

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035301 (586-605)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035301 (586-605)

DOI: 10.35414/akufemubid.864896

Araştırma Makalesi / Research Article

## Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemlerinin Belirsizlik Ortamında Modellenmesi

Ömer ATLI<sup>1</sup>, Serhat AYDIN<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Milli savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.<sup>2\*</sup> Milli savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.e-posta: oatli@hho.msu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4861-5587>\*Sorumlu yazar: saydin3@hho.msu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0861-8297>

Geliş Tarihi: 19.01.2021

Kabul Tarihi: 28.06.2021

### Anahtar kelimeler

Proje çizelgeleme;  
Bulanık çok modlu  
kaynak kısıtlı proje  
çizelgeleme; Tabu  
arama algoritması;  
Bulanık mantık.

### Öz

Bu çalışmada, belirsizlik ortamında proje süreçlerinin çizelgenmesine olanak tanıyan bulanık etkinlik sürelerinden oluşan çok modlu, kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri incelenmiştir. Proje çizelgeleme problemlerinin çözümü için Microsoft C# programlama dili kullanılarak "Proje Çizelgeleme Programı" olarak isimlendirilen bir paket program geliştirilmiş, literatürde Proje Çizelgeleme Problemleri Kütüphanesi (PSPLib) olarak bilinen örnek problem setleri üzerinde test edilerek çıktı sonuçları kıyaslanmıştır. Kaynak kısıtlı bulanık çok modlu proje çizelgeleme problemleri, geliştirilen program ile çözülerek toplam proje süreleri ve toplam çizelgeleme maliyetleri en küçüklenmektedir.

## Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Under Fuzzy Environment

### Keywords

Project scheduling;  
Multi-Mode resource-  
constrained project  
scheduling; Tabu  
Search Algorithm;  
Fuzzy Logic.

### Abstract

In this paper, we consider multi-mode resource-constrained project scheduling problems with multiple execution modes for each activity under uncertainty conditions. A software package named as "Project Scheduling Programming" was developed by using Microsoft C# and its performance was tested on some sample projects and PSPLib data sets. Project scheduling problems defined with constrained resources and uncertainty issues can be solved by Project Scheduling Software in order to minimize total project makespan and scheduling cost.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Bir projenin başarılı olabilmesi için, etkinlik sürelerinin ve maliyet belirsizliklerinin uygun şekilde yönetilmesi, projenin hedeflenen süre ve maliyetle tamamlanması gereklidir. Literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde proje yönetiminde belirsizliklerin modellenmesi konusunda birçok çalışmanın olasılık teorisinin kullanımına dayanmakta olduğu görülmektedir. Ancak belirsizliğin modellenmesine olanak sağlayan bulanık mantık teorisi, son yıllarda proje yönetiminin temel dayanak noktalarından biri olmaya başlamış ve projelerdeki belirsizliğin ele alınmasında etkili bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bulanık mantık, uzman görüşlerini esas

alan bulanık üyelik fonksiyonları aracılığıyla projedeki zaman ve maliyet belirsizliklerini kaynak kısıtları altında modellemeye ve modelin etkin bir şekilde çözülmesini amaçlanmaktadır. Gerçek hayat problemlerinde kesin bilgiye ulaşmanın zorluğu ve maliyetinin oldukça fazla olması bu problemlerin çözümünde deterministik tekniklerin kullanılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca, her bir projenin kendine özgü olması ve tekrarlanmıyor olması nedeniyle tarihsel veriler oluşturulamamasından dolayı stokastik tekniklerin bu tür çalışmalarda kullanılmasında başarılı sonuçlar elde edilememesine neden olmaktadır. Bulanık mantık, proje çalışmalarında etkinlik sürelerinin istatistiksel olarak hesaplanması için yeterli veri olmadığı

durumlarda bile uzman görüşlerine başvurarak etkinlik sürelerini hesaplayabilmesi, maliyetleri uzman görüşlerine bağlı olarak belirleyebilmesi, proje uygulamalarında iyi sonuç elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Proje yönetimi temel olarak projenin hedeflerine ulaşması için planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinin birlikte ele alındığı faaliyetler bütünüdür. Proje çizelgeleme problemleri birtakım kısıtlar altında en kısa zamanda veya en az maliyetle projelerin tamamlanmasını amaçlayan çizelgeleme problemi (Kurt, 2018). Literatürde bir çok proje çizelgeleme problemi türü vardır. Proje çizelgeleme problemlerindeki türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Özdamar ve Ulusoy,1994)

- Tek modlu klasik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (KKPÇ) problemleri,
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli KKPÇ problemleri
- Çok modlu KKPÇ (ÇM-KKPÇ) problemleri
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli çok modlu KKPÇ problemleri
- Minimum ve maksimum zaman gecikmeli kaynak yatırım problemleridir.

Genel KKPÇ problemleri karakteristikleri bakımından incelendiğinde; proje sayısı, mod sayısı, kaynak tüketimi ve kesilebilme durumuna göre sınıflandırılabilir. Proje sayısı bakımından; tek projeli veya çoklu proje modelleri gerçekleştirilebilir. KKPÇ problemleri, projenin işletim moduna göre tek modlu ve çok modlu olarak iki gruba ayrılabilir. Çok modlu grup projelerinde her bir etkinlik birkaç işletim modundan birinde gerçekleştirilebilir. Kaynak tüketimi bakımından projeler, kaynakların genel düzeyi sınırlı olmakla birlikte dönemsel olarak yenilenebilir veya tüm proje boyunca kısıtlı kalır. Buna ek olarak hem dönemsel olarak hem de proje süresi boyunca kısıtlı bulunan kaynaklar da mevcuttur. Kesilme durumuna göre, KKPÇ problemlerindeki etkinlikler kesilebilir veya kesilemez olmak üzere iki gruba ayrılır. Etkinliklerin kesilemez olduğu durumda, durdurulan etkinliklerin ilerleme düzeyi korunarak tekrar

sürdürülmesi mümkün olmadığından etkinliklerin kesilmesine izin verilmez. Kesilebilir etkinliklerin olduğu durumda ise, etkinlikler kesildikten sonra tekrar kaldığı yerden devam edebilir.

Proje yönetimi, büyük maliyetlerin ele alındığı, zaman tasarruflarına ihtiyaç duyulduğu ve problemlerin hesaplama karmaşıklığı henüz tam olarak çözülememiş olmaması nedeniyle üzerinde oldukça fazla çalışılan alanlardan biri olma özelliğini sürdürmektedir. Proje odaklı çalışan birçok kurum, kuruluş ve işletmeden derlenen bilgilere göre, projelerin %30'u hiçbir zaman bitirilememekte ve yılda 75 milyar dolar boşa harcanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, belirsizlik ortamında ele alınan kısıtlı kaynaklar altında bulanık çok modlu kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (BÇM-KKPÇ) problemlerinin modellenmesinde karmaşık tam sayılı doğrusal programlama tekniği kullanılmıştır. Önerilen modelin amaç fonksiyonu projenin toplam tamamlanma süresini minimize edecek şekilde kurulmuş ayrıca amaç fonksiyonu projenin toplam çizelgeleme maliyetini hesaplayabilecek şekilde modellenmiştir. Modelde farklı kaynak tipleri kullanılmıştır ve her dönemde proje için gereksinim duyulan kaynakların birim zamanda kullanım miktarlarının kısıtlı olduğu varsayılmıştır. Modelin amacı doğrultusunda kesin olmayan ve birbiri ile çelişkili bilgilerin olduğu proje verileri değerlendirmeye alınarak, uzman kararlarına dayalı olarak belirsizlik ortamının modellenmesi ve doğru kararların alınması hedeflenmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 1.1'de KKPÇ ve BÇM-KKPÇ problemleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 1.2'de Tabu arama algoritması açıklanmıştır. Bölüm 2'de Materyal ve Metot başlığıyla makalede kullanılan yöntem ve metodoloji açıklanmış, bulanık küme teorisi ile bulanık kümelerde aritmetik işlemler ve bulanık sayıların sıralama yöntemleri tanımlanmış ayrıca BÇM-KKPÇ problemlerinin tam sayılı matematiksel modeli ve yapılan varsayımlar açıklanmıştır. 3'üncü bölüm Uygulama ve Deneysel Çalışmalar başlığı altında BÇM-KKPÇ problemlerinin çözüm aşamaları

açıklanmıştır. Son bölümde, Tartışma ve Sonuç başlığı ile elde edilen bulgular ve gelecek çalışmalar tartışılmıştır.

### 1.1 Literatür Araştırması

KKPÇ problemlerinin NP-zor (polinom zamanda çözülemeyen problem) doğası nedeniyle literatürde çözüm yöntemleriyle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Problemin sayısal karmaşıklığı, çok sayıdaki olurlu çözümler arasından en iyi çözümün seçilmesi esasına dayanmaktadır. Gerçek hayat uygulamaları için öngörülebilir bir süre içinde en iyileme yöntemleriyle KKPÇ problemlerinin optimal çözümünün elde edilmesinin NP-zor olması, henüz genel kabul görmüş bir sezgisel yaklaşımın bulunmaması, gerçek hayat problemlerindeki değişkenlerinin oluşturduğu sayısal karmaşıklığın üstesinden gelebilecek bir matematiksel model geliştirilememiş olması nedeniyle problem üzerindeki araştırmalar halen sürmektedir. KKPÇ problemlerinin her bir sınıfı için temel sorun matematik faktöriyel ve kombinasyon teorilerinin hesaplanmasındaki yetersizlik ve bilgisayar teknolojilerindeki sınırlamalardan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, BÇM-KKPÇ problemleri ile ilgili yapılmış çalışmalardan bahsetmeden önce klasik KKPÇ modellerine yönelik literatürde yer alan çalışmalara yer verilmiştir. KKPÇ problemleriyle ilgili yapılan ilk çalışma öncelik kurallarına bağlı sezgisel yöntemler olup, Elsayed (1982) tarafından gerçekleştirilmiştir ve projenin en erken tamamlanma zamanının en küçüklenmesi için kaynakların etkinliklere dağılımını sağlayan ve her bir kaynak türünün şebekedeki dağılımını zamana bağlı kaynak kullanım tekniği (ROT-Resources Over Time) kriterine bağlı olduğunu göstermiştir.

Talbot (1982) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, etkinlik listesinde en yüksek önceliğe sahip işler öncelikle atanmakta ve en erken zamanda başlatılmaktadır. Eğer etkinlik, dikkate alınan zaman aralığı içinde atanamazsa, yöntem bir önceki öncüle geri dönmekte ve o etkinliğin daha geç bir zamanda

yapılması veya daha yavaş bir tempo ile gerçekleştirilebileceğini ortaya konulmuştur. Patterson (1984) gerçekleştirdiği çalışmada “En kısa işlem süresi” kuralını uygulamış ve toplam proje süresini minimize edecek bir model geliştirmiştir. Bu modelde etkinlik sayısını en fazla 30 olacak şekilde kısıtlamış, 110 farklı proje üzerinde önerdiği modeli uygulamış ve öncelik kurallarının çeşitli amaç fonksiyonlarına bağlı olarak etkinliklerini incelemiştir. Uygulamadaki varsayımları şu şekildedir; Kısıtlı kaynak kullanımı, kısıtlı zaman aralığı ve projelerin rassal başlama zamanı olduğu varsayımlarıdır. Çalışmasında farklı öncelik kurallarına göre sağlanan çözümleri kesin çözümlerle karşılaştırmış ve “En küçük toplam bolluk” kuralının çoğunlukla daha iyi sonuç verdiğini, ayrıca “En küçük toplam bolluk” ile “En küçük geç başlama” kurallarının aslında birbirlerinden farklı olmadıklarını ispatlamıştır. Brucker vd. (1999), tarafından yapılan çalışmada “Kesen düzlem yöntemi” ve “Dal-sınır yöntemi” gibi temel yöntemlerin KKPÇ problemlerinin çözümünde optimal sonuca ulaşmakta yetersiz kaldığını öne sürmüş ve özel sayılama yöntemiyle geliştirdikleri model ile çözüm etkinliğinin artırılması yönünde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Glover (1990a-1990b), Atlı (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile yasaklı arama (Tabu arama) tekniğinden faydalanarak yerel optime düşmekten kaçınmak için bir hafıza fonksiyonu kullanmış ve bu şekilde global optimumu hızlı bir şekilde aramada bir veya daha çok yerel arama yöntemini hiyerarşik olarak yönlendirebilen zeki bir arama tekniğini literatüre kazandırmıştır. Zaman vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, KKPÇ problemlerinin belirsizlik ortamında çözüm önerileri sunmuşlardır. Önerilen modelde KKPÇ problemlerinde etkinlik sürelerinin tam sayılı ve gerçek değerleri yerine belirsiz olduğu varsayımı altında kesin zaman aralıklarıyla modellenebileceği ve bu sebeple benzetim yöntemiyle çözülebileceği önerilmiştir. KKPÇ problemlerinin matematiksel modelleriyle kıyaslandığında benzetim tekniğinin en fazla 120 etkinlikten oluşan 1.600 çeşit test problemi üzerinde yapılan karşılaştırmada hesaplama zamanını önemli derecede azalttığı belirtilmiştir.

Rahman vd. (2020) tarafından, KKPÇ problemlerinin çözümünde memetik algoritmanın, geleneksel genetik algoritmanın bir uzantısı olarak erken yakınsama olasılığını azaltmak için yerel bir arama tekniği olarak kullanımını önermişlerdir. Memetik algoritmaların, evrimsel hesaplamada son zamanlarda büyüyen araştırma alanlarından birini temsil etmekte olduğunu ve KKPÇ problemlerinde etkin sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Arauj vd. (2020) tarafından kesme düzlemi algoritma ile KKPÇ problemlerinin çözülebileceğini önermişlerdir. Önerilen yöntem ile 754 çeşitli problem üzerinde orijinal doğrusal programlama formülasyonu ile çözülemeyen problemlerin çözülebildiği gösterilmiştir. Pellerin vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada yazarlar KKPÇ problemlerinin çözümü için yapılan literatürde hibrit yöntemlerle yapılan çalışmalara ilişkin makale incelemesi yapmışlardır.

Bulanık Kritik Yol Metodu (B-KYM)'na yönelik Chanas ve Kamburowski (1981), Yager (1981), Nasution (1994), Zimmermann (2001), Bouleimen ve Lecocq (2003), Atlı ve Kahraman (2013) tarafından yapılan çalışmalar ile projelerde, etkinlik sürelerinin deterministik veya probabilistik şekilde belirlenmesi yerine, bulanık üyelik fonksiyonlarının kullanılmasının daha pratik ve anlamlı olduğu gösterilmektedir.

B-KKPÇ yöntemlerine ilişkin geçmiş çalışmalar ise şu şekilde özetlenmiştir; Buckley (1985) proje etkinliklerinin bolluk, en erken başlama zamanı ve en geç başlama zamanını ile olasılık dağılımının tanımını vermiştir. Üçgensel olasılık dağılımına ve etkinlik sürelerine sahip proje süresi için olasılık dağılımlarını hesaplayan yeni bir algoritma önermiştir. Dubois ve Prade (1988), etkinlik bolluğu ve en geç başlangıç zamanının olası değer kümelerini hesaplamak için, sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Belirsizlik içeren bir ortamda, son etkinliğin en geç tamamlanma süresinden farklı bir değer tanımlanmasının gerekliliği kanıtlanmıştır. Chen ve Hsueh (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bulanık etkinlik zamanlarına sahip bir proje şebekesinde kritik yolun belirlenmesi PERT yaklaşımı ve bulanık mantık teorisini birleştiren yeni bir melez model geliştirilmiştir. Gerçekleştirdikleri

çalışmada üçgensel bulanık sayılar kullanılmış, ayrıca önerdikleri modelde yeni bir olasılık indeksi tanımlayarak projenin muhtemel tamamlanma süresini hesaplayan yeni bir algoritma önermişlerdir. Wang ve Huang (2010) çalışmalarında, bulanık programlama modellerini kullanarak kaynak kısıtlı yazılım geliştirme projesinin çizelgelenmesini sağlamışlardır. Model çözümü için genetik algoritma ve bulanık simülasyon birleştirilerek melez bir yöntem geliştirmişlerdir. Knyazevaa vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada B-KKPÇ problemlerinin kabul edilebilir hesaplama zamanında sezgisel bir yöntem kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Kassandra ve Suhartonob (2018) tarafından inşaat sektöründe B-KKPÇ problemlerinde üçgensel bulanık sayıların kullanımı üzerine hesaplamalar ateş böceği algoritması ile yapılabileceği önerilmiştir. Kulejewski vd. (2018) tarafından inşaat proje çizelgelemede bulanık küme teorisi yaklaşımını B-KKPÇ problemlerinin çözümü için kullanmışlardır. Önerilen modelde; yenilenebilir kaynak kullanım seviyelerinin belirlenmesi ve projelerin zaman aralığı bakımından müşterilerin memnuniyet derecesinin maksimizasyonu amaçlandığı belirtilmiştir. Birjandi ve Mousavi (2019) tarafından, B-KKPÇ problemlerinin çözümü için yeni bir bulanık karışık tam sayılı doğrusal olmayan bir model önerilmiştir. Ayrıca proje tamamlanma maliyetinin en küçüklenmesi için ikili parçacık süre optimizasyon tekniği ile melez meta sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemle genetik algoritma sonuçları karşılaştırılmıştır.

ÇM-KKPÇ modeller ve BÇM-KKPÇ yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir; Nasution (1994) bir olayın bolluğu ve en geç müsaade edilebilir başlama zamanı için operasyonel formüller sağlamıştır. Bu çalışmada, tanımlanan P ve Q tabloları kullanılarak ve KYM sırasına paralel olarak, bir etkinliğin bolluğu ve en geç izin verilebilir başlama zamanı için operasyonel formüller sağlanmıştır.

Bouleimen ve Lecocq (1998) önerdikleri tek modlu problemler için tanımlanan Tavlama Benzetimi Yaklaşımı'nı çok modlu problemlere uyarlamıştır. Modlar etkinliklerden ayrı bir liste olarak

tutulmaktadır. Etkinlik listesindeki yer değişimi ile yeni bir etkinlik listesinin türetilmesinden sonra rasgele bir etkinlik için mod değişikliği uygulanmıştır. Özdamar ve Ulusoy (1994), ÇM-KKPC problemleri için genetik algoritma yaklaşımın içeren yeni bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelde, ilki etkinlikler için atanmış moda ait, diğeri bir grup öncelik kuralı tarafından belirlenen ve bir kural numarası olan iki boyutlu bir kromozom yapısını kullanan kodlama yapısı kullanmışlardır. Mori ve Tseng (1997) gerçekleştirdikleri çalışmada yenilenebilir kaynakların bulunduğu ÇM-KKPC problemini ele almıştır. Çalışmalarında yeni bir genetik kodlama yapısı kullanmışlardır. Bu kodlama yapısı kromozomun her geninde bir etkinlik numarası, bu etkinlik için atanmış mod, çizelgeleme sırası ve başlama bitiş zamanları bilgilerini taşıyan bilgileri içermektedir. Önerdikleri bu modeli Drexl ve Grunewald'ın (1993) sunduğu stokastik yaklaşımla karşılaştırarak, önerdikleri kodlama yapısının daha iyi sonuçlar verdiğini ispatlamışlardır.

Hartmann (1998) çalışmasında yeni bir genetik algoritma yaklaşımı sunmuş ve çalışmasında hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen kaynakların bulunduğu bir model önermiştir. Bu çalışmada kromozom, öncüllük ilişkileri bakımından olurlu bir etkinlik sıralaması ve bu etkinlikler için seçilmiş birer modun bulunduğu bir kodlama ile sunulmaktadır. Drexl vd. (2000), etkinliklerin kesintili yapılabileceği varsayımıyla, ÇM-KKPC modelinin genel matematik formülasyonlarındaki kaynaklara ilave olarak kısmen yenilenebilir kaynaklar tanımlamıştır. Çözümün genişletilmiş simpleks yöntemi adı verilen seçeneklerle elde edilmesi esasına dayanan çok amaçlı doğrusal modeli geliştirilmiş ve çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bu yaklaşımda, işlem bölümlerinin sayısı kontrol edilememektedir. Elde edilen çözüm üzerinde, bölünme sayısını azaltan ve sınırlayan bir yöntem uygulanmaktadır. Zaman vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ÇM-KKPC problemlerinin çözümü için etkin bir melez algoritma uygulanması önerilmiştir. Önerilen melez algoritmanın, uygun modların belirlenmesi amacıyla doğrusal programla yaklaşımını temel aldığı ve daha sonra uygun çizelgeleri belirleyebilmek amacıyla ileriye ve geriye doğru çizelge ayarlama yaklaşımlarını modifiye etmişlerdir. İki sezgisel

yöntemin birlikte kullanımı ile literatürdeki büyük test problemleri üzerinde test ettiklerini ve önerilen yöntemin uygun çözümler üretebildiğini bildirmişlerdir. Bofill vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, KKPC ve ÇM-KKPC problemlerinin çözümü amacıyla Sağlanabilir (tatmin edilebilirlik) Modül teorisi (Satisfiability Modulo Theories (SMT) eşitliği kullanılmasını önermişlerdir. Yazarlar KKPC problemlerinin doğrusal tam sayılı aritmetik teorisi ile benzerliklerinin olduğu belirtilmiş ve kaynak kısıtlarında tamsayı değişkenler yerine boolean (Boolean Satisfiability (SAT) tipi değişkenler ile formüle edilmesinin hem mod seçiminde hem de kaynak kullanımında literatürdeki var olan çalışmalardan daha etkin sonuçlar verebileceğini göstermişlerdir. Sharma ve Trivedi (2020) yaptıkları çalışmada ÇM-KKPC problemlerinin çözümünde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik takasının etkisini belirleyecek bir meta sezgisel bir model önermişlerdir. Önerilen yöntem baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma yöntemini uyarlamışlardır. Yöntemde popülasyon için latin hiperküp örnekleme, kalite için analitik hiyerarşi prosesi ve parametreleri belirlemek için bulanık mantık kullanımı ile bahse konu zaman, maliyet, kalite ve güvenilirlik parametrenin eş zamanlı olarak etkinliğinin sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak öncelik kuralına bağlı sezgisel yöntemlerden ikisi, en küçük boşluk zamanı (MinSlack) ve zamana bağlı kaynak kullanım tekniği (Resource Over Time-ROT) öncelik kuralları dikkate alınmıştır. Modelin çözümünde Tabu arama algoritması kullanılmış, bu algoritmanın problemlerin çözümünde hem deterministik hem de bulanık ortamda etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Önerilen yöntemin temel algoritması Tabu arama algoritmasının temeline dayanmasından dolayı Bölüm 1.2'de Tabu arama algoritması kısaca açıklanmıştır. Önerilen yöntem farklı bulanık sayı üyelik fonksiyonları kullanılarak, yenilenebilir ve yenilenemeyen proje kaynaklarının mevcut olduğu durumlarda ve farklı proje teknik karmaşıklığı sayısal analizlerle çalıştırılarak test edilmiştir.

## 1.2 Tabu Arama Algoritması

Yerel arama teknikleri, mevcut çözüme ait komşu çözümlerin araştırılmasıyla, karmaşık iş problemlerine ait optimum ya da yaklaşık optimum çözüm bulma yeteneğine sahiptir. Ancak bu problemlerde karşılaşılan en büyük sorun, yerel optimuma yakalanma ve aşırı zaman kaybının oluşmasıdır. Tabu arama, daha önce incelenmiş belli sayıda çözümü, tabu listesi olarak adlandırılan bir listede tutarak, o çözümlere geri dönmeyi bir müddet engelleyen ve böylece aramayı çözüm uzayının daha iyi noktalarına yönlendiren bir arama prosedürüdür. Tabu Arama tekniğine ait ilk çalışmalar, Glover (1990a) tarafından önerilmiştir. Tabu Arama, yerel optimalliğe düşmekten kaçınmak için hafıza fonksiyonu kullanan, global optimumu hızlı bir şekilde aramada bir veya daha çok yerel arama yöntemini hiyerarşik olarak yönlendiren akıllı bir tekniktir. Algoritmanın bir yerel en iyi çözümden ayrıldıktan hemen sonra, tekrar aynı yerel en iyi çözüme yönelmemesi için, algoritmanın attığı son adımlar tabu yani yasaklı olarak kabul edilir. Tabu listesi dinamiklidir. Her bir yeni eleman tabu listesine girdiğinde, tabu listesinde en çok kalmış olan eleman (FIFO kuralına göre) liste dışına çıkarılır. Böylece algoritmaya bir hafıza kazandırılmış olunur.

Temel olarak Tabu arama yöntemi, komşuluk arama metodunun geliştirilmiş bir şekli olarak düşünülmektedir. Tabu arama metodu, bir yerel optimal çözümde arama işlemlerini sona erdirmek yerine, daha kötü bir değere sahip olsa da yeni bir sıralamayı ele alır ve o sıralamadan arama işlemine devam eder. Yeni seçilen sıralama, bir önceki sıralamadan daha kötü ise, arama işlemi sonsuz kez tekrarlanabilir. Bu durumu önlemek amacıyla, yeni seçilen düğümden bir önceki düğüme gitmek yasaklanmaktadır. Benzer şekilde bu düğümden iki ya da üç adım önceki düğüme gitmek de yasaklanmaktadır. Yasaklanmış olan adımlar tabu listesine eklenir. Tabu arama yönteminin her aşamasında, başlangıç sıralamasının komşuları arasından tabu listesinde olmayan en iyi sıralama seçilir. Komşuluk arama yönteminde bir başlangıç sıralamasının, ne kadar çok sayıda komşusu türetilirse, performansı da o derecede artmaktadır.

Ancak komşuluk arama tekniğinde, bir yerel çözüm bulup, bu çözümü global çözüm olarak kabul etme eğilimi vardır. Tabu arama yönteminde ise, bir lokal optimal çözüm elde edildikten sonra, bu çözüm üzerinden arama işlemine devam edilir ve bu nedenle problemin, global optimal çözümüne ulaşma garantisi verilmez. Çünkü, problemin global çözümüne, belki de daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip olan bir sıralamadan ulaşılabilecektir. Karar ağacı üzerinde başlangıç sıralamasından daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip olan bir düğüm üzerinden arama yapma esnekliği, Tabu arama yönteminde mevcuttur. Tabu arama yönteminin işleyişi için belirlenmesi gereken bazı önemli stratejiler ve parametre değerleri vardır. Temel olarak başlangıç çizelgesi oluşturma yöntemi; komşuluk yapısı, tabu listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aspirasyon ölçütü, seçkin çözümler listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aramayı yoğunlaştırma ve çeşitlendirme stratejisi ve aramayı durdurma ya da iterasyon sayısı gibi parametreler algoritmanın çalışması ve performansı için gerekli değerlerdir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, belirsizlik ortamında tanımlanan ÇM-KKPC problemlerindeki NP-zor konular ve çözüm yöntemleri ele alınmıştır. Önerilen model de problem için başlangıç çözümleri bulmak amacıyla ROT değeri, her bir etkinlik kaynakları toplamını etkinliğin süresine böldükten sonra, herhangi bir yol üzerindeki şebeke aracılığıyla bir etkinliğin kontrol ettiği maksimum değer olarak belirlenir. Özetle, şebekenin yolları üzerinde, kaynaklarda zaman aşımına neden olan etkinliklerin maksimum değerine sahip olanının önceliklendirilmesi olarak da tanımlanabilir. Tüm etkinliklerin ROT değerleri bulunur ve büyükten küçüğe sıralanarak kaynakların tahsis edilebilecekleri öncelikler belirlenmiş olur. En küçük boşluk zamanı (Minslack) değerleri, KYM ve B-KYM algoritmalarından elde edilir ve küçükten büyüğe doğru sıralanarak kaynak tahsisi için gerekli öncelikler belirlenmiş olur. Sonraki adımlar, her iki yöntem (ROT ve Minslack) için de aynıdır. Uygulama bölümünde çözüm yöntemi ve geliştirilen Microsoft Visual C# 2008 programı geliştirilmiş ve çözümlenebilen BÇM-KKPC problemleri ayrıntılı

biçimde açıklanmıştır. Şekil 1'de önerilen algortimanın akış diyagramı gösterilmiştir.

Bulanık mantık teorisine göre, bulanık sistemlerin en temel elemanı bulanık kümelerdir. Bu konuda Zadeh (1965) tarafından gerçekleştirilen çalışma araştırmacılar için temel referans oluşturmaktadır. Bulanık bir küme, birden fazla üyelik derecesine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile tanımlanmaktadır.

Gerçek hayat uygulamalarında projeler birçok etkinlik içermektedir. Bu projeleri sınırlı kaynak ve öncelik ilişkileri kısıtları altında çizelgeleme, mevcut problemi NP-zor probleme çevirmektedir ve problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bir projeye ait etkinliklerin süresi, net bilgi eksikliği nedeniyle (proje uygulanırken etkinlik süreleri beklenenden daha az veya çok sürebilir, kaynaklar mevcut olmayabilir, gerekli malzemeler gecikebilir, işçiler gelmeyebilir vb.) genellikle kesin verilerle ifade edilemez ve belirsizlik içerir. Bu nedenle, bulanık küme teorisi, belirsizlik içeren bu problemlerin modellenmesinde en etkin yöntemlerden biridir.

Dubois ve Prade (1988)'e göre bulanık sayılar şu özelliklere sahip olmalıdır. Üyelik fonksiyonu  $\mu_A(x): R \in [0,1]$  olan "A" bulanık sayısı için:  $\mu_A(x)$ , Reel sayılar kümesinden  $[0,1]$  kapalı aralığında bir sürekli fonksiyondur.  $\mu_A(x)$  bir konveks bulanık alt kümedir.  $\mu_A(x_0) = 1$  yapan bir  $x_0$  sayısı vardır. Yamuk Bulanık Sayı, Üyelik Fonksiyonu ve Yamuk bulanık sayılarla temel aritmetik işlemler Dubois ve Prade (1983) tarafından önerilen şekilde gerçekleştirilir.

Bulanık sayılar muğlak, kesin olarak tanımlanamayan bu nitel değerleri sayısallaştırabilmek için kullanıldığından, çeşitli uygulamalar ve proje etkinlik süreleri açısından bulanık sayıların birbirleriyle kıyaslanması ya da sıralanması oldukça önemlidir. Bu kısımda, mevcut

sıralama sorunlarını çözmek ve uygulama kolaylığı sağlamak için oldukça kullanışlı olan bir sıralama yöntemi açıklanacaktır.

$A_{ij}$  etkinliği  $FAT_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$  (Bulanık etkin süreleri-Fuzzy Activity time, FAT) bulanık etkinlik süresi olarak tanımlansın. Karar vericinin risk tutum indeksi ( $\beta$ ), şu şekilde ifade edilebilir:

$$\beta = \left[ \sum_i \sum_j \frac{(b_{ij}-a_{ij})}{(b_{ij}-a_{ij})+(d_{ij}-c_{ij})} \right] / t \quad (1)$$

$f_{A_i}(x)$  üyelik fonksiyonlu  $A_{ij}$  bulanık sayısı  $m_i = \min\{x | f_{A_i}(x) = 1\} + \max\{x | f_{A_i}(x) = 1\}$  olarak tanımlandığında,  $A_i$  ve  $A_j$  bulanık sayıları aşağıdaki kurallara göre sıralanabilir. Proje yönetiminde, etkinliklerin kritikliğini risk faktörü olarak değerlendiren bulanık sayılar kullanılarak, riskli etkinliklerin belirlenmesi ve bunlara göre genel proje riskinin ölçülmesi için bir yöntem önerilmiştir. Bu makalede, bir etkinliğin kritikliğinin o etkinliğin risk oranını gösterdiği kabul edilmektedir. Benzer şekilde, projenin genel riskliliğinin hesaplanması için, proje ağında bulunan riskli (kritik) etkinliklerin sayısı, bunların risk dereceleri ve proje ağındaki yerleri esas alınmaktadır.

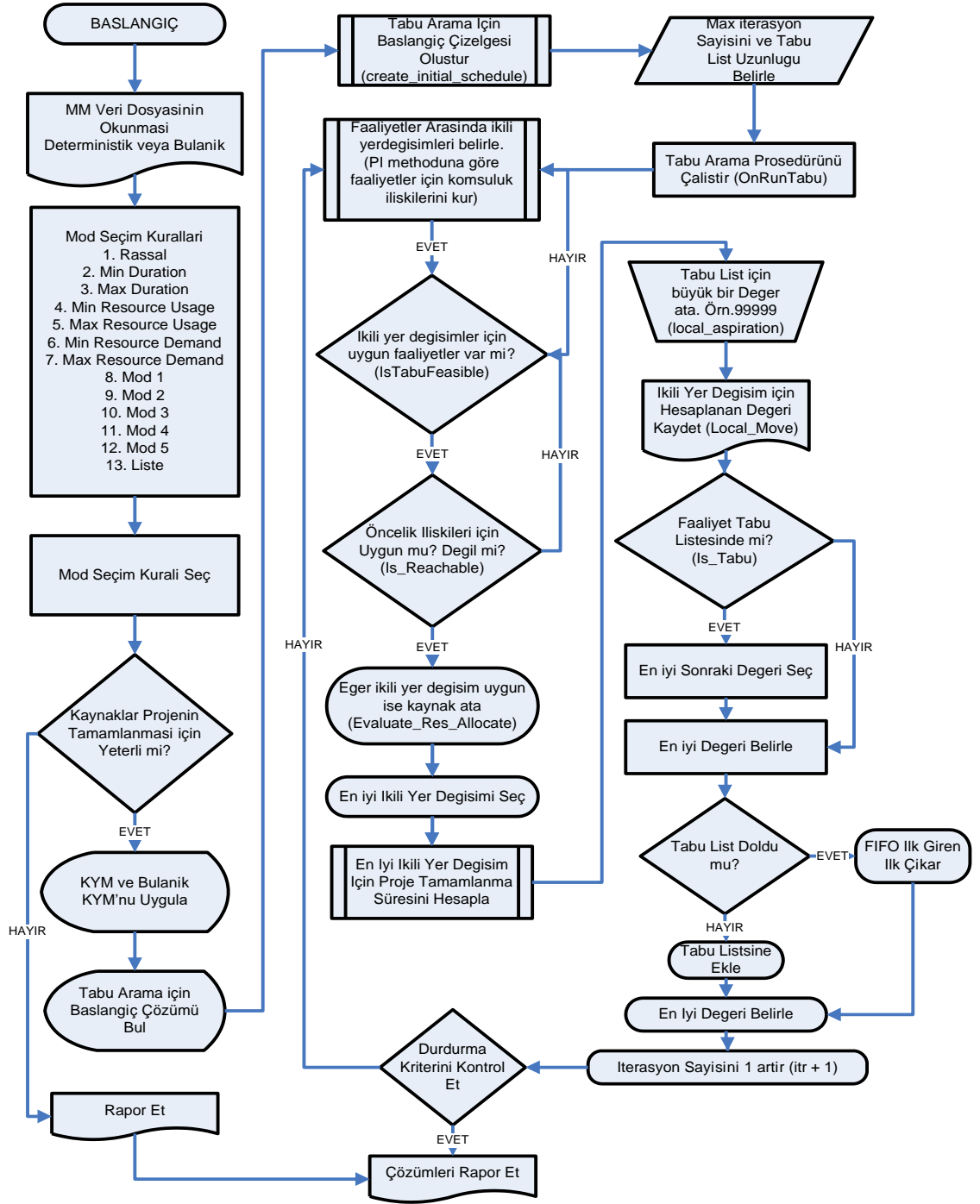
$$A_i > A_j \Leftrightarrow R(A_i) > R(A_j) \quad (2)$$

$$R(A_i) = R(A_j) \text{ ve } m_i > m_j \quad (3)$$

$$A_i = A_j \Leftrightarrow R(A_i) > R(A_j) \text{ ve } m_i = m_j \quad (4)$$

Sonraki adımda Yager (1981) tarafından önerildiği şekilde, bir  $A_i$  yamuk bulanık sayısının  $R(A_i)$  sıralama değeri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$R(A_1) = \beta \left[ \frac{(d_i-x_1)}{(x_2-x_1-c_i+d_i)} \right] + (1 - \beta) \left[ \frac{(x_2-a_i)}{(x_2-x_1+b_i+a_i)} \right] \quad (5)$$



Şekil 1. Önerilen algortimanın akış diyagramı

Burada  $\beta$  karar verici risk tutum indeksi Eşitlik (1) ve Eşitlik (5)'de  $x_1 = \min\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  ve  $x_2 = \max\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  kullanılarak ve  $\beta$  değeri alınarak,  $n$  yamuk bulanık sayılarının sıralama değerleri kolayca hesaplanmaktadır. Yukarıda açıklanan sıralama kuralına dayalı olarak,  $n$  yamuk bulanık sayısının sıralaması etkili bir şekilde tespit edilmektedir. Burada gerçekleştirilen işlem ile bulanık etkinliklerin hangisinin diğerine göre küçük

veya büyük değerlere sahip olduğu belirlenebilmektedir.

BÇM-KKPC için tam sayılı doğrusal programlama modeli ve çözüm yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Matematiksel modeli formüle etmek için kullanılan gösterimler şu şekildedir.



$t$	Zaman indisi ( $t = 1, \dots, T$ )
$j$	Etkinlik indisi ( $j = 1, \dots, J$ )
$R$	Yenilenebilir kaynaklar kümesi,
$d_j$	$j$ etkinliğinin süresi,
$P_j$	$j$ etkinliğinin öncüllerinin kümesi,
$EFT_j$	$j$ etkinliğinin en erken bitiş zamanı,
$LFT_j$	$j$ etkinliğinin en geç bitiş zamanı,
$k_{jr}$	$j$ etkinliğinin $r$ kaynağından birim zaman kullanım miktarı,
$K_r$	$r$ yenilenebilir kaynağının birim zaman kullanım üst sınırı,
$M_j$	$j$ etkinliğinin mod adedi,
$m$	Mod indisi ( $m = 1, \dots, M_j$ ),
$N$	Yenilenemeyen kaynakların kümesi.
$C_{jr}$	$j$ etkinliğinin $r$ kaynağının birim zamanda kullanım maliyeti

BÇM-KKPC problemleri, kısıtlı kaynaklara sahip bir projeyi oluşturan etkinliklerin, öncelik ilişkilerini dikkate alarak proje amaçlarını en iyileyecek biçimde çizelgelenmesidir. Makalede ele alınan problemin temel varsayımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Proje etkinlik sürelerinin kesin veya uzman görüşüne bağlı olarak yamuk bulanık sayı dağılımına göre modellenmiştir.

- Projenin etkinliklerinin gerçekleştirilmesi için birden fazla kaynağın farklı miktarlarda kullanılması gerekeceği kabul edilmektedir.

- Etkinliklerin birim zamandaki kaynak kullanımını sabittir. Bir etkinliğe atanan kaynak, başka bir etkinlik ile paylaşamaz.

- Başlatılan etkinlikler tamamlanıncaya kadar kesintisiz olarak sürdürülmek zorundadır, ara verilemez.

- Etkinlikler iptal edilemez, her etkinliğin gerçekleştirilmesi zorunludur.

- Toplam proje süresinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

- Kaynakların kullanım maliyetleri toplam proje maliyeti içinde modele eklenmiştir.

- Kaynak kullanım maliyetleri çizelgeleme dönemlerinde sabittir. Proje maliyetleri üzerinde mevsimsel ve enflasyonist etkiler yoktur.

- Projedeki etkinliklerin başlayabilmesi için öncül etkinliklerin tamamlanması gereklidir.

- Projenin yürütülmesinde yenilenebilir veya yenilenemeyen kaynaklar kullanılmaktadır.

- Başlangıç çizelgeler oluşturulması amacıyla MinSlack ve Rot öncelik kuralları kullanılmıştır.

- Global optimizasyon bulmak amacıyla Tabu arama yöntemi kullanılmıştır. Tabu arama algoritmasının işleyişi için belirlenmesi gereken bazı önemli stratejiler ve parametre değerleri vardır. Temel olarak başlangıç çizelgesi oluşturma yöntemi, komşuluk yapısı, tabu listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aspirasyon ölçütü, seçkin çözümler listesi uzunluğu ve işletme stratejisi, aramayı yoğunlaştırma ve çeşitlendirme stratejisi ve aramayı durdurma ya da iterasyon sayısı gibi parametreler algoritmanın çalışması ve performansı için gerekli değerler örnek problemler içinde verilmiştir.

- Kaynak kullanımını hem tek hem de çok modlu olarak kullanılabilir.

- Bu bölümde incelenecek problem, tek bir projenin yukarıda yapılan varsayımlar çerçevesinde projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesi problemi olup, modele ayrıca çizelgeleme maliyeti de dâhil edilmiştir. Ancak modele dahil edilen çizelgeleme maliyetinde optimizasyon yapılmamış, yalnızca oluşan proje maliyetleri hesaplanmıştır.

- Mod seçim kuralları;

- Modun Rassal olarak seçilmesi: 1'den  $M_{ij}$ 'ye kadar düzgün dağılımdan rassal olarak seçilen  $m$  modu ile bir etkinliğin gerçekleştirilmesi.

- MinDM (Minimum etkinlik süreli mod seçim kuralı- Min duration mode): Modlar arasında minimum etkinlik süresine sahip olanının seçilmesi.  $\min_m d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

- MaxDM (Maksimum etkinlik süreli mod seçim kuralı- Max duration mode): Modlar arasında maksimum etkinlik süresine sahip olanının

seçilmesi.  $\max_m d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

ç. MinRDM (Minimum kaynak talebi mod seçim kuralı- Minimum resource demand mode) Kuralı: Minimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi.  $\min_m \sum_{r=1}^R q_{ijm} d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

d. MaxRDM (Maksimum kaynak talebi mod seçim kuralı- Maximum resource demand mode) Kuralı: Maksimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi.  $\max_m \sum_{r=1}^R q_{ijm} d_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

e. MinRMU (Minimum kaynak kullanımı mod seçim kuralı- Minimum resource usage mode) Kuralı: Minimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi.  $\min_m q_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

f. MaxRMU (Maksimum kaynak kullanımı mod seçim kuralı- Maximum resource usage mode) Kuralı: Maksimum kaynak gereksinime sahip etkinliklere ait modun seçilmesi.  $\max_m q_{ijm}, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$  değerine sahip modun belirlenmesi.

g. Mod Seçimi: Modların isteğe bağlı olarak seçilmesi durumudur.

KKPÇ problemine göre sadece kaynak kullanımında birden fazla moda izin verilmesi, bir farklılık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde, problem tanımının daha gerçekçi olması sağlanmıştır. Aşağıdaki gösterimde, mod indisi  $m$  kullanılarak, değişkenlere ve parametrelere mod boyutu eklenmiştir. Yenilenemeyen kaynakların matematiksel gösterimini örneklemek amacı ile aşağıdaki gösterime, yenilenemeyen kaynaklar da dâhil edilmiştir. Ayrıca kullanılan eşitlikte hem toplam proje maliyetinin en aza indirilmesi amaçlanmış hem de proje süresinin toplam maliyete etkisi dikkate alınmıştır. Böylece projenin mümkün olan en kısa sürede bitirilmesi amaçlanmış, oluşan toplam proje maliyeti hesaplanmıştır. ÇM-KKPÇ'nin matematiksel programlama gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} t X_{jmt} \quad (6)$$

veya

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} C_{jr} t X_{jt} \quad (7)$$

Kısıtlar

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in R, t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} t X_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t - d_{jm}) X_{jmt} \quad j = 2, 3, \dots, J, i \in P_j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} X_{jmt} \leq K_r \quad r \in N \quad (11)$$

$$X_{jmt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad m = 1, 2, \dots, M_j; \quad t = EFT_j, \dots, LFT_j \quad (12)$$

Eşitlik 6'daki amaç fonksiyonu ( $Z_1$ ) proje süresinin en küçüklenmesini ve Eşitlik 7'deki amaç fonksiyonu ( $Z_2$ ) ise toplam proje çizelgeleme maliyetinin en küçüklenmesini esas almaktadır. Eşitlik 8 ise tüm proje etkinliklerinin icra edilmesini sağlamaktadır. Eşitlik 9 yenilenebilir kaynakların dönemlik kullanımlarını sınırlamaktadır. Denklem 10 ise, etkinlikler arasındaki öncelik ilişkilerini tanımlamaktadır. Eşitlik 11'deki kısıt kümesi yenilenemeyen kaynakların proje süresi içindeki tüketimlerini sınırlamaktadır. Eşitlik 12 ise, proje etkinliklerinin başlangıç zaman ve modlarını gösteren ikili değişkenleri tanımlamaktadır. Karar değişkeni  $X_{jmt}$ 'nin üç indisli olması, değişken sayısını tek modlu modele göre büyük oranda artırmaktadır. Bu nedenle,  $\{EFT_j, LFT_j\}$  zaman aralıklarının en iyi çözümü dışlamayan en dar tanımı bu gösterimde daha önemlidir.



**Çizelge 1.** J104\_1.mm veri dosyası

Etkinlik Toplam Sayısı 12		Kaynak Sayısı:4			
Maksimum Kaynak Miktarı	R1	R2	NR1	NR2	
	9	7	59	52	
MOD 1	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	7	6	0	6	0
3	7	7	0	0	8
4	5	3	0	8	0
5	7	0	5	0	4
6	8	6	0	6	0
7	8	3	0	6	0
8	7	0	8	2	0
9	2	0	7	0	9
10	5	9	0	4	0
11	5	0	10	0	7
12	0	0	0	0	0
MOD 2	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	7	6	0	6	0
3	7	7	0	0	8
4	5	3	0	8	0
5	7	0	5	0	4
6	8	6	0	6	0
7	8	3	0	6	0
8	7	0	8	2	0
9	2	0	7	0	9
10	5	9	0	4	0
11	5	0	10	0	7
12	0	0	0	0	0
MOD 3	Süreler	1.Kaynak Türü Kullanımı	2.Kaynak Türü Kullanımı	3.Kaynak Türü Kullanımı	4.Kaynak Türü Kullanımı
1	0	0	0	0	0
2	8	5	0	6	0
3	9	0	1	9	0
4	9	3	0	0	5
5	8	0	4	8	0
6	9	5	0	2	0
7	8	0	4	6	0
8	10	1	0	0	5
9	8	0	5	0	4
10	10	0	8	2	0
11	10	9	0	0	5
12	0	0	0	0	0

### Deterministik / BÇM-KKPC Algoritması

**Adım 1.** İlgili kurallardan birine göre mod seçimi gerçekleştirilir.

Bu adımda uygulanacak modlar aşağıda belirtilmiştir.

**Minimum süre kuralı:** Bir etkinlik için 3 mod bulunmaktadır. 3 mod için yeterli kaynak varsa, minimum etkinlik süresine sahip mod seçilir. Eğer modlarda aynı süreye sahip etkinlikler varsa, seçilen kaynak tipine göre minimum kaynak kullanımına sahip etkinlik olan mod seçilir.

**Maksimum süre kuralı:** Bu kural, maksimum etkinlik süresi olan modun seçimini içermektedir. Eşit süreli mod varsa, minimum kaynak kullanımı olan mod seçilir. Minimum kaynak kullanımı olan modun seçilmesi: Seçilen kaynak tipinde minimum kaynak ihtiyacı olan modun seçimi. Eğer eşit kaynak

kullanımı olan etkinlikler varsa, minimum süreye sahip olan etkinliğin mod'u seçilir.

**Maksimum kaynak kullanımı olan modun seçilmesi:** Seçilen kaynak tipinde maksimum kaynak ihtiyacı olanın seçimi. Eğer eşit kaynak kullanımı olan etkinlikler varsa, maksimum süreye sahip olan etkinliğin mod'u seçilir.

**Mod'un isteğe bağlı olarak seçilmesi:** Tüm etkinlikler, mod 1 seçimine göre yapılırsa, mod 2 seçiminde tüm etkinlikler mode 2'de, mod 3 seçiminde tüm etkinlikler mod 3'te yapılmalıdır. Eğer seçilen modda bir etkinlik icra edilemiyorsa etkinliğin diğer modlarından minimum süre ve minimum kaynak kullanımlı etkinliklerin olduğu mod seçilir.

**Minimum kaynak talebi olan modun seçimi:** Bir etkinliğin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarının toplamı ile etkinliğin süresinin çarpımı sonucu oluşan değer minimum olan mod seçimi yapılır.

**Maksimum kaynak talebi olan modun seçimi:** Bir etkinliğin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarının toplamı ile etkinlik süresinin çarpımı sonucu oluşan değer maksimum olan mod seçimi yapılır.

**Adım 2.** Kaynakların yeterlilik durumu kontrol edilir.

Yenilenebilir kaynaklar için R1 ve R2 maksimum kaynak miktarı, r1 ve r2 ise etkinlikte kullanılan kaynak miktarlarıdır. Yenilenemeyen kaynaklar için NR1 ve NR2 maksimum kaynak miktarı, nr1 ve nr2 ise etkinlikte kullanılan kaynaklar miktarlarıdır.

**Çizelge 2.** Örnek problemin modları

MOD 1				MOD 2				MOD 3			
R1	R2	NR1	NR2	R1	R2	NR1	NR2	R1	R2	NR1	NR2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	6	0	6	0	6	0	5	0	6	0
0	1	0	9	7	0	0	8	0	1	9	0
4	0	8	0	3	0	8	0	3	0	0	5
0	6	8	0	0	5	0	4	0	4	8	0
0	3	0	6	6	0	6	0	5	0	2	0
5	0	8	0	3	0	6	0	0	4	6	0
6	0	0	6	0	8	2	0	1	0	0	5
7	0	0	10	0	7	0	9	0	5	0	4
0	9	0	5	9	0	4	0	0	8	2	0
9	0	8	0	0	10	0	7	9	0	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Çizelge 3.** Minimum Etkinlik Süreli Mod Seçimi

Etkinlikler	Mod 1 Süreler	Mod 2 Süreler	Mod 3 Süreler	Seçilen Mod	Seçilen Süre
1	0	0	0	1	0
2	4	7	8	1	4
3	6	7	9	1	6
4	4	5	9	1	4
5	7	7	8	2	7
6	7	8	9	1	7
7	2	8	8	1	2
8	4	7	10	1	4
9	2	2	8	2	2
10	5	5	10	2	5
11	5	5	10	1	5
12	0	0	0	1	0

Etkinlikler 3 mod içerisinde birisiyle yapılmalı, bu sebeple de en az 1 mod için yeterli kaynak mevcut olmalıdır. Eğer hiçbir modda etkinliği yapmak için yeterli kaynak yok ise, o proje tamamlanamayacaktır. Bazı etkinlikler 3 moddan sadece birisiyle veya ikisiyle yapılabilir. Bu durumda geçerli mod, uygun olan modlarla yapılmalı yeterli kaynak miktarı olmayan modun veya modların seçimi yapılmamalıdır. Geliştirilen programda eğer yenilenemeyen kaynaktan yeterli miktarı olmayan mod seçilmiş ise yeterli kaynak olmadığı rapor edilir. R1 maksimum kaynak miktarı, farklı modlarda gereken r1 tipi kaynak kullanımına eşit veya daha büyük olmalıdır, aksi halde etkinlik o modda yapılamaz. R2 için de her bir etkinliğin modlarında kaynak kullanımları kontrol edilmelidir. Bir etkinliğin seçilen mod için kullanılabilir NR1 ve NR2 miktarları, her bir etkinliğin nr1 ve nr2 toplamlarından az olmamalıdır.

**Adım 3.** Seçilen mod'a göre öncelikle deterministik KYM / BKYM işletilir. Her bir mod değişiminde etkinlik süreleri de değiştiği için, KYM/BKYM'yi her defasında hesaplatmak gerekir. Uygun mod seçimi yapıldıktan sonra, KYM/BKYM yöntemi ile şebeke yapısı ve öncelik ilişkileri esasına göre etkinliklerin deterministik ve bulanık ortamda EST/FEST (En erken başlama zamanı), LST/FLST (En geç başlama zamanı), EFT/FEFT (En erken tamamlanma zamanı), LFT/FLFT (En geç tamamlanma zamanı) ve aylak süreleri hesaplanır. Kritik etkinlikler ve kritik olmayan etkinlikler tanımlanır. Proje kaynak ihtiyaçları dikkate alınmadan çizelgelenir ve KYM/BKYM'ye göre en küçük proje tamamlanma sırası ve süresi bulunur (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Minimum etkinlik süreli mod seçimine göre KYM sonuçları

Etkinlik No	Seçilen Mod	Süreler	EST	ECT	LST	LCT	Min Slack
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	4	0	4	13	17	13
3	1	6	0	6	0	6	0
4	1	4	0	4	2	6	2
5	2	7	6	13	6	13	0
6	1	7	6	13	6	13	0
7	1	2	4	6	18	20	14
8	1	4	13	17	13	17	0
9	2	2	17	19	20	22	3
10	2	5	13	18	17	22	4
11	1	5	17	22	17	22	0
12	1	0	22	22	22	22	0

**Adım 4.** Başlangıç çözümün bulunması: Başlangıç çözümü, sezgisel bir kural kullanılarak belirlenebilir. Örneğin ROT ve MinSlack kurallarından birisi seçilir. Elde edilen çizelge sırası, tabu algoritması için başlangıç çözümü olarak seçilir. Şimdiye kadar bulunan en iyi sıralama (Sb), uygulanabilir ardışıklık Si olarak seçilir (Çizelge 5).

**Adım 5.** Tabu aramasında kullanılan değişkenlere değer atanır. Tabu listesi genişliği için değer belirlenir. Örnek için,  $\sqrt{n-2} = \sqrt{12-2} \cong 3$  olarak belirlenir. Durdurma kriteri olarak, maksimum iterasyon sayısı için değer belirlenir.

**Adım 6.** Tabu Arama (TA) prosedürü işletilir.

**Çizelge 5.** Minimum Etkinlik Süreli Mod Seçimine göre MinSlack Sonuçları

j	1	3	5	6	8	11	12	4	9	10	2	7
MinSlack	0	0	0	0	0	0	0	2	3	4	13	14
Süreler	0	6	7	7	4	5	0	4	2	5	4	2
Kaynak	0 0 0 0	0 1 0 9	0 5 0 4	0 3 0 6	6 0 0 6	9 0 8 0	0 0 0 0	4 0 8 0	0 7 0 9	9 0 4 0	9 0 6 0	5 0 8 0
EST	0	0	6	6	13	17	22	0	17	13	0	4
Tstart	0	0	6	13	20	24	34	0	24	29	4	8
Tson=Süre+Tstart	0	6	13	20	24	29	34	4	26	34	8	10
TNow	0	0	4	6	8	10	13	20	24	26	29	34
Kaynak Düzeyi	9 7 59 52	9 7 59 52	9 6 51 43	0 7 45 43	9 2 45 39	9 2 37 39	9 7 37 39	9 7 37 33	9 7 37 27	0 7 29 18	9 7 29 18	9 7 25 18
Kaynak Kullanımı	0 0 0 0	9 6 59 43	0 6 45 43	0 2 45 39	4 2 37 39		9 4 37 33	3 7 37 27	0 7 29 27		0 7 25 18	
Kaynak Kullanımı		5 6 41 43							0 0 29 18			
Aday Liste	1	3,4,2	2,7	5,6,7	6,7	6	6	8,10	11,9,10	10	10	12
Çizelgelenen Etkinlikler	1	3,4	2	5	7	-	6	8	11,9	-	10	12
İterasyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Adım 7.** Durdurucu ölçütler, denetlenir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşılmadıysa, Adım 6'ya gidilir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığı anda, şimdiye kadar bulunan en iyi çözüm, sonuç çözümü olarak rapor edilir.

**Adım 8.** Toplam proje maliyeti bulunur. Son olarak, her bir kaynak tipi için brüt birim maliyeti belirlenir. Kaç kaynak tipi varsa, o kadar değer girilmelidir. Daha sonra girilen maliyetlerle projenin toplam tamamlanma maliyeti ve proje tamamlanma zamanı hesaplanarak, bulunan sonuçlar rapor edilir. Bir etkinliğin toplam proje maliyeti, seçilen modda (etkinliğin süresi × kaynak kullanım miktarı × birim brüt kaynak kullanım maliyeti) çarpımı ile hesaplanarak ve tüm etkinliklerin maliyetleri toplanarak bulunacaktır. Mod değişiminden kaynaklanan toplam proje maliyetlerinin değişimi görülebilir (birim brüt kaynak kullanım maliyeti: 1 PB'dir).

**Adım 9.** Adım 1'e dönülür. Her bir mod seçim kuralı için belirtilen algoritma tekrar edilmelidir. Böylece minimum proje tamamlanma süresi ve toplam proje maliyeti bulunarak en uygun çözüm belirlenmelidir.

Tabu arama algoritmasının izlediği yol, önemli ölçüde başlangıç çözümüne bağlıdır. Dolayısıyla, Tabu arama algoritması kullanarak belirlenen çözüm

de yine başlangıç çözümüyle ilişkilidir. Daha iyi bir çözüm elde etmek için farklı başlangıç çözümleri ile yukarıda açıklanan süreç tekrarlanabilir. Sezgisel yöntemlerle en iyi çözümün sağlanıp sağlanmadığı, bir karşılaştırma yapılmadığı sürece kesin olarak bilinemez. Ancak, bir sezgisel yöntemin etkinliği hakkında şu genel yargı geçerlidir: İyi bir sezgisel yöntem, büyük bir olasılıkla her zaman en iyiye yakın veya önceden tespit edilmiş değerlendirme ölçütlerine göre yeterli sayılabilecek çözümleri sağlayan yöntemdir. Bu nedenle optimizasyon yöntemlerinin, en iyi çözümün sağlanması amacıyla geliştirilmesine karşın, sezgisel yaklaşımda amaç, "etkinlik ve güvenilirliği yüksek olan çözüm stratejisinin" geliştirilmesidir.

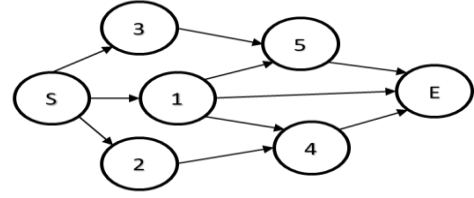
### 3.2 BÇM-KKPC için Sayısal Örnek

Bu bölümde kaynak kısıtları altında çok modlu proje çizelgeleme problemi ve deterministik, bulanık sayılar tarafından modellenen etkinliklerin belirsiz zaman parametreleri proje çizelgeleme maliyeti ile birlikte çok amaçlı olarak çözüm prosedürü sunulmuştur. Birinci aşamada, Tabu arama metasezgisel prosedürü, Hapke (2000) tarafından geliştirilen zayıf kıyaslama kuralı (WCR) baskın olmayan çizelgelerin kümesinin temsil edildiği bir örnek üretmede kullanılmıştır. Uygun çözümler, bulanık zaman parametreleri kullanmak amacıyla MinSlack ve ROT sezgisellerini genelleştirmek için

kullanılan yapıdadır. Bu, genelleştirilen bulanık sayılar üzerine bazı aritmetik işlemlerin ve bulanık sayılar için özel sıralama kurallarının kullanımıyla ilgilidir. Özellikle de WCR baskın olmayan çizelgelerin tasarımı, önerilen kıyaslama kurallarından biri kullanılarak tanımlanmıştır. Etkileşimli prosedür WCR baskın olmayan çizelgelerin örnekleri üzerine bulanık amaçlara arasındaki rekabetin en iyi uzlaşmayı belirleyen çizelgeyi aramak için organize edilmiştir. Bunu mümkün kılmak için, bir başarımlı büyüklüğü olan fonksiyon bulanık amaç uzayı genişletir. Bu yaklaşım, hipotetik sanal bir yazılım proje çizelgeleme problemine uygulanmıştır. Sunulan metodoloji, her yönüyle geneldir ve herhangi bir bulanık çok amaçlı kombinatorial optimizasyon problemini çözmek için uygulanabilir.

Bir ÇM-KKPC modelinde, öncelik ilişkileri olan  $i=1, \dots, e, \dots, l$  etkinliklerinden oluşan tek bir proje olduğu düşünülür ve (e, i) etkinlikleri arasında e, i etkinliğin öncülü olacak şekilde düzenlenmiştir. Her bir i etkinliği  $m_j$  modundan birisiyle icra edilmelidir. Her bir etkinlik mod kombinasyonu sabit bir etkinlik süresine ve R tipi yenilenebilir kaynak tipinden bir veya daha fazla sabit bir miktara gereksinim duyularak icra edilir

Çizelge 6'da Şekil 3'te şebeke diyagramı verilen BÇM-KKPC modeli için veri kümesi sunulmuştur. Başlangıç ve bitiş yapay etkinliklerinden oluşan 7 etkinlikten oluşmuştur. Modlar, etkinlik süreleri kıyaslama yapılabilmesi amacıyla klasik etkinlik süreleri, klasik etkinlik sürelerinin tekrarlanması ve uyarlanan bağımsız yamuk bulanık sayılardan oluşan etkinlik süreleri a, b ve c olmak üzere üç grupta temsil edilmiş, üç tip kaynak kullanımı (işgücü, maliyet, malzeme) ve her bir etkinliğin ardılı faaliyeti çizelgede sunulmuştur. Bu verileri kullanarak ve öncelikler gereği oluşturulan proje şebekesi Şekil 3'te verilmiş olup problemin çözümleri takip eden Çizelge 6-11'de sunulmuştur.



Şekil 3: Bir ÇM-KKPC modelinin şebeke diyagramı

Çizelge 6. BÇM-KKPC modelinin örnek veri kümesi

Faaliyetler	Modlar	Klasik faaliyet süreleri	Tekrarlı bulanık faaliyet süreleri	Rassal bulanık faaliyet süreleri
S	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	1	12	(12,12,12,12)	(12,14,14,16)
	2	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,17)
	3	18	(18,18,18,18)	(18,19,19,20)
2	1	5	(5,5,5,5)	(5,6,6,7)
	2	11	(11,11,11,11)	(11,12,12,13)
	3	13	(13,13,13,13)	(13,14,15,16)
3	1	5	(5,5,5,5)	(5,7,7,8)
	2	14	(14,14,14,14)	(14,15,15,16)
4	1	15	(15,15,15,15)	(15,16,17,18)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
5	3	8	(8,8,8,8)	(8,9,9,9)
	1	13	(13,13,13,13)	(13,14,14,15)
E	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,18)
	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
Faaliyetler		R1	N1	N2
S		0	0	0
1		3	3	5
		2	4	4
		4	3	3
2		3	2	5
		4	5	2
		2	4	3
3		3	4	2
		2	5	4
4		4	2	3
		3	5	2
		2	4	3
5		3	5	3
		2	6	4
		3	2	3
E		0	0	0

Çizelge 7. Örnek proje B-KYM çözümü

No	Süre	FEST	FECT	FLST	FLCT	Min Slack
S	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)
2	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	(11,11,11,11)	(16,16,16,16)	(11,11,11,11)
3	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	(7,7,7,7)	(12,12,12,12)	(7,7,7,7)
4	(8,8,8,8)	(12,12,12,12)	(20,20,20,20)	(16,16,16,16)	(24,24,24,24)	(4,4,4,4)
5	(12,12,12,12)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	(0,0,0,0)
E	(0,0,0,0)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	(0,0,0,0)
S	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(10,14,14,18)	(0,0,0,0)
2	(5,6,6,7)	(0,0,0,0)	(5,6,6,7)	(8,12,12,17)	(15,18,18,22)	(8,12,12,17)
3	(5,7,7,8)	(0,0,0,0)	(5,7,7,8)	(2,7,7,13)	(10,14,14,18)	(2,7,7,13)
4	(8,9,9,9)	(12,14,14,16)	(20,23,23,25)	(15,18,18,22)	(24,27,27,30)	(4,4,4,4)
5	(12,13,13,13)	(12,14,14,16)	(24,27,27,30)	(10,14,14,15)	(24,27,27,30)	(0,0,0,0)
E	(0,0,0,0)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(0,0,0,0)

**Çizelge 8.** Örnek proje MinDur kuralına göre MinSlack çözümü

No	Süre	Başlangıç zamanı	Bitiş zamanı	Öncelleri	Kaynak kullanımı	Kalan kaynak miktarı
0	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	-	0 0 0	8 25 21
1	(12,12,12,12)	(0,0,0,0)	(12,12,12,12)	0	3 3 5	5 22 16
3	(5,5,5,5)	(0,0,0,0)	(5,5,5,5)	0	3 4 2	2 18 14
2	(5,5,5,5)	(5,5,5,5)	(10,10,10,10)	0	3 2 5	2 16 9
5	(12,12,12,12)	(12,12,12,12)	(24,24,24,24)	1	2 6 4	6 10 5
4	(8,8,8,8)	(12,12,12,12)	(20,20,20,20)	1	2 4 3	4 6 2
6	(0,0,0,0)	(24,24,24,24)	(24,24,24,24)	5	0 0 0	8 6 2
0	0	0	0	-	0 0 0	8 25 21
1	12	0	12	0	3 3 5	5 22 16
3	5	0	5	0	3 4 2	2 18 14
2	5	5	10	0	3 2 5	2 16 9
5	12	12	24	1	2 6 4	6 10 5
4	8	12	20	1	2 4 3	4 6 2
6	0	24	24	5	0 0 0	8 6 2
0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)	-	0 0 0	8 25 21
1	(12,14,14,16)	(0,0,0,0)	(12,14,14,16)	0	3 3 5	5 22 16
3	(5,7,7,8)	(0,0,0,0)	(5,7,7,8)	0	3 4 2	2 18 14
2	(5,6,6,7)	(5,7,7,8)	(10,13,13,15)	0	3 2 5	2 16 9
5	(12,13,13,14)	(12,14,14,16)	(24,27,27,30)	1	2 6 4	6 10 5
4	(8,9,9,9)	(12,14,14,16)	(20,23,23,25)	1	2 4 3	4 6 2
6	(0,0,0,0)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	5	0 0 0	8 6 2

**Çizelge 9.** Örnek proje Min/Maks kaynak talebi kuralına göre mod seçimi

Faaliyet	Mod	Klasik faaliyet süresi	Tekrarlı bulanık faaliyet süresi	Rassal bulanık faaliyet süresi
5	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
1	1	12	(12,12,12,12)	(12,14,14,16)
	2	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,17)
	3	18	(18,18,18,18)	(18,19,19,20)
2	1	5	(5,5,5,5)	(5,6,6,7)
	2	11	(11,11,11,11)	(11,12,12,13)
	3	13	(13,13,13,13)	(13,14,15,16)
3	1	5	(5,5,5,5)	(5,7,7,8)
	2	14	(14,14,14,14)	(14,15,15,16)
4	1	15	(15,15,15,15)	(15,16,17,18)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	8	(8,8,8,8)	(8,9,9,9)
5	1	13	(13,13,13,13)	(13,14,14,15)
	2	12	(12,12,12,12)	(12,13,13,14)
	3	15	(15,15,15,15)	(15,16,16,18)
E	1	0	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
Kaynak talebi	Bulanık kaynak talebi	En fazla kaynak talebi	En az kaynak talebi	
5	0	(0,0,0,0)	1	1
1	132	(132,154,154,17)		1
	150	(150,160,160,170)		
	180	(180,190,190,200)	3	
2	50	(50,60,60,70)		1
	121	(121,132,132,143)	2	
	117	(117,126,135,144)		
3	45	(45,63,63,72)		1
	154	(154,165,165,176)	2	
4	135	(135,144,153,162)	1	
	120	(120,130,130,140)		
	72	(72,81,81,81)		3
5	143	(143,154,154,165)		
	144	(144,156,156,168)	2	
	120	(120,128,128,144)		3
E	0	(0,0,0,0)	1	1

**Çizelge 10.** Örnek Proje Mod Seçim Kuralları

Mode Selection Rule	Aktivite					Proje çizelgeleme maliyetleri				Durulaştırma	
	S	1	2	3	4	5	E	643	690		699
Random	1	3	3	2	3	3	1	643	690	699	745
Min_dur	1	1	1	1	3	2	1	443	514	514	567
Max_dur	1	3	3	2	1	3	1	706	753	771	826
Min_Res_Type 1	1	2	3	2	3	2	1	637	688	697	739
Max_Res_Type 1	1	3	2	1	1	1	1	624	683	692	742
Min_Res_Dem	1	1	1	1	3	3	1	419	486	486	543
Max_Res_Dem	1	3	2	2	1	2	1	734	787	796	849
1	1	1	1	1	1	1	1	505	575	584	645
2	1	2	2	2	2	2	1	689	743	743	797
3	1	3	3	1	3	3	1	534	588	597	641
Min_Res_Type 2	1	1	1	1	1	3	1	482	549	558	624
Max_Res_Type 2	1	2	2	2	2	1	689	743	743	797	
Min_Res_Type 3	1	3	2	1	2	1	1	609	669	669	720
Max_Res_Type 3	1	1	1	2	1	2	1	615	679	688	752

Çizelge 11'deki sonuçlar değerlendirildiğinde, MinSlack ve ROT başlangıç sezgiselleri, Kaynak ve Mod seçimi için Minimum etkinlik süresine sahip olarak işletilen modelin Tabu arama sonucu optimal proje tamamlanma süresi 24, 27, 27 ve 30 olarak ve çizelge maliyeti 443, 514, 514 ve 567 olarak hesaplanmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada projelerin kaynak kısıtları altında çizelgelenmesi problemi incelenmiş ve problemin çözümü için yeni ve etkin çözüm yöntemlerinin tanıtılması ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Optimal çözümü sağlayan modeller incelenerek ne derece uygulanabilir olduğunu araştırılmış ve sonucunda örnek problemler yardımıyla uygulama zorluklarını ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntem bazı sezgisel öncelik kuralı esasına göre oluşturulan çözümler, başlangıç çözüm olarak kabul edilmiş ve alternatif olabilecek Tabu arama algoritması sınanmıştır.

Geliştirilen algoritma ve Proje Çizelgeleme Programı'nın performansını ölçmek ve değerlendirmek amacıyla, her bir veri kümesinin ortalamadan sapması ve optimal sonuç bulunan değerlerin yüzdesi hesaplanarak, literatürde yayınlanmış olan diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve literatürde yer alan veri kümelerine ait elde edilen özet sonuçlar Çizelge 12'de verilmiştir. PSLib kütüphanesinde yer alan ve yapay etkinlik içermeyen J10, J12, J14, J16, J18, J20 ve J30. MM ÇM-KKÇP'leri üzerinde test edilerek programın performansı değerlendirilmiştir. Yapay etkinlikler sadece 1 moddan oluşmakta olup, etkinlik süreleri ve kaynak kullanım miktarları 0'dır. Veri kümelerinde ait veri kümesi adı, problem tipi, etkinlik sayıları, kaynak sayıları, kaynak tipleri ve toplam test problemlerinin sayısından oluşmaktadır. 1'den 10'a kadar  $m_j$  modundaki j etkinlik süreleri birbirinde farklıdır. Kaynak listesi, iki yenilenebilir ve iki yenilenemeyen kaynaktan oluşmaktadır. Bir veri kümesinde toplam 640 test problemi bulunmakta olup, Çizelge 12'de veri kümelerine ait çözülebilen (olurlu çözümleri olan)



### Çizelge 11. Bulanık ÇM-KKPC Probleminin Çözümü

Faaliyet Sayısı : 7	Kaynak Türü : 3			Kaynak Miktarı (8,25,21)	Proje Kompleksliği (1,428)	Proje Risk İndeksi (0,53)
Çizelge Maliyeti	CPM	Min Slack	ROT	Min Slack	Tabu(ROT)	Mod Seçim Kuralı
(643,690,699,745)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	Random
(443,514,514,567)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	(24,27,27,30)	MinDur
(706,753,771,826)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	MaxDur
(637,688,697,739)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	MinResUseageR1
(624,683,692,742)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	(31,35,36,39)	(33,35,36,38)	(33,35,36,38)	MaxResUseageR1
(419,486,486,543)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	(27,30,30,34)	MinResDem
(734,787,796,849)	(33,35,36,38)	(37,40,40,43)	(40,43,44,47)	(37,40,40,43)	(40,43,44,47)	MaxResDem
(505,575,584,645)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	Mod 1
(689,743,743,797)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	Mod 2
(534,588,597,641)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	(33,35,35,38)	Mod 3
(482,549,558,624)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	(27,30,31,34)	MinResUseageN1
(689,743,743,797)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	(27,29,29,31)	MaxResUseageN1
(609,669,669,720)	(31,33,33,35)	(29,33,33,36)	(29,33,33,36)	(31,33,33,35)	(29,33,33,36)	MinResUseageN2

### Çizelge 12. Kıyaslama Tablosu

Önerilen Yöntem			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,05	95,3
12	547	0,03	96,6
14	551	0,03	96,58
16	550	0,03	96,67
18	552	0,03	96,74
20	554	0,03	96,66

Tavlama Benzetimi			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,21	96,30
12	547	0,19	91,20
14	551	0,92	82,60
16	550	1,43	72,80
18	552	1,85	69,40
20	554	2,10	66,90

Kuş Sürüsü Optimizasyonu			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,21	96,30
12	547	0,19	91,20
14	551	0,92	82,60
16	550	1,43	72,80
18	552	1,85	69,40
20	554	2,10	66,90

Genetik Algoritma			
Veri Seti	Problem sayısı	Ortalama sapma	Optimal sonucun yüzdesi
10	536	0,09	99,30
12	547	0,29	99,30
14	551	0,63	97,60
16	550	0,83	96,38
18	552	1,58	94,43
20	554	1,91	92,75

problem sayıları gösterilmiştir. Bu makale kapsamında önerilen tabu algoritma ve geliştirilen “Proje çizelgeleme” programı ile ÇM-KKPC problemleri tekrar çözülmüştür. (Bouleimen and Lecocq, 2003)’ün tavlama benzetimi yöntemi, (Jarboui vd. 2008)’nin kuş sürüsü optimizasyon yöntemi ve (Weglarz, 1980)’in dağıtık genetik algoritma yöntemiyle buldukları sonuçlarla bu çalışmada önerilen Tabu Arama (TA) Yöntemiyle bulunan sonuçlar kıyaslanarak Çizelge 12’de gösterilmiştir.

Önerilen yöntem, BÇM-KKPC problemlerinin çözümü için öncelik ilişkilerine dayalı olarak başlangıç çözümü üretmekte ve tabu metasezgisel algoritmasını kullanarak proje tamamlanma süreselerini minimize ederek optimal sonuca ulaşmaktadır. Literatürdeki diğer yöntemler ile kıyaslandığında, Çizelge 12’de belirtildiği gibi elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin daha kısa sürede daha iyi sonuçlar verdiği bulgusu elde edilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan B-ÇM-KKPC 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 olabilecektir. 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 KKPÇ problemi hesaplama karmaşıklığı olan NP-zor 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, TA, kanguru algortiması, oryantirik, arı kolonisi algoritması, kuş sürüsü algoritması, nöral network algortiması, kurbağa zıplama algortiması, renk algortiması, demster shaffer algortiması vb metasezgisel arama yöntemleri kullanılarak problemin çözülmesi üzerinde çalışmalar yapılması mümkündür.

## 5. Kaynaklar

- Atlı, Ö. and Kahraman, C. 2013. Fuzzy critical path analysis, *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, **31**, 128-140.
- Atlı, Ö. 2011. Tabu search and an exact algorithm for the solutions of resource-constrained project scheduling problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, **2**, 255-267.  
<https://doi.org/10.1080/18756891.2011.9727781>

- Arauj, J.S.S., Santos, H.G., Gendron, B., Dominik J.S., Brito, S.S. and Souza, D.S., 2020. Strong bounds for resource constrained project scheduling: Preprocessing and cutting planes. *Computers and Operations Research*, **113**, 104782.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104782>
- Birjandi A. and Mousavi S.M., 2019. Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in Construction*, **100**, 84-102.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.029>
- Bouleimen, K. and Lecocq, H. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource constrained project scheduling problem. Tech. rep., Service de Robotique et Automatisation, Universite de Liege, 1998.
- Bouleimen, K. and Lecocq, H., 2003. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *In European Journal of Operational Research*, **49(2)**, 268-281.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00761-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00761-0)
- Bofill, M., Coll,J., Suy, J. and Villaret, M. 2020. SMT encodings for Resource-Constrained Project Scheduling Problems. *Computers & Industrial Engineering*, **149**, 106777.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106777>
- Buckley, J. J., 1985. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, **17(3)**, 233-247.
- Brucker,P., Drexl,A., Möhring, R. Neumann,K. and Pesch.E., 1999. Resources-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Model and Methods. *European Journal of Operational Research*, **112**,. 3-41.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5)
- Chanas, S. and Kamburowski, J., 1981. The use of fuzzy variables in pert. *Fuzzy Sets and Systems*, **5(1)**, 11-19.  
[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90030-0)
- Chen, S. P. and Hsueh, Y. J., 2008. A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks. *Applied Mathematical Modelling*, **32(7)**, 1289-1297.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.04.009>

- Drexl, A. and Gruenewald, J. 1993. Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. *IIE transactions*, **25**(5), 74-81. <https://doi.org/10.1080/07408179308964317>
- Drexl, A., Nissen R., Patterson J. and Salewski F. 2000. PROGEN/  $\pi X$  – An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions. *European Journal of Operational Research*, **125**, 59-72. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00205-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00205-2)
- Dubois, D. and Prade, H., 1988. Possibility theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. Computational Complexity. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9\\_139](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_139)
- Dubois, D. and Prade, H. 1983. Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory. *Information Sciences*, **30**(3), 183-224. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(83\)90025-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(83)90025-7)
- Elsayed, E. A., 1982. Algorithms for project scheduling with resource constraints. *International Journal of Production Research*, **20**(1), 95–103. <https://doi.org/10.1080/00207548208947751>
- Glover, F. 1990a. Tabu Search—Part II. *ORSA Journal on Computing*, **2**(1), 4-32. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2.1.4>
- Glover, F. 1990b. Tabu Search: A Tutorial. *Interfaces*, **20**(4), 74-94. <https://doi.org/10.1287/inte.20.4.74>
- Hapke, M., Jaszkiwicz, A., and Słowiński, R. 2000. Pareto simulated annealing for fuzzy multi-objective combinatorial optimization. *Journal of Heuristics*, **6**, 29–345. <https://doi.org/10.1023/A:1009678314795>
- Hartmann, S. and Drexl, A. 1998. Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms. *Networks: An International Journal*, **32**(4), 283-297. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970037\(199812\)32:4<283::AID-NET5>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970037(199812)32:4<283::AID-NET5>3.0.CO;2-I)
- Jarboui, B., Damak, N., Siarry, P. and Rebai, A., 2008. A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, **195**(1), 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.04.096>
- Kassandraa, T.R. and Suhartonob, D., 2018. Resource-Constrained Project Scheduling Problem using Firefly Algorithm. *Procedia Computer Science*, **135**, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.206>
- Knyazevaa, M., Bozhenyuka, A. and Rozenbergb, I. 2015. Resource-constrained project scheduling approach under fuzzy Conditions. *Procedia Computer Science* **77**, 56 – 64. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.359>
- Kulejewski, J., Ibadov, N. and Krzemiński, M. 2018. Scheduling Construction Projects Under Fuzzy Modelling of Resource Constraints. *MATEC Web of Conferences*, **196**, 04045. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819604045>
- Kurt, P.A., 2018. Çok projeli kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi: bir yazılım firmasında uygulama çalışması (Yüksek lisans), Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 104.
- Mori, M. and Tseng, C.C., 1997. A genetic algorithm for multi mode resource constrained project scheduling problem. *European Journal of operational Research*. **100**, 134-141. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00180-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00180-4)
- Nasution, S. H., 1994. Fuzzy Critical Path Method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **24**(1), 48-57. <https://doi.org/10.1109/21.259685>
- Özdamar, L. and Ulusoy, G. 1995. A survey on the resource-constrained project scheduling problem. *IIE Transactions*, **27**: 574-586. <https://doi.org/10.1080/07408179508936773>
- Patterson, J. H., 1984. A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resource, *Project Scheduling Problem*. *Management Science*, **30**(7), 854-867. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.7.854>
- Pellerin, R., Perrier, N. and Berthaut, F., 2020. A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, **280**, 395–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.063>
- Rahman, H.F., Chakraborty, R.K. and Ryan, M.J., 2020. Memetic algorithm for solving resource constrained

project scheduling Problems. *Automation in Construction*, **111**, 103052.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103052>

**İnternet kaynakları**

1-<http://129.187.106.231/psplib/>

Sharma, K. and Trivedi, M. K., 2020 Latin hypercube sampling-based NSGA-III optimization model for multimode resource constrained time–cost–quality–safety trade-off in construction projects *International Journal of Construction Management* (online).  
<https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1843769>

Talbot, F. B., 1982. Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: *The Nonpreemptive Case. Management Science*, **28**(10), 1197-1210.  
<https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1197>

Wang, X., and Huang, W., 2010. Fuzzy resource-constrained project scheduling problem for software development. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, **15**(1), 25-30.  
<https://doi.org/10.1007/s11859-010-0106-z>

Weglarz, J., 1980. On certain models of resource allocation, problems, *Kybernetes* 9, 61-66.

Yager, R. R., 1981. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval. *Information Sciences*, **24**(2), 143-161. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(81\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0020-0255(81)90017-7)

Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, **8**(3), 338-353. <https://doi.org/10.1109/2.53>

Zaman, F., Elsayed, F., Sarker, R., Essam, D. 2020. Hybrid evolutionary algorithm for large-scale project scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, **146**, 106567.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106567>

Zaman, F., Elsayed, S., Sarker, R., Essam, D., Carlos A. Coello C. 2021. An evolutionary approach for resource constrained project scheduling with uncertain changes. *Computers and Operations Research*, **125**, 105104.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105104>

Zimmermann, H.-J., 2001. Fuzzy Relations and Fuzzy Graphs. In *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*, 321-367.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0_6)