş. 23-24 ile belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüştür. Dönüştürme süreci, ek bir bilgi dâhilinde gerçekleştirilmiştir. Bu ek bilgi, aralık çıkarma işleminin gerçekleştirildiği aralık sayıların temel değişkenleri arasındaki ilişkiyi (büyük eşit, küçük eşit, mutlak eşit ve yaklaşık eşit gibi) yansıtmaktadır. Temel değişkenler arasındaki bu ilişkiler, proje yöneticisinin risk iştahı ile ilgili olup, Eş. 23-24'te  $\theta$  parametresinin kullanımıyla çözüme yansıtılmıştır. Riskten kaçınan bir proje yöneticisi için,  $\theta$  parametresi '0' değerini alacak ve negatif değerler içeren başlama zaman aralığına sahip aktiviteler çözümde yer almayacaktır. Diğer yandan, risk parametresinin değeri  $0 < \theta \leq \sqrt{2}$  olarak tanımlandığında, risk almayı seven veya kısmen seven proje yöneticileri için, belirli ölçüde risk içeren birçok alternatif çizelge üretilebilecektir [40].

$$\sum_{\substack{[LFT_j, LFT_j] \\ [t, \bar{t}] \in [\underline{EFT}_j, \overline{EFT}_j]}} [t, \bar{t}] \cdot x_{j[t, \bar{t}]} \geq [d_j, \overline{d}_j] \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{[LFT_j] \\ [t, \bar{t}] \in [\underline{EFT}_j]}} \sum_{\substack{[LFT_j] \\ [\bar{t}, t] \in [\underline{EFT}_j]}} t \cdot x_{j[t, \bar{t}]} - \overline{d}_j \geq -\theta \cdot \sqrt{2} \left( \frac{\sum_{\substack{[LFT_j] \\ [t, \bar{t}] \in [\underline{EFT}_j]}} \sum_{\substack{[LFT_j] \\ [\bar{t}, t] \in [\underline{EFT}_j]}} \bar{t} \cdot x_{j[\bar{t}, t]} - \underline{t} \cdot x_{j[t, \bar{t}]}}{2} \right) \quad \forall j \in J \quad (23)$$

$$\sum_{\underline{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \sum_{\bar{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \bar{t} \cdot x_{j \underline{t} \bar{t}} - \underline{d}_j \geq \theta \cdot \sqrt{2} \left( \frac{\sum_{\underline{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \sum_{\bar{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \bar{t} \cdot x_{j \underline{t} \bar{t}} - \underline{d}_j}{2} \right) \forall j \in J \quad (24)$$

Eş. 5’te verilen proje aktiviteleri arasındaki öncelik ilişkileri kısıtı, doğrusal aralık programlama yardımıyla, Eş. 25–26 ile belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüştür. Aktivite sürelerindeki belirsizliklerden ötürü, öncül olan bir aktivitenin tamamlanma zaman aralığı ile ardılı olan başka bir aktivitenin başlama zaman aralığının kesişimi/çakışması riski ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, öncelik ilişkileri kısıtının tam anlamıyla karşılanmasını engellemekte ve de her iki aktivitenin aynı insan kaynağını gerektirmesi durumunda, kaynak yetersizliği riskinin de ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, proje yöneticisinin bu tür bir risk durumuna karşı tutumunun çözüme yansıtılması amacıyla, diğer bir risk parametresi olan ( $\alpha$ ) kullanılmıştır. Bu risk parametresinin  $\alpha = 0$  olması halinde, dönüştürme sürecinde standart aralık aritmetik operasyonların kullanımı gerçekleştirilmiş olup, riskten kaçınan proje yöneticileri için kabul edilebilir çözümler üretilebilmektedir. Bir başka ifadeyle, ardıl aktivitenin başlama zaman aralığının alt sınırı, öncülü olan diğer bir aktivitenin tamamlanma zaman aralığının üst sınırından büyük veya eşit olmakta, böylece risk durumunun önüne geçilebilmektedir. Diğer yandan, risk almayı seven proje yöneticileri için  $0 < \alpha \leq 1$  tanımlanması durumunda, risk içeren alternatif çizelgeler üretilmektedir.

$$\sum_{\underline{t} \in EFT_i} \overline{LFT_i} \sum_{\bar{t} \in EFT_i} \overline{LFT_i} \bar{t} \cdot x_{i \underline{t} \bar{t}} \leq \frac{\overline{LFT_j}}{\overline{LFT_i}} \frac{\overline{LFT_j}}{\overline{LFT_i}} \sum_{\underline{t} \in EFT_j} \sum_{\bar{t} \in EFT_j} \left[ \alpha \cdot (\underline{t} - \underline{d}_j) + (1 - \alpha) \cdot (\underline{t} - \bar{d}_j) \right] \cdot x_{j \underline{t} \bar{t}} \forall j \in J, \forall i \in P_j \quad (25)$$

$$\sum_{\underline{t} \in EFT_i} \overline{LFT_i} \sum_{\bar{t} \in EFT_i} \overline{LFT_i} \bar{t} \cdot x_{i \underline{t} \bar{t}} \leq \sum_{\underline{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \sum_{\bar{t} \in EFT_j} \overline{LFT_j} \bar{t} \left[ \alpha \cdot (\bar{t} - \bar{d}_j) + (1 - \alpha) \cdot (\bar{t} - \underline{d}_j) \right] \cdot x_{j \underline{t} \bar{t}} \forall j \in J, \forall i \in P_j \quad (26)$$

Eş. 6’daki insan kaynağı kapasite kısıtı, ortaya çıkabilecek iki farklı risk unsuru dikkate alınarak, Eş. 27-28 ile belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüştür. Dönüşüm sürecinde, Eş. 23–24’e benzer şekilde aralık sayıların temel değişkenleri arasındaki ilişkiden yararlanılmıştır. Ortaya çıkabilecek risk unsurlarından ilki; proje uygulama safhasında, kalan insan kaynağı kapasitesinin alt sınırı negatif bir sayı olan ve sıfırı içeren bir aralık sayı elde edilmesidir. Bu durum, projenin ilerleyen aşamalarında kalan kaynak kapasitesinin yetersiz olma riskini ortaya çıkarmaktadır. Bunun temel nedeni, standart aralık aritmetik operasyonlarından çıkarma işleminin, negatif kalan kaynak kapasitesine yol açmasıdır. Bunun yerine, ek bilgi ve kısıtlar doğrultusunda, sınırlandırılmış aralık aritmetik operasyonlar

kullanılarak bu durumun önüne geçilebilmektedir. Söz konusu risk durumunu engellemek ve riskten kaçınan proje yöneticileri için kabul edilebilir çözümler sunabilmek amacıyla, modele diğer bir risk parametresi olan ( $\Delta$ ) eklenmiştir.  $\Delta = 0$  tanımlanması durumunda, projenin her aşamasında kalan kaynak kapasitesinin pozitif bir aralık sayı olması sağlanarak, riskten kaçınan bir proje yöneticisi için kabul edilebilir çözümler üretilebilmektedir. Söz konusu risk parametresinin  $0 < \Delta \leq \sqrt{2}$  aralığında tanımlanmasıyla, riskten kısmen kaçınan, risk nötr ve risk almayı seven proje yöneticileri için çeşitli alternatif çözümler üretilebilmektedir. Kalan kaynak kapasitesinin yetersiz olmasının yanında, proje aktivite sürelerinin içerdiği belirsizlikten ötürü, aktivite süresince tüketilen toplam insan kaynağı miktarının, insan kaynağı kapasitesinin üst sınırını aşması riski ortaya çıkabilmektedir. Bunun temel nedeni, Eş. 6 ile verilen kısıtta, aktivitelerin insan kaynağını tükettiği zaman aralığının  $[\underline{t} + \underline{d}_j - 1, \bar{t} + \bar{d}_j - 1]$  olarak tanımlanmasıdır. Dolayısıyla, proje aktivite sürelerinin tanımlanan üst sınırlar kadar sürmesi durumunda, tüketilecekleri toplam insan kaynağı miktarının, belirsiz kaynak kapasitesinin üst sınırını aşması riski ortaya çıkabilmektedir. Söz konusu risk durumunun engellenmesi amacıyla, aktivitelerin insan kaynağını tükettiği zamanın aralığının maksimum süre kadar, bir başka ifadeyle  $[\bar{t} + \bar{d}_j - 1, T]$  olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, modele diğer bir risk parametresi olan  $\beta$  eklenerek, riskten kaçınan bir proje yöneticisi ( $\beta = 0$  ve  $\Delta = 0$ ) için kaynak kapasitesi kısıtı Eş. 29 – 30 ile formüle edilebilmektedir.

$$\frac{K_r \cdot R_r}{E_{jr}} - \sum_j \frac{K_{jr}}{E_{jr}} \cdot \left( \sum_{\underline{t} \in \underline{t}}^{\beta \cdot (\underline{t} + \underline{d}_j - 1) + (1 - \beta) \cdot (\bar{t} + \bar{d}_j - 1)} \sum_{\bar{t} \in \bar{t}}^T x_{j \underline{t} \bar{t}} \right) \geq -\Delta \sqrt{2} \cdot \left( \frac{K_r - K_r}{2} \right) \forall r \in R, \forall \underline{t} = \bar{t} \in T \quad (27)$$

$$\frac{K_r \cdot R_r}{E_{jr}} - \sum_j \frac{K_{jr}}{E_{jr}} \cdot \left( \sum_{\underline{t} \in \underline{t}}^{\beta \cdot (\underline{t} + \underline{d}_j - 1) + (1 - \beta) \cdot (\bar{t} + \bar{d}_j - 1)} \sum_{\bar{t} \in \bar{t}}^T x_{j \underline{t} \bar{t}} \right) \geq \Delta \sqrt{2} \cdot \left( \frac{K_r - K_r}{2} \right) \forall r \in R, \forall \underline{t} = \bar{t} \in T \quad (28)$$

$$\sum_j \frac{K_{jr}}{E_{jr}} \cdot \sum_{\underline{t} \in \underline{t}}^{\bar{t} + \bar{d}_j - 1} \sum_{\bar{t} \in \bar{t}}^T x_{j \underline{t} \bar{t}} \leq K_r \cdot R_r \forall r \in R, \forall \underline{t} = \bar{t} \in T \quad (29)$$

$$\sum_j \frac{K_{jr}}{E_{jr}} \cdot \sum_{\underline{t} \in \underline{t}}^{\bar{t} + \bar{d}_j - 1} \sum_{\bar{t} \in \bar{t}}^T x_{j \underline{t} \bar{t}} \leq \overline{K_r} \cdot \overline{R_r} \forall r \in R, \forall \underline{t} = \bar{t} \in T \quad (30)$$

Sonuç olarak,  $0 < \Delta \leq \sqrt{2}$  ve  $0 < \beta \leq 1$  olarak tanımlanan risk parametreleri doğrultusunda, insan kaynağı kapasitesinin üst sınırının aşılması riski ve kalan kaynak kapasitesinin projenin ilerleyen aşamalarında yetersiz olması risklerini göze alabilen (risk almayı seven veya kısmen seven) proje yöneticileri için çeşitli çizelge alternatifleri üretilebilmektedir. Bu bağlamda, üretilen çözümlerin

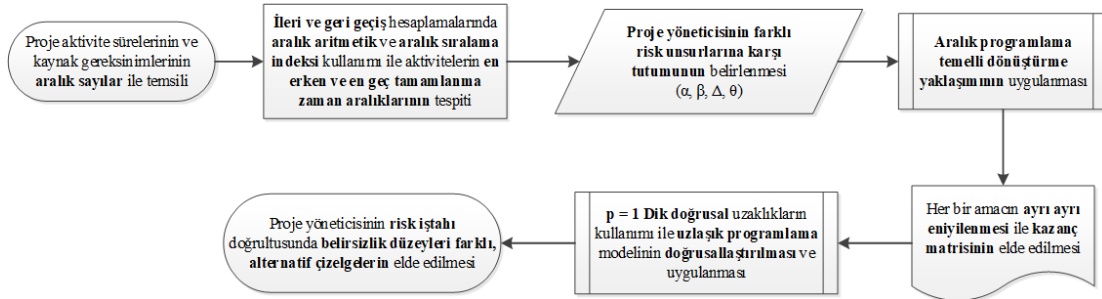


içereceği belirsizlik düzeyi, proje yöneticinin risk alma iştahına göre değişkenlik gösterecektir. Proje yöneticisinin, risk iştahını yansıtan temel unsurlar ise  $\alpha, \beta, \theta$  ve  $\Delta$  olarak tanımlanan risk parametreleridir. İnsan kaynağı kısıtı ve belirsizlik altında çok amaçlı KKP proje çizelgeleme probleminin çözümü için önerilen çözüm yaklaşımı Şekil 1'de özetlenmiştir.

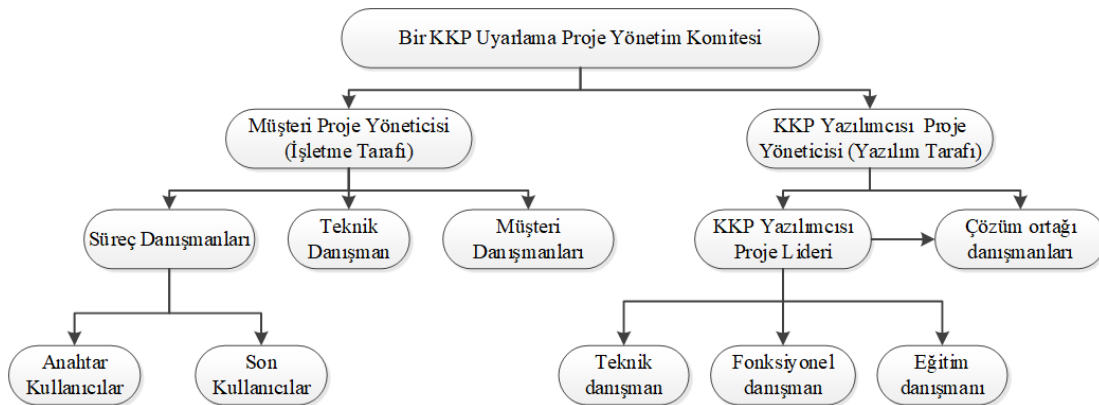
#### 4. TÜRKİYE'DE KKP ENDÜSTRİSİNDE BİR UYGULAMA ÇALIŞMASI (A CASE STUDY IN ERP INDUSTRY OF TURKEY)

Bu bölümde, önerilen yaklaşımın pratik hayattaki uygulanabilirliğini ve geçerliliğini test etmek amacıyla, 90'lı yılların başında Almanya'da bir Türk yazılımcı tarafından kurulan, günümüzde ise başta Türkiye olmak üzere, birçok ülkede faaliyet gösteren uluslararası bir KKP yazılım tedarikçisine ait bir uygulama çalışmasından elde edilen sonuçlar sunulmuştur. KKP yazılım tedarikçisi, sektöründe lider firmalar arasında olup ve ürünü dünyada ilk çevrimiçi KKP yazılımı olma özelliğini taşımaktadır. KKP yazılım tedarikçisi, kurulum ve uyarlama projelerinin ilk safhasında, proje hedeflerinin, kapsamının ve stratejilerinin belirlenmesinin ardından Şekil 2'de verildiği gibi proje ekibinin yer aldığı bir organizasyon şeması hazırlamaktadır. Birçok bilişim projesinde olduğu gibi, bir KKP uyarlama projesinin temel kaynağı, organizasyon şeması içerisinde yer alan farklı görev, sorumluluk ve becerilere sahip insan kaynağı ve uzman desteğidir [1, 4, 41]. Proje ekibi içerisinde yer alan fonksiyonel danışmanlar, işletmenin ihtiyaçlarını ve

KKP yazılımından beklentilerini belirleyerek, iş süreçlerine ilişkin detaylı analiz çalışmalarını yürütür. Bu analizler sonucunda, çözüm önerileri sunarak, modül uyarlamalarını gerçekleştirirler. Teknik danışmanlar ise firmaya özel geliştirmeler yapmak ve veri transferinden sorumludur. Eğitim danışmanları, son kullanıcı eğitimlerinin verilmesi, işletmeye canlı destek verilmesi ve test çalışmalarının sürdürülmesinden sorumludur. Proje ekibi içerisinde yer alan işletme çalışanı ise genellikle süreç veya teknik danışmanlık görevini üstlenir ve KKP yazılım tedarikçisinden gelen danışmanlara, iş süreçleriyle ilgili her konuda yardımcı olarak, işletmeye özel geliştirme çalışmalarının içerisinde yer alır. Çözüm ortağı danışmanları, genellikle projenin hazırlık evresinde yazılımın kurulumu, sistem yönetimi ve temel uygulamalar kapsamında görev alır ve proje boyunca, KKP yazılım tedarikçisine destek sağlar. Ayrıca, proje tamamlandıktan sonraki süreçte, yazılımsal sorunları gidererek müşteri işletmeye destek sağlar. Proje ekibi ve organizasyon şemasının belirlenmesinin ardından, yazılımı satın alan işletmeye yönelik sistem ve iş süreçlerinin analizi gerçekleştirilerek, bir proje planı hazırlanır. KKP proje yönetiminin bu ilk safhasında, yazılım uyarlamasının gerçekleştirileceği işletmenin, sistem analizi gerçekleştirilmemiş ve iş süreçleri yeniden yapılandırılmamış (değişim yönetimi gerçekleşmemiş) ise sonuç başarısız bir bilişim projesi olabilmektedir. İşletmenin iş süreçlerinin yeniden yapılandırılmasıyla, farklı işletme fonksiyonlarına ait iş süreçleri, KKP yazılımının modülleriyle uyumlu hale gelmektedir [4, 42-43]. İş süreçlerinin analizi ve yeniden yapılandırılması sonrasında,



Şekil 1. İnsan kaynağı kısıtı altında çok amaçlı KKP proje çizelgeleme problemi için önerilen çözüm yaklaşımı (The proposed solution approach for the multi-objective ERP project scheduling problem under human resource constraints)



Şekil 2. KKP uyarlama projelerine ait organizasyon şeması (Organization chart of ERP implementation projects)

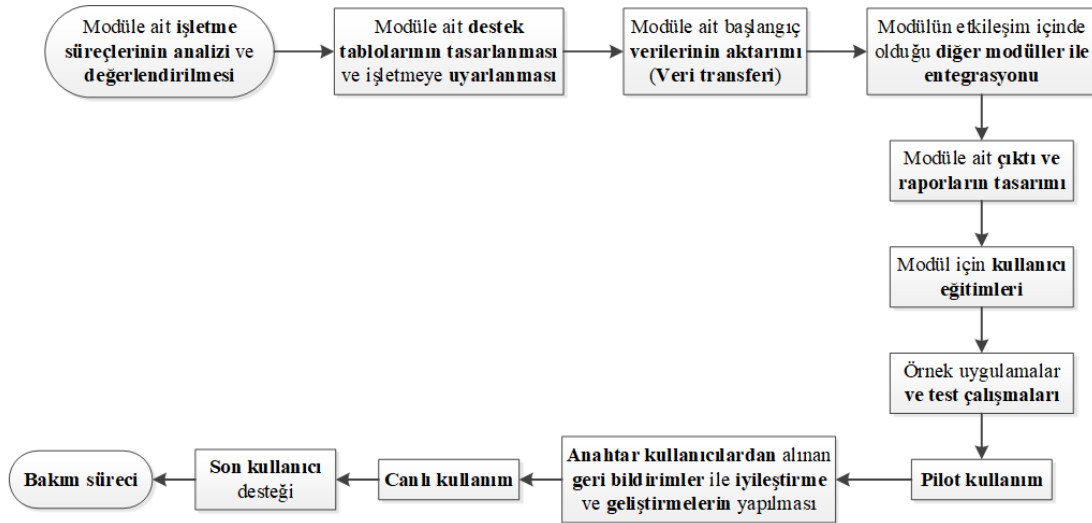
proje planının hazırlanmasıyla birlikte yazılımın kurulumu gerçekleştirilmektedir. Hazırlanan proje planı içerisinde, KKP yazılımı modüllerinin devreye alınması süreci yer almaktadır. Bir KKP uyarılama projesinin temel aktiviteleri, modül devreye alma sürecine ait faaliyetlerden oluşmaktadır.

Bu faaliyetler, işletme fonksiyonlarına ait birçok modül için benzerlik göstermekte olup, genelleştirilerek Şekil 3'de özetlenmiştir [44]. Modül devreye alma süreçlerinde, Şekil 2'de verilen farklı görev, sorumluluk ve beceriye sahip insan kaynağından yararlanılmaktadır. Bir başka deyişle, üretim, finans, muhasebe, satış/pazarlama, satınalma, kalite vb. gibi birçok işletme fonksiyonuna ilişkin KKP yazılım modülleri, kurulum sonrasında devreye alınırken ve gerekli uyarlamalar gerçekleştirilirken, farklı türden insan kaynağına ve uzmanların desteğine gereksinim duyulmaktadır.

Birçok KKP yazılım modülünün devreye alınma sürecinde, modüller arası etkileşim ve entegrasyon gereksinimi nedeniyle öncelik ilişkileri kısıtları ortaya çıkmaktadır. Örneğin, üretim planlama & kontrol ve malzeme ihtiyaç planlama (MRP) gibi modüllerin devreye alınabilmesi için, malzeme temel verileri tanımlanmış, rota ve ürün ağacı modülleri devreye girmiş olmalıdır. Genel muhasebe ve finansman modülünün devreye alınmasıyla, satış ve satınalma yönetimi modülleri ile entegrasyonu gerçekleştirilmektedir. Ele alınan uygulama çalışmasına ait modül devreye alma sürecine ilişkin süreler, modüllerin farklı türden insan kaynağına gereksinim duyacağı minimum miktarlar, modüller arası öncelik ilişkileri ve modül devreye alma sürecinin minimum insan kaynağı gereksinimi ile tamamlanabileceği maksimum süreler, aralık sayılarının kullanımı ile Tablo 3'te sunulmuştur.

Ayrıca, proje aktivitelerine ait öncelik ilişkilerini gösteren proje ağı, Şekil 4'te verilmiştir. Proje süresi boyunca, insan kaynağının sahip olabileceği etkinlik ve güvenilirlik faktörlerine ait değer aralıkları ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 3 ve Tablo 4'te sunulan modüllerin devreye alınma süreleri, insan kaynağı gereksinimleri, etkinlik ve güvenilirlik faktörlerinde kullanılan aralık sayılar, benzer ölçekteki işletmelerde gerçekleştirilen KKP projeleri referans alınarak, KKP yazılımcısının proje lideri ve danışman yöneticisi tarafından, çözüm ortakları ve müşteri işletmenin proje yöneticilerinin de görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Söz konusu aralık sayılar, ilgili proje parametrelerine ait tahmini değerleri yansıtmakta olup, uyarlamaların gerçekleştirileceği işletmeden işletmeye farklılık gösterecektir. Tüm bu bilgiler ışığında, Şekil 1'de özetlenen çözüm yaklaşımının Tablo 3 – 4'te sunulan veriler kullanılarak uygulanması ile proje yöneticilerinin risk iştahı doğrultusunda elde edilen alternatif çizelgelere ait hedef değerleri (PT-proje tamamlanma zamanları, İKK-gerekli insan kaynağı kapasitesi) Tablo 5'te verilmiştir. Bir başka deyişle, riske karşı duyarlılığı farklı proje yöneticileri için, belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüş matematiksel programlama modelinin LINGO 15.0 eniyileme yazılımı kullanılarak, her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çözülmesi sonucunda, Tablo 5'te sunulan kazanç matrisi elde edilmiştir. Kazanç matrisinde, her bir amacın ayrı ayrı eniyilenmesi ile elde edilen proje tamamlanma süreleri (gün), proje süresince gereken minimum insan kaynağı kapasite değerleri (adam x gün) ve eniyileme detayları yer almaktadır. Eniyileme sürecinde kullanılan bilgisayarın konfigürasyonu, Intel i7 Core 2.4 GHz işlemci ve 16 GB RAM olup, Windows 8 işletim sistemine sahiptir. Kazanç matrisinin köşegeninde yer alan en iyi amaç fonksiyonu değerlerinin, önerilen dönüştürme yaklaşımının uzlaşık programlama modelinde kullanılması sonucunda elde edilen dengeli çözümler, Tablo 6'da sunulmuştur. Bir başka ifadeyle, riske karşı tutumu farklı proje yöneticileri için belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüş model ile uzlaşık programlama tekniğinin uygulanması sonucunda, Tablo 6'da verilen alternatif proje çizelgeleri elde edilmiştir. Her bir çizelge alternatifi için gerekli toplam insan kaynağı kapasitesine ait alt ve üst sınırları Şekil 5'te resmedilmiştir.



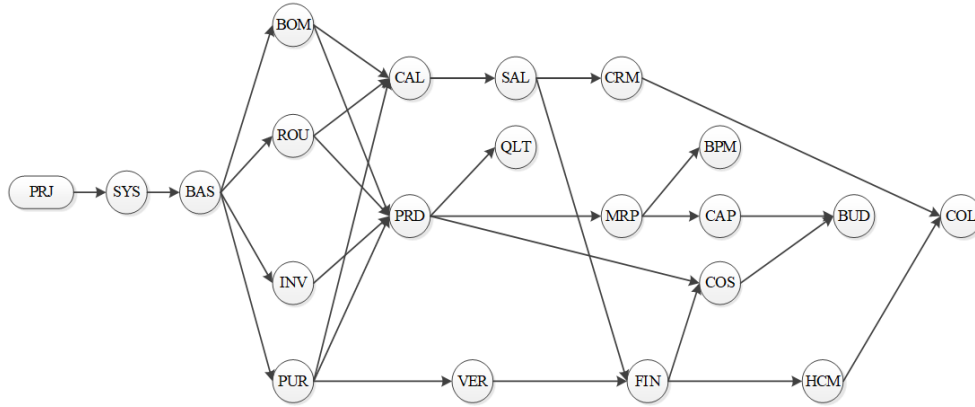
Şekil 3. KKP uyarılama projelerinde modül devreye alma süreci (Process of module start-up in ERP implementation projects)

**Tablo 3.** Bir KKP uyarılma projesinin modül devreye alma sürecine ait aktivite tanımları ve uygulama çalışmasına ait veriler (Activity descriptions for module start-up process of an ERP implementation project and data in the case study)

Aktivite (Modül) tanımları	Aktivite öncülleri	Aktivite süresi (gün)	En erken bitiş zamanı (EFT)	En geç bitiş zamanı (LFT)	Minimum İnsan Kaynağı Gereklinimi (adam x gün)				
					Fonksiyonel danışman	Teknik danışman	Eğitim danışmanı	Süreç danışmanı	Çözüm ortağı danışmanı
1. Proje Hazırlığı (PRJ)	-	[7, 10]	[7,10]	[72, 106]	[3, 5]	[4, 7]	[1, 2]	[4, 8]	[2, 3]
2. Sistem Yönetimi (SYS)	1	[4, 6]	[11, 16]	[76, 112]	[4, 6]	[2, 3]	[1, 2]	[3, 4]	[2, 4]
3. Temel Veriler (BAS)	2	[11, 16]	[22, 32]	[87, 128]	[5, 8]	[3, 5]	[2, 3]	[4, 6]	[3, 4]
4. Ürün Ağacı Yönetimi (BOM)	3	[3, 5]	[25, 37]	[95, 138]	[2, 3]	[1, 2]	[1, 2]	[2, 3]	-
5. Rota Yönetimi (ROU)	3	[4, 7]	[26, 39]	[95, 138]	[3, 5]	-	[0, 1]	[2, 4]	-
6. Envanter Yönetimi (INV)	3	[10, 12]	[32, 44]	[111, 156]	[4, 5]	[2, 3]	[2, 3]	[3, 4]	[1, 2]
7. Satınalma Yönetimi (PUR)	3	[8, 10]	[30, 42]	[95, 138]	[3, 6]	[0, 2]	[1, 2]	[2, 5]	-
8. Fatura Kontrol (VER)	7	[2, 4]	[32, 46]	[111, 161]	[1, 2]	[0, 1]	[0, 1]	[1, 2]	-
9. Standart Maliyet (CAL)	4-5-7	[3, 5]	[33, 47]	[98, 143]	[1, 3]	[1, 2]	[1, 2]	[0, 1]	-
10. Satış Yönetimi (SAL)	9	[13, 18]	[46, 65]	[111, 161]	[5, 7]	[3, 5]	[2, 3]	[5, 8]	[2, 3]
11. Müşteri İlişkileri Yönetimi (CRM)	10	[6, 9]	[52, 74]	[134, 189]	[3, 4]	[3, 5]	[1, 2]	[0, 2]	-
12. Üretim Planlama ve Kontrol (PRD)	4-5-6-7	[10, 15]	[42, 59]	[121, 171]	[5, 8]	[3, 6]	[2, 3]	[4, 8]	[1, 2]
13. Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP)	12	[5, 8]	[47, 67]	[126, 179]	[4, 6]	[2, 3]	[2, 3]	[3, 5]	[1, 2]
14. Kalite Yönetimi (QLT)	12	[4, 6]	[46, 65]	[136, 193]	[2, 3]	[0, 1]	[1, 2]	[1, 3]	-
15. Kapasite Planlama ve Çizelgeleme (CAP)	13	[4, 7]	[51, 74]	[130, 186]	[3, 4]	[2, 3]	[1, 2]	[2, 3]	[0, 1]
16. Genel Muhasebe ve Finansman (FIN)	8-10	[13, 16]	[59, 81]	[124, 177]	[7, 10]	[5, 8]	[2, 3]	[2, 3]	[3, 4]
17. Fiili Maliyet (COS)	12-16	[6, 8]	[65, 89]	[130, 186]	[5, 8]	[4, 6]	[2, 3]	[4, 8]	[2, 3]
18. Genel Bütçe Yönetimi (BUD)	15-16-17	[6, 7]	[71, 96]	[136, 193]	[3, 4]	-	[0, 1]	[2, 3]	-
19. İnsan Kaynakları Yönetimi (HCM)	16	[10, 12]	[69, 93]	[134, 189]	[6, 8]	[4, 6]	[2, 3]	[5, 8]	[1, 2]
20. İletişim Yönetimi (COL)	11-19	[2, 4]	[71, 97]	[136, 193]	[1, 2]	-	[0, 1]	[0, 1]	-
21. İş Süreçleri Yönetimi (BPM)	13	[5, 8]	[52, 75]	[136, 193]	[2, 4]	[2, 3]	-	[1, 3]	[0, 1]

**Tablo 4.** Proje süresince insan kaynağına ait etkinlik ve güvenilirlik faktörleri  
(Efficiency and reliability factors for the human resources throughout the project)

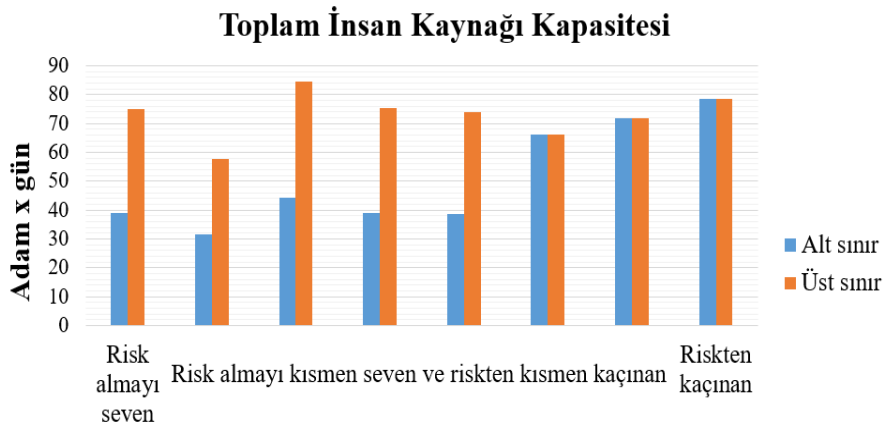
KKP Yazılım Modülü	İnsan Kaynağına İlişkin Etkinlik Faktörü (%)				
	Fonksiyonel danışman	Teknik danışman	Eğitim danışmanı	Süreç danışmanı	Çözüm ortağı danışmanı
PRJ	[80, 100]	[85, 95]	[90, 100]	[80, 90]	[85, 100]
SYS	[70, 90]	[75, 90]	[70, 90]	[90, 100]	[80, 95]
BAS	[85, 100]	[90, 100]	[90, 100]	[90, 100]	[80, 100]
BOM	[80, 100]	[90, 100]	[100, 100]	[90, 100]	-
ROU	[90, 100]	-	[100, 100]	[95, 100]	-
INV	[75, 95]	[80, 90]	[85, 95]	[85, 95]	[80, 95]
PUR	[70, 90]	[80, 95]	[90, 100]	[90, 100]	-
VER	[80, 95]	[75, 90]	[90, 100]	[85, 100]	-
CAL	[80, 100]	[80, 100]	[85, 100]	[80, 95]	-
SAL	[90, 100]	[100, 100]	[90, 100]	[85, 95]	[90, 100]
CRM	[80, 95]	[80, 90]	[95, 100]	[75, 90]	-
PRD	[80, 100]	[85, 95]	[75, 90]	[85, 100]	[85, 95]
MRP	[75, 90]	[70, 90]	[70, 95]	[80, 95]	[80, 95]
QLT	[80, 90]	[85, 95]	[85, 100]	[85, 100]	-
CAP	[85, 95]	[100, 100]	[75, 95]	[75, 90]	[75, 95]
FIN	[90, 100]	[85, 100]	[95, 100]	[85, 100]	[90, 100]
COS	[70, 90]	[70, 95]	[85, 95]	[80, 95]	[85, 100]
BUD	[80, 90]	-	[90, 100]	[80, 95]	-
HCM	[85, 100]	[80, 90]	[95, 100]	[90, 100]	[90, 100]
COL	[90, 100]	-	[95, 100]	[90, 100]	-
BPM	[80, 95]	[75, 90]	-	[85, 95]	[95, 100]
Güvenilirlik Faktörü (%)	[80, 95]	[70, 95]	[80, 100]	[75, 90]	[70, 90]

**Şekil 4.** KKP uyarlama projelerinde modül devreye alma sürecine ait proje ağı  
(Activity on node project network for the module start-up process of an ERP implementation project)**Tablo 5.** Riskle karşı duyarlılığı farklı proje yöneticileri için elde edilen kazanç matrisleri ve eniyileme detayları (Payoff matrices and optimization details according to the different risk attitudes of the project managers)

Hedef	Risk almayı seven ( $\Delta = \theta = \alpha = \beta = 1$ )		Riski kısmen seven ( $\Delta = \theta = 0, \alpha = \beta = 1$ )		Riskten kısmen kaçınan ( $\Delta = \theta = \sqrt{2}, \alpha = \beta = 0$ )		Riskten kaçınan ( $\Delta = \theta = \alpha = \beta = 0$ )	
	PT	IKK	PT	IKK	PT	IKK	PT	IKK
PT	[71, 97]	[45,3, 84,5]	[74, 97]	97,5	94	[52,4, 97,5]	97	112,6
IKK	[174, 193]	[25,4, 46,4]	[188, 193]	53,6	193	[35,5, 66,1]	193	54,84
Çözüm süresi	196,03 sn,	63853,29	164,15	70242,5	214,3	63402,97	190,3	70105,72
Toplam değişken sayısı = 782245								
Toplam ikili (tamsayı) değişken sayısı = 159252								
Toplam kısıt sayısı = 391151								

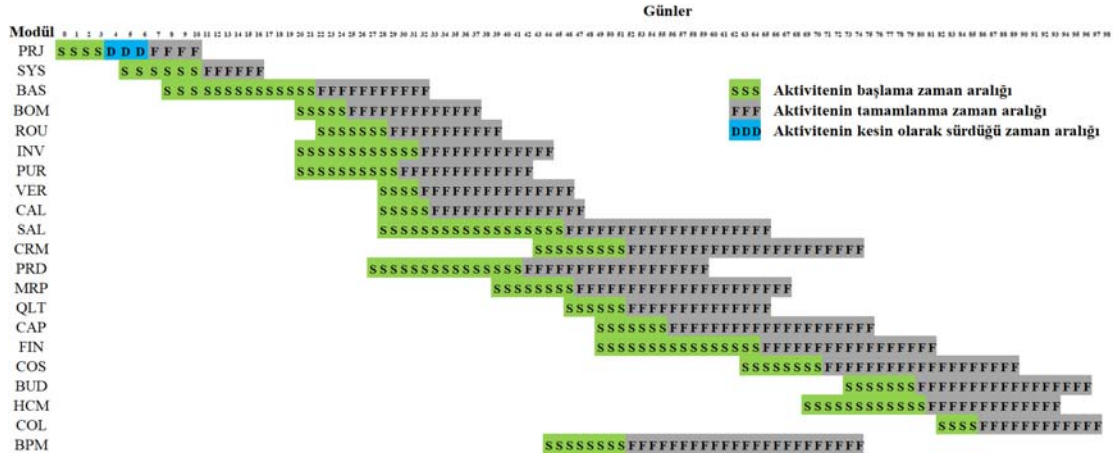
**Tablo 6.** Risk iştahları farklı proje yöneticileri için elde edilen proje çizelgeleri ve gerekli insan kaynağı kapasiteleri (The results of the project schedules and needed human resource amounts for different risk appetites of the project managers)

KKP Yazılım Modülleri	Risk almayı seven proje yöneticisi ( $\Delta = \theta = \sqrt{2}$ , $\alpha = \beta = 1$ )	Risk almayı kısmen seven ve riskten kısmen kaçınan proje yöneticileri						Riskten kaçınan proje yöneticisi ( $\Delta = \theta = 0$ , $\alpha = \beta = 0$ )
		( $\Delta = \sqrt{2}, \theta = 0$ , $\alpha = \beta = 1$ )	( $\Delta = \sqrt{2}, \theta = 0$ , $\alpha = 1, \beta = 0$ )	( $\Delta = \theta = 0$ , $\alpha = \beta = 1$ )	( $\Delta = \theta = \sqrt{2}$ , $\alpha = \beta = 0$ )	( $\Delta = \sqrt{2}, \theta = 0$ , $\alpha = \beta = 0$ )	( $\Delta = \theta = 0$ , $\alpha = 0, \beta = 1$ )	
PRJ	[7, 10]	[10, 10]	[10, 10]	[10, 10]	[7, 10]	[10, 10]	[10, 10]	[10, 10]
SYS	[11, 16]	[14, 16]	[14, 16]	[14, 16]	[13, 14]	[16, 16]	[16, 16]	[16, 16]
BAS	[22, 32]	[25, 32]	[26, 32]	[25, 32]	[29, 29]	[32, 32]	[32, 32]	[32, 32]
BOM	[25, 37]	[28, 37]	[31, 39]	[28, 37]	[34, 34]	[37, 37]	[37, 37]	[37, 37]
ROU	[29, 39]	[29, 39]	[36, 39]	[29, 39]	[41, 41]	[39, 39]	[46, 47]	[49, 49]
INV	[32, 44]	[35, 44]	[37, 44]	[35, 44]	[41, 41]	[51, 53]	[47, 47]	[49, 49]
PUR	[30, 42]	[37, 42]	[43, 43]	[37, 42]	[39, 39]	[42, 42]	[42, 42]	[42, 42]
VER	[32, 46]	[46, 46]	[47, 49]	[42, 46]	[43, 43]	[46, 46]	[47, 47]	[46, 46]
CAL	[33, 47]	[44, 47]	[48, 48]	[40, 47]	[46, 46]	[47, 47]	[51, 51]	[54, 54]
SAL	[46, 65]	[65, 65]	[66, 66]	[65, 65]	[64, 64]	[65, 65]	[75, 75]	[82, 82]
CRM	[52, 74]	[72, 74]	[75, 75]	[71, 74]	[97, 97]	[74, 75]	[84, 84]	[107, 108]
PRD	[42, 59]	[47, 59]	[54, 59]	[47, 59]	[56, 57]	[66, 66]	[62, 62]	[64, 64]
MRP	[47, 67]	[52, 67]	[62, 67]	[52, 67]	[64, 64]	[74, 74]	[70, 71]	[81, 82]
QLT	[52, 65]	[63, 65]	[69, 69]	[56, 69]	[70, 70]	[73, 73]	[79, 79]	[73, 73]
CAP	[56, 75]	[69, 74]	[83, 83]	[71, 74]	[77, 77]	[81, 82]	[84, 84]	[88, 88]
FIN	[65, 81]	[85, 86]	[87, 87]	[84, 84]	[80, 81]	[90, 91]	[97, 99]	[98, 98]
COS	[71, 89]	[96, 96]	[99, 99]	[99, 99]	[88, 90]	[98, 100]	[105, 105]	[118, 118]
BUD	[80, 96]	[109, 109]	[106, 108]	[105, 108]	[96, 96]	[107, 107]	[121, 122]	[126, 126]
HCM	[81, 93]	[106, 106]	[101, 103]	[109, 109]	[109, 109]	[110, 111]	[115, 116]	[110, 111]
COL	[86, 97]	[109, 112]	[109, 114]	[111, 113]	[113, 113]	[119, 119]	[119, 119]	[116, 116]
BPM	[52, 75]	[58, 75]	[71, 76]	[61, 75]	[89, 89]	[89, 89]	[78, 78]	[96, 97]
İnsan kaynağı kapasitesi	[38.8, 75.1]	[31.63, 57.7]	[44.26, 84.41]	[66.1, 66.1]	[38.8, 75.25]	[38.57, 74.14]	[71.9, 71.9]	[78.5, 78.5]
Ardıştırma sayısı	55659163	39614107	30900646	39782339	46433217	63769074	60543123	36211047
Çözüm süresi (sn.)	40849.09	73984.34	59771.75	68549.57	61624.13	60051.04	56926.4	35774.26

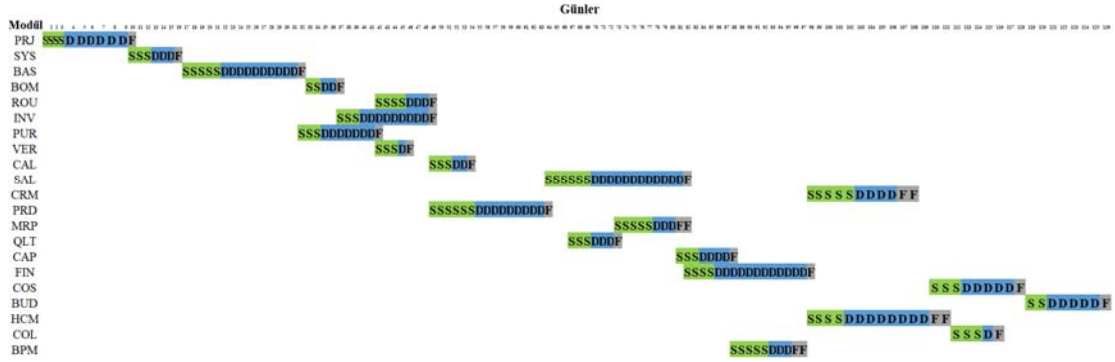
**Şekil 5.** Proje yöneticilerinin risk iştahına göre gerekli toplam insan kaynağı kapasite aralıkları (Intervals of the required total human resource capacities according to the project manager's risk appetite)

Ayrıca, riskli seven ve riskten kaçınan proje yöneticileri için elde edilen proje çizelgelerine ait Gantt şemaları, Şekil 6-Şekil 7'de sırasıyla sunulmuştur. Sunulan proje çizelgelerinin uygulanabilmesi için gerekli olan farklı türden insan kaynağı kapasite detaylarına Şekil 8'de yer verilmiştir. Son olarak, tüm risk durumlarını içeren ve risk durumlarından bağımsız, fonksiyonel danışmana ait insan

kaynağı profilleri, riskli seven ve riskten kaçınan proje yöneticileri için sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur. İnsan kaynağı profilleri oluşturulurken, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen proje çizelgeleri (aktivitelerin başlama ve bitiş zaman aralıkları) ile Tablo 3'te sunulan insan kaynağı gereksinimlerine ait üst sınırlar dikkate alınmıştır. Uzlaşık programlamanın uygulanması ile fonksiyonel danışmana ait

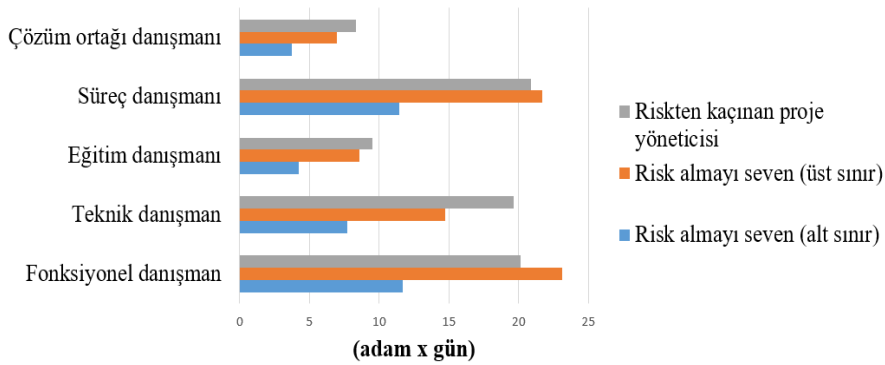


Şekil 6. Riski seven proje yöneticisi için belirsizlik düzeyi yüksek proje çizelgesine ait Gantt şeması (Gantt chart of the highly uncertain project schedule for risk-seeking project manager)



Şekil 7. Riskten kaçınan proje yöneticisi için belirlilik düzeyi yüksek proje çizelgesine ait Gantt şeması (Gantt chart of the highly certain project schedule for the risk-averse project manager)

### Proje Ekibi İçerisinde Farklı İnsan Kaynağı Kapasiteleri Detayı

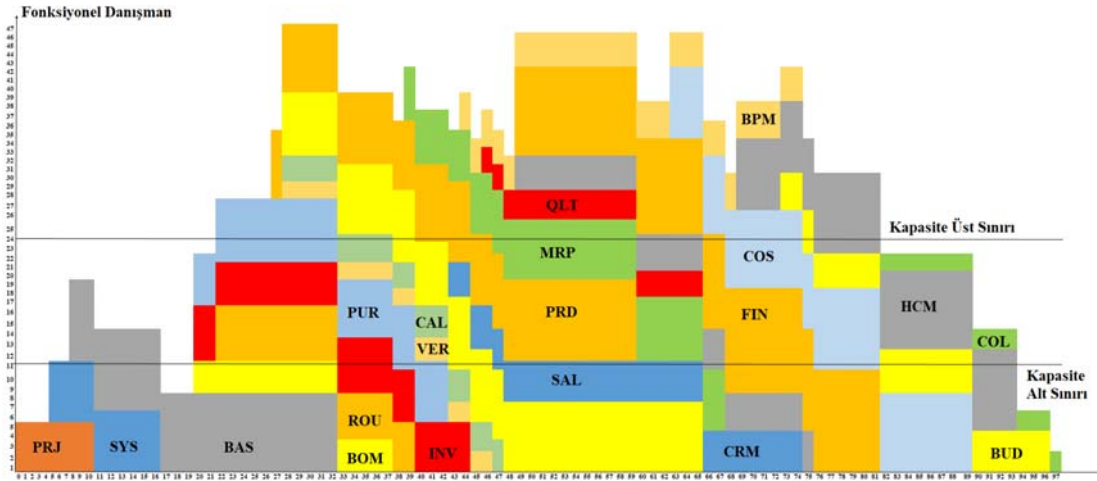


Şekil 8. Proje yöneticilerinin risk iştahına göre gerekli olan farklı türden insan kaynağı kapasite aralıkları (Intervals of the different types of human resource capacities according to the project manager's risk appetite)

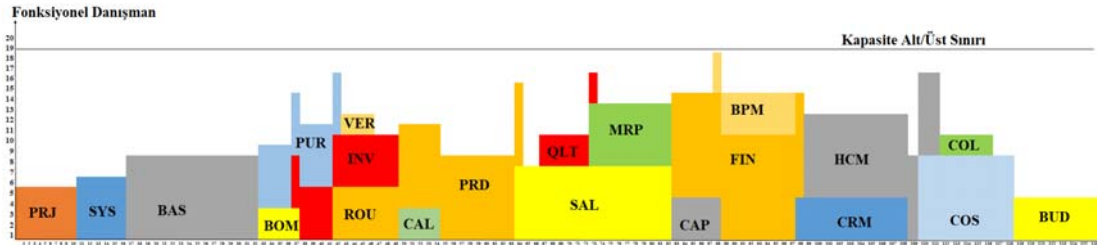
ihtiyaç duyulan insan kaynağı kapasitesinin alt/üst sınırları, riski seven ve riskten kaçınan proje yöneticileri için sırasıyla, [11.7, 23.13] ve [18.14, 18.14] olarak elde edilmiştir.

Tablo 5 ve 6'da görüldüğü üzere, önerilen yaklaşım ile riskten kaçınan proje yöneticileri için deterministik proje çizelgeleri elde edilirken, riski seven proje yöneticileri için

ise belirsizlik düzeyi nispeten yüksek aralık sayılar ile temsil edilen proje çizelgeleri üretilmiştir. Riskten kaçınan veya kısmen kaçınan proje yöneticileri, belirsizlik içeren çözümler arzu etmediğinden, elde edilen çizelgeler deterministik veya belirsizlik düzeyleri göreceli olarak daha düşüktür. Tablo 6'ya göre, proje yöneticisinin riske karşı duyarlılığı arttıkça, projenin tamamlanma süresi uzamakta



Şekil 9. Riski seven proje yöneticileri için tüm risk durumlarını içeren insan kaynağı profili  
(The human resource profile with all of the risky situations for a risk seeking project manager)



Şekil 10. Riskten kaçman proje yöneticileri için riskten bağımsız insan kaynağı profili  
(The human resource profile without any risky situation for a risk-averse project manager)

ve aktiviteler için ise deterministik tamamlanma süreleri elde edilmektedir. Ayrıca, Tablo 6 ve Şekil 5'te görüldüğü üzere, proje boyunca gereksinim duyulacak toplam insan kaynağı kapasitesi, riskli seven veya kısmen seven proje yöneticileri için belirsizlik düzeyi nispeten yüksek aralık sayıları iken; riskten kaçınan proje yöneticileri için ise deterministik ancak göreceli olarak daha fazladır. Şekil 8'e göre, proje boyunca en fazla ihtiyaç duyulacak insan kaynağı kapasitesi, fonksiyonel ve süreç danışmanlarına aittir. Başarılı bir KKP yazılım uyarlaması, yazılım tedarikçisi ve işletme tarafında yer alan bu danışmanların doğru belirlenmesine bağlıdır. Sonuç olarak, riskli seven proje yöneticileri için göreceli olarak daha kısa proje tamamlanma süreleri ve daha az insan kaynağı kapasite gereksinimi elde edilmiş olsa da, elde edilen çözümler kaynak kapasitesinin aşılması ve öncelik ilişkilerinin sağlanamaması gibi riskleri içeren, belirsizlik düzeyleri yüksek ve uyarlama sürecinde güvenilir olmayan çözümlerdir. Riskli sevmeyen proje yöneticileri için ise daha güvenilir, kesinlik içeren ve hiçbir risk unsurunu taşımayan ancak daha uzun tamamlanma sürelerine ve daha fazla insan kaynağı kapasitesine ihtiyaç duyan çözümler elde edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Günümüzde KKP kurulum ve uyarlama projelerinin başarısı, proje ortamının hâkim olduğu belirsizlik ve risk durumlarının etkin bir şekilde ele alınabilmesi ve insan kaynağı ile uzman desteğinin efektif bir şekilde

kullanılabilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, bu çalışmada tamamen belirsiz çok amaçlı KKP uyarlama projelerinin insan kaynağı kısıtı altında modellenmesi ve çözümü ele alınmıştır. KKP yazılım modüllerinin devreye alınması sürecinde, aktivite süreleri ve insan kaynağı gereksinimleri gibi tüm proje parametrelerinin belirsizlik içerdiği bir ortamda, proje yöneticilerinin risk iştahları doğrultusunda belirsizlik düzeyleri farklı çizelge alternatifleri üretebilen aralık programlama temelli bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımında, klasik KKPC problemi farklı olarak, farklı türden insan kaynağı kapasiteleri karar değişkeni olarak tanımlanmış ve insan kaynağına ilişkin etkinlik ve güvenilirlik faktörleri dikkate alınabilmiştir. Önerilen yaklaşımın karar değişkenlerine (aktivitelerin tamamlanma zaman aralıkları) ait belirsizlikleri dikkate alabilen bir dönüştürme yöntemi olması sayesinde, belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürme esnasında yaşanabilecek bilgi kayıplarının önüne geçilebilmektedir. Ancak, dolaylı bir çözüm yöntemi olması (direkt çözüm yöntemi olmayışı), dolayısıyla da dönüştürme sonrasında kısıt/değişken sayısındaki artışın, model boyutunu ve çözüm süresini artırması, önerilen yaklaşımın dezavantajlarıdır. Son olarak, önerilen yaklaşım, Türkiye menşeli uluslararası bir KKP yazılım tedarikçisine ait örnek bir uyarlama projesi üzerinde test edilerek, risk iştahları farklı proje yöneticileri için alternatif proje çizelgeleri ve insan kaynağı kapasiteleri elde edilmiştir. Gelecekte, önerilen yaklaşımın bir çözümleme algoritmasına dönüştürülerek, meta-sezgisel algoritmaların kullanımıyla beraber bir direkt çözüm

yöntemi elde edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, proje aktivite sürelerinin, aktivitelere atanan insan kaynağı miktarına bağlı olarak değiştiği ve farklı görev, sorumluluk ve beceriye sahip insan kaynağının aktivite süreleri üzerinde farklı etkilere sahip olduğu bir KKP proje çizelgeleme probleminin modellenmesi ve çözümü, gelecekte yapılması hedeflenen çalışmalar arasındadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Vandaie R., The role of organizational knowledge management in successful ERP implementation projects, *Knowledge-Based Systems*, 21 (8), 920-926, 2008.
2. Bernroider E.W.N., Wong C.W.Y., Lai K.H., From dynamic capabilities to ERP enabled business improvements: The mediating effect of the implementation project, *International Journal of Project Management*, 32 (2), 350-362, 2014.
3. Motwani J., Mirchandani D., Madan M., Gunasekaran A., Successful implementation of ERP projects: Evidence from two case studies, *International Journal of Production Economics*, 75 (1-2), 83 – 96, 2002.
4. Plaza M., Balancing the costs of human resources on an ERP project, *Omega*, 59, 171-183, 2016.
5. Hartmann S., Briskorn D., A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 207 (1), 1-14, 2010.
6. Atli O., Kahraman C., Fuzzy resource-constrained project scheduling using taboo search algorithm, *International Journal of Intelligent Systems*, 27 (10), 873-907, 2012.
7. Atli O., Kahraman, C., Resource-constrained project scheduling problem with multiple execution modes and fuzzy/crisp activity durations, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26(4), 2001-2020, 2014.
8. Yousefli A., A fuzzy ant colony approach to fully fuzzy resource constrained project scheduling problem, *Industrial Engineering & Management Systems*, 16 (3), 307-315, 2017.
9. Subulan K., Fully uncertain resource constrained project scheduling problem via interval programming: a real-life application in a LNG storage tank construction, 2nd International Conference on Economics Business Management and Social Sciences, Belgrade-Serbia, 10-14 May 2017.
10. Subulan K., An interval programming based approach for fully uncertain resource-constrained project scheduling problem considering project manager's attitude toward risk, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25 (4), 481-497, 2019.
11. Yamashita, D.S., Armentano, V.A., Laguna, M., Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost, *Journal of Scheduling*, 10(1), 67-76, 2007.
12. Artigues, C., Leus, R., Nobibon, F.T., Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25, 175-205, 2013.
13. Xiong, J., Liu, J., Chen, Y., Abbass, H.A., A knowledge-based evolutionary multiobjective approach for stochastic extended resource investment project scheduling problems, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(5), 742-763, 2014.
14. Li, H., Womer, N.K., Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming, *European Journal of Operational Research*, 246, 20-33, 2015.
15. Chakraborty, R.K., Sarker, R.A., Essam, D.L., Resource constrained project scheduling with uncertain activity durations, *Computers & Industrial Engineering*, 112, 537-550, 2017.
16. Tao S., Dong Z.S., Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with alternative project structures, *Computers & Industrial Engineering*, 125, 333-347, 2018.
17. Uysal, F., İşleyen, S.K., Çetinkaya, C., Resource constrained project scheduling with stochastic resources, *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 5(1), 39-49, 2018.
18. Rostami, S., Creemers, S., Leus, R., New strategies for stochastic resource-constrained project scheduling, *Journal of Scheduling*, 21(3), 349-365, 2018.
19. Bhaskar, T., Pal, M.N., Pal, A.K., A heuristic method for RCPSp with fuzzy activity times, *European Journal of Operational Research*, 208, 57-66, 2011.
20. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Rozenberg I., Resource-constrained project scheduling approach under fuzzy conditions. *Procedia Computer Science*, 77, 56 – 64, 2015.
21. Xu, Z., Zhang, Z., A fuzzy random resource-constrained scheduling model with multiple projects and its application to a working procedure in a large-scale water conservancy and hydropower construction project, *Journal of Scheduling*, 15, 253-272, 2012.
22. Zhang Z., A MODM bi-level model with fuzzy random coefficients for resource-constrained project scheduling problems. *Seventh International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO)*, July, China, 2014.
23. Xu, J., Feng C., Multimode resource-constrained multiple project scheduling problem under fuzzy random environment and its application to a large scale hydropower construction project, *The Scientific World Journal*, Article ID 463692, pp. 1-20, 2014.
24. Chen L., Zhang Z., Preemption resource-constrained project scheduling problems with fuzzy random duration and resource availabilities, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(6), 373-382, 2016.
25. Alipouri Y., Sebt M.H., Ardeshir A., Zarandi M.H.F., A mixed-integer linear programming model for solving fuzzy stochastic resource constrained project scheduling problem, *Operational Research*, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12351-017-0321-x>.
26. Alipouri Y., Sebt M.H., Ardeshir A., Chan W.T., Solving the FS-RCPSp with hyper heuristics: A policy-driven approach, *Journal of the Operational Research Society*, 70 (3), 403-419, 2019.



27. Javanmard, S., Afshar-Nadjaf B., Niaki S.T.A., Preemptive multi-skilled resource investment project scheduling problem: Mathematical modelling and solution approaches, *Computers and Chemical Engineering*, 96, 55-68, 2017.
28. Zhu X., Ruiz R., Li S., Li X., An effective heuristic for project scheduling with resource availability cost. *European Journal of Operational Research*, 257(3), 746-762, 2017.
29. Merrikhi E., Najafi A.B., Shahsavari A., Project resource investment problem under progress payment model, *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(3), 84-101, 2018.
30. Pritsker A., Watters L., Wolfe P., Multi-project scheduling with limited resources: a zero-one programming approach, *Management Science*, 16, 93-108, 1969.
31. Chang I.S., Tsujimura Y., Gen M., Tozawa T., An efficient approach for large scale project planning based on fuzzy Delphi method, *Fuzzy Sets and Systems*, 76 (3), 277-288, 1995.
32. Dawood H., *Theories of Interval Arithmetic: Mathematical Foundations and Applications*, LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2011.
33. Sengupta A., Pal T.K., On comparing interval numbers, *European Journal of Operational Research*, 127, 28-43, 2000.
34. Sengupta A., Pal T.K., Chakraborty D., Interpretation of inequality constraints involving interval coefficients and a solution to interval linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, 119, 129-138, 2001.
35. Baykasoğlu A., Subulan K., A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application, *Transportation Research Part E*, 95, 207-247, 2016.
36. Baker, K.R., *Optimization Modelling with Spreadsheets*, Wiley & Sons Inc., New Jersey, ABD, 2015.
37. Chinneck J.W., Ramadan K., Linear programming with interval coefficients, *Journal of the Operational Research Society*, 51 (2), 209-220, 2000.
38. Klir GJ., *Fuzzy arithmetic with requisite constraints*, *Fuzzy Sets Systems*, 91, 165-175, 1997.
39. Lodwick WA., *Constrained interval arithmetic*, Department of Mathematics, Colorado University, USA, CCM Report, 138, 1999.
40. Baykasoğlu A., Subulan K., Constrained fuzzy arithmetic approach to fuzzy transportation problems with fuzzy decision variables, *Expert Systems with Applications*, 81, 193-222, 2017.
41. Yang H., Project team right-sizing for the successful ERP implementation, *Procedia Computer Science*, 91, 672 - 676, 2016.
42. Karadede A., Baykoç Ö.F., Problems faced by enterprises after enterprise resource planning (ERP) implementations, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (1), 137-149, 2006.
43. Ehie I.C., Madsen M., Identifying critical issues in enterprise resource planning (ERP) implementation, *Computers in Industry*, 56 (6), 545 - 557, 2005.
44. Canias ERP 6.04 Modüller. [https://www.caniaserp.com/\\_userfiles/images/teknoloji/canias-erp-6-03moduller.pdf](https://www.caniaserp.com/_userfiles/images/teknoloji/canias-erp-6-03moduller.pdf). Erişim tarihi Ocak 24, 2019.

