

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE
ÇİZELGELEME**

HAZIRLAYAN

SERDAR SOYSAL

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. BERNA DENGİZ

ANKARA – 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Doktora Programı çerçevesinde Serdar SOYSAL tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 18 / 08 / 2021

Tez Adı: Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı- Soyadı, Kurumu)		İmza
Prof. Dr. Mehmet KABAK	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Berna DENGİZ	Başkent Üniversitesi
Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK BAYKOÇ	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ	Başkent Üniversitesi
Doç. Dr. Kumru Didem ATALAY	Başkent Üniversitesi

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 25 / 08 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: Serdar SOYSAL

Öğrencinin Numarası: 21120083

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Doktora

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Berna DENGİZ

Tez Başlığı: Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 87 sayfalık kısmına ilişkin, 25 / 08 / 2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %7'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı

Prof. Dr. Berna DENGİZ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli bilgi ve katkılarıyla bana yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Berna DENGİZ'e ilgisi ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Değerli hocam Doç. Dr. Kumru Didem ATALAY'a tezin her aşamasında gösterdiği ilgi, sabır ve bitmeyen motivasyon destekleri için minnet ve şükran borçluyum. Teşekkürlerimi bir borç biliyorum. Sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Abdül Kadir GÖRÜR'e ne zaman yardıma ihtiyaç duysam emeğini esirgmeden sabırla verdiği destekler ve yaptığı abilik için sonsuz teşekkür ederim. Sevgili hocam Prof. Dr. Ferda Can ÇETİNKAYA'ya tezimin ve akademik hayatımın her aşamasında yön göstericiliği ve desteği için çok teşekkür ederim. Böyle bir akıl hocasına sahip olduğum için kendimi çok şanslı sayıyorum.

Tez süresi boyunca değerli bilgi ve önerilerinden faydalandığım hocam Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK BAYKOÇ'a çok teşekkür ederim. Tez jüri üyelerim, Prof. Dr. Mehmet KABAK ve Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ'e değerli katkıları için çok teşekkür ederim.

Desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, varlıkları ile şükür sebebim olan sevgili aileme, bana olan inançlarını her zaman hissettirdikleri, bütün yakınmalarımı dinleyip tekrar tekrar motive ettikleri ve en zor durumlarda yönümü bulmam için ışık tuttıkları için sonsuz teşekkür ederim.

Desteği ve sevgisi için dostum, kardeşim Öğr. Gör. Dr. Ahmet KABARCIK'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Serdar SOYSAL

KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE ÇİZELGELEME

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Günümüzde, havacılık, inşaat, savunma sanayi gibi alanlarda işletmeler, kıt kaynakların kullanımını dikkate alarak aynı anda birçok büyük projeyi birlikte yürütmektedir. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi (KKPÇP), birden çok projenin çizelgenmesine uyarlanarak alan yazında Kaynak Kısıtlı Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi (KKÇPÇP) olarak adlandırılmıştır. Birden çok projenin ve her bir projenin birden çok faaliyetinin olduğu bir durumda, öncüllük ilişkileri ve kaynak kısıtları dikkate alınarak tüm faaliyetlerin planlanması, önemli bir işletme yönetimi problemidir. Öte yandan, işletmeler yıllar içinde aynı iş için kullandıkları farklı makine ve donanımlara sahip olurlar. Bu makine ve donanımlar yeni/eski/farklı teknolojiye sahip olabileceğinden aynı işi farklı maliyetlerle farklı zamanlarda tamamlayabilmektedirler. Bilindiği üzere gerçek hayatta yürütülen projelerin faaliyet süreleri belirli değildir. Bu nedenle bu tezde, faaliyet sürelerinin stokastik olduğu, Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Projeli Çizelgeleme Problemi (KKÇMÇPÇP), KKPÇP'nin özel bir durumu olarak ele alınarak Şans Kısıtlı Programlama (ŞKP) yaklaşımı ile modellenmiştir. Amaç, her bir projenin bilinen teslim tarihinden sapmasını en aza indirecek şekilde tüm projeleri oluşturan faaliyetlerin, kaynak tahsis (KT) politikası altında, öncüllük ilişkilerini ve kaynak kısıtı şartlarını sağlayarak, sırasını ve çizelgesini belirlemek şeklinde tanımlanabilir.

KKÇMÇPÇP NP-zor bir problemidir. Bu nedenle, çözüm üretilmeyen büyük boyutlu problemler için probleme özgü bir Tavlama Benzetimi (TB) algoritması önerilmiştir. TB algoritması, eniyileme problemleri için iyi çözümler sunan olasılıklı arama yöntemidir. Sıralama kuralı tabanlı sezgisellerden, En Kısa İşlem Süresi kuralı ile TB için başlangıç çözümü üretilmiştir. Ayrıca, KT probleminin çözümü için Kombinatoryal Mezat (KM) yöntemi uygulanmıştır. Çözüm yaklaşımlarının etkinliği sayısal analizlerle incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Stokastik Proje Çizelgeleme, Çoklu Proje Çizelgeleme, Kaynak Tahsisi, Şans Kısıtlı Programlama.

ABSTRACT

Serdar SOYSAL

MULTI-MODE RESOURCE CONSTRAINED MULTI-STOCHASTIC PROJECT SCHEDULING

Başkent University Institute of Science

Department of Industrial Engineering

2021

Nowadays, the business organizations in many sectors like aviation, construction and defense industry carry out multiple projects simultaneously by taking into account the usage of scarce resources. By adapting Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) in a multi project environment, a research topic in the literature which is called Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem (RCMPSP) is created. The scheduling of activities in a multi project environment by considering precedence relationship and resource constraints is an important business management problem. Besides, business organizations have many different machines and equipment to do the same jobs. Since these machines and equipment can have new/old/various technologies, the same jobs can be completed with different cost rate and in various time frames. In real life, the duration of the activities in a project is not certain. Therefore, in this thesis, Multi-mode Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem (MMRCMPSP) with stochastic activity duration is considered as a special case of RCPSP and modeled as Chance Constrained Programming (CCP). The goal is to determine the sequence and the schedule of all activities by keeping precedence relations and providing resource constraints under resource dedication (RD) policy so that the tardiness for each project is minimized.

Since MMRCMPSP is NP-hard, a problem-specific Simulated Annealing (SA) algorithm is proposed to provide solutions for large-scale problem with no solution. SA algorithm is a stochastic search method that provides good solutions for optimization problems. Shortest Processing Time rule which is one of the sequencing rule based heuristic is suggested to generate initial solution. Besides, Combinatorial Auction (CA) method is used to solve RD problem. The effectiveness of our solution approaches is analyzed by computational analyses and the results are evaluated.

KEYWORDS: Stochastic Project Scheduling, Multi-Project Scheduling, Resource Dedication, Chance Constrained Programming

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ	5
2.1. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi.....	5
2.2. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Proje Çizelgeleme Problemi	7
2.3. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi.....	10
2.4. Proje Çizelgelemede Kaynak Tahsis Politikası.....	12
3. ALAN YAZIN ARAŞTIRMASI	16
4. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ	27
4.1. Problem Tanımı.....	27
4.2. Şans Kısıtlı Programlama	29
4.3. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi için Şans Kısıtlı Programlama Modeli.....	30
4.4. Sayısal Analizler	40
4.4.1. Test problemleri	40
4.4.2. Şans Kısıtlı Programlama sonuçlarının değerlendirilmesi.....	42
5. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMA	54
5.1. Tavlama Benzetimi Algoritması.....	54
5.1.1. Kombinatoriyal Mezat yöntemi	57
5.1.2. Probleme özgü geliştirilen Tavlama Benzetimi algoritması	61
5.2. Sayısal Analizler	68
5.2.1. Test problemleri	69
5.2.2. Sonuçların değerlendirilmesi.....	70

6. SONUÇ 86

KAYNAKLAR..... 88

EKLER

EK 1: Özet Alan Yazın Kaynak Tablosu

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Çok modlu yapı örneği.....	28
Tablo 4.2. Test problemlerinin özellikleri.....	41
Tablo 4.3. Standart sapma (σ) ve α düzeylerinin ŞKP modelinin performansına etkisi	43
Tablo 4.4. Standart sapma (σ) için tek yönlü varyans analizi sonuçları.....	47
Tablo 4.5. α düzeyleri için tek yönlü varyans analizi sonuçları	47
Tablo 4.6. Standart sapma (σ) ve α düzeylerinin ŞKP modelinin performansına etkisi	48
Tablo 4.7. Standart sapma (σ) için tek yönlü varyans analizi sonuçları.....	52
Tablo 4.8. α düzeyleri için tek yönlü varyans analizi sonuçları	52
Tablo 5.1. Test problemlerinin özellikleri.....	69
Tablo 5.2. TB algoritması analiz sonuçları – <i>j10</i> veri seti için.....	72
Tablo 5.3. TB algoritması analiz sonuçları - <i>j16</i> veri seti için	75
Tablo 5.4. Beşikçi test problemleri için GA ve TB algoritmasının karşılaştırılması	78
Tablo 5.5. TB algoritması analiz sonuçları – <i>j20</i> veri seti için.....	79
Tablo 5.6. TB algoritması analiz sonuçları – <i>j30</i> veri seti için.....	82

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.1. Çoklu proje ortamının genel yapısı	29
Şekil 5.1. TB algoritması çözüm gösterimi	62
Şekil 5.2. Yöntem 1'e göre komşu çözüm üretimi	66
Şekil 5.3. Yöntem 2'ye göre komşu çözüm üretimi	67

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ÇMPÇP	Çok Modlu Proje Çizelgeleme
GA	Genetik Algoritma
KKÇMÇPÇP	Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi
KKÇMÇSPÇP	Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi
KKÇMPÇ	Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Proje Çizelgeleme
KKÇPÇP	Kaynak Kısıtlı Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi
KKÇSPÇP	Kaynak Kısıtlı Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi
KKPÇP	Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemine
KKSPÇP	Kaynak Kısıtlı Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi
KM	Kombinatoriyal Mezat
KP	Kaynak Paylaşım
KT	Kaynak Tahsis
KY	Kritik Yol
PERT	Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Yöntemi
PÇP	Proje Çizelgeleme Problemi
SPT	En Kısa İşlem Süresi
ŞKP	Şans Kısıtlı Programlama
TB	Tavlama Benzetimi

1. GİRİŞ

Üretim ve servis sektöründe rekabet ortamı zorlu bir hale gelmektedir. Günümüzde, hızlı tüketimin, toplumlarda genel kabul görmesiyle, ürün ve hizmetlerden beklentiler de hızlı bir şekilde değişmektedir. Bu isteklere ve beklentilere cevap vermek için işletmeler, iş yapma biçimlerinde yeni yaklaşımlara yönelmektedirler. Giderek yatay organizasyon yapısının benimsenmesiyle, uzmanlık önem kazanmaktadır. Organizasyon içerisindeki iş bölümü artmakta, ekip halinde çalışma ön plana çıkmakta ve bölümler arası duvarlar kaldırılmaktadır. Bu etmenler de iş yapma biçimini, projeler şeklinde olmaya zorlamaktadır [1].

Proje, genel olarak başlangıç ve bitiş noktası bulunan, belirli amaca ulaşmak için kısıtlı kaynak ve süreyi kullanan, ölçülebilir hedefleri olan tekrar etmeyen tüm girişimlerdir. Her proje, planlama, uygulama ve kontrol süreçlerinden geçmektedir. Yöneylem araştırmasının, dolayısıyla endüstri mühendisliğinin, proje yönetimine olan ilgisi planlama aşamasına odaklanmıştır. Bu süreçte, çizelgeleme ve kaynak dağıtımı ile projeler yapılandırılmaktadır. Proje Çizelgeleme Problemi (PÇP), yöneylem araştırması, yönetim bilimleri gibi alanlarda sıklıkla çalışılan, günlük hayat problemlerinde uygulanma fırsatı bulan önemli bir eniyileme problemidir. Bundan dolayı hem endüstri mühendisliği disiplininin hem de başka birimlerdeki araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir [1].

Proje çizelgeleme, bir karar verme sürecidir. Temel olarak, önceden belirlenen hedef ya da hedeflere ulaşmak için projeyi oluşturan işlerin kendi aralarındaki öncüllük ilişkilerini de dikkate alarak çizelgelenmesiyle ilgilenir. Kritik Yol (KY) metodu kaynak kısıtı dikkate alınmadığında, proje çizelgeleme alanında en çok kullanılan yöntemlerdendir. 1950'li yılların sonunda Kelly [2] tarafından önerilmiştir. Projeleri çizelgelemede amaç, projenin tamamlanma süresini veya proje süresini uzatmadan faaliyetlerin ne kadar ertelenebileceğinin hesaplanması olduğunda, projeyi oluşturan faaliyetlerin süreleri de belirli ve sabit ise KY metodu rahatlıkla kullanılabilir.

Kaynaklar, proje faaliyetlerinin yerine getirilmesi için gerekli olan, kısıtlı öğelerdir. PÇP'lerine, kaynak kısıtı eklenerek problem KKPÇP'ne dönüştürülür. KKPÇP de, projeyi oluşturan faaliyetler arasındaki öncüllük ilişkisi ve kaynak kısıtı dikkate alınarak, belirlenen amacı eniyileyecek şekilde çizelge oluşturulmaya çalışılır.

Kaynaklar çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu tezde, alan yazında en fazla incelenen ve çalışmalarda gerçekçiliği artırmak için tercih edilen zaman tabanlı kaynak sınıflandırması kullanılacaktır. Bu sınıflandırmaya göre kaynaklar, i) Yenilenebilir (belirli zaman dilimi içerisinde kısıtlıdır ancak kullanılarak tamamen tükenmezler) ve ii) Yenilenemez (proje boyunca kullanıldıkça tükenirler), olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Alan yazında bunların dışında, çift yönden kısıtlı kaynaklar da tanımlanmıştır. Bunlar hem belirli zaman diliminde hem de proje sürecinde toplam kullanım miktarı üzerinde çift yönden kısıtlıdır. Ayrıca, bir diğer kaynak türü de kısmi yenilenebilir kaynaklardır. Bu tarz kaynaklarda, belirli zaman dilimleri için, kaynak kullanım üst sınırları belirlenebilmektedir. Bu sayede, vardiya düzeni içeren problemlere rahat şekilde uygulanabilmektedirler [1].

Günümüzde işletmeler aynı anda birden çok proje yürütmektedirler. Payne [3], projelerin %90'ının çoklu proje ortamında gerçekleşmekte olduğunu belirtmiştir. Özellikle inşaat sektöründe ve AR&GE sektöründe birden fazla proje eş zamanlı yürütülmektedir. KKÇPÇP, birden çok projenin çizelgelenmesine uyarlanarak, alan yazında Kaynak Kısıtlı Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi (KKÇPÇP) olarak adlandırılan yeni bir çalışma alanı oluşturulur. Bu sebeple, KKÇPÇP gerçek hayat problemlerine daha yakın bir yapıyı temsil etmektedir.

Proje çizelgelemede, bir faaliyetin gerçekleşme süresi ile kullanılan özdeş kaynakların miktarı arasında ters ilişki bulunmaktadır. Projelerde, aynı faaliyet için kullanılacak farklı kaynak tipleri (yeni/eski/farklı teknoloji) olabilir. Birim zamanda, daha fazla kaynak kullanılırsa faaliyetlerin gerçekleşme süresi belirli oranda kısılırken, maliyet belirli oranda artar. Faaliyetlerin gerçekleşmesi için, maliyet ve süre arasında bir ödünleşim durumu ortaya çıkar. Proje yöneticileri ek maliyetleri kabul ederek projedeki faaliyetlerinin gerçekleşme süresini kısaltmayı tercih edebilirler. Proje çizelgelemede, her bir farklı maliyet-süre çiftine karşı gelen nokta ise mod olarak tanımlanmıştır. PÇP'ine, mod kavramının eklenmesi ile alan yazında Çok Modlu Proje Çizelgeleme Problemi (ÇMPÇP) olarak isimlendirilen yeni bir problem tanımlanmış olur. Tezin ilerleyen bölümlerinde açıklanacak olan matematiksel modelde, ilgili karar değişkeni ile hangi modun seçileceği, yani faaliyetin hangi kaynakları kullanıp ne kadar sürede tamamlanacağı belirlenecektir. Eğer KKÇPÇP'de, bir ya da daha fazla faaliyet için birden fazla mod noktası var ise yeni problemimiz Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi (KKÇMÇPÇP) olarak adlandırılır.

Kaynak yönetim politikası, projelerin, kaynakları ne şekilde kullanacaklarını belirlemektedir. Çoklu proje ortamındaki proje ve kaynakların yapılarına uygun olarak, hangi politikanın kabul edileceğine karar verilmektedir. Bu politikalardan en yaygını, kaynakların ortak bir havuzda tutularak ve tüm projelere hizmet verebildiği, kaynak paylaşım (KP) politikasıdır. Bu politikaya göre, herhangi bir projelerdeki her bir faaliyet, ortak havuzdaki kaynaklardan ihtiyaç duyduğu miktarda kullanılmaktadır.

Bazen projenin, bazen de kaynakların karakteristik özellikleri KP politikasının kullanımını mümkün kılmamaktadır. Örneğin, birbirinden coğrafi konum olarak uzak bölgelerde yürütülen projelerin ortak havuzdan kaynak kullanması oldukça masraflı olabilir ve tercih edilmez. Ya da projede kullanılacak olan ekipmanın kurulum ve transfer maliyetleri çok yüksek ise yine KP politikası tercih edilmez. Bu durumda farklı kaynak yönetim politikalarına ihtiyaç duyulur.

Kaynakların projelere belirli miktarlarda tahsis edildiği ve yalnızca o projelerde kullanımına izin verildiği kaynak yönetim politikası, KT politikası olarak adlandırılır. Birçok alanda projeler eşzamanlı ve farklı coğrafi bölgelerde yürütülme gereksinimi duyabilmektedir. Bu nedenle, KT politikasının kullanımı KKÇMÇPÇP için daha gerçekçi bir kaynak yönetim politikasıdır.

Kaynak transfer politikasında ise, kaynaklar projelere atanmakta ancak atandıkları projedeki iş tamamlandığında diğer projelere transfer edilebilmektedir. Yukarıda verilen kaynak yönetim politikalarının birleşiminden oluşan bir politika olarak görülebilir.

Bu tezde, birden fazla projenin yer aldığı, projedeki faaliyetlerin çok sayıda alternatif moda gerçekleştirilebilme olanağına sahip olduğu, kısıtlı kaynaklar üzerinde kaynak tahsis politikasının uygulandığı ve projelerdeki faaliyetlerin sürelerinin belirli olmadığı (stokastik olduğu) ortamdaki proje çizelgeleme problemi üzerine odaklanılmıştır. Alan yazında yaptığımız araştırmaya göre, çoklu proje ortamında, proje faaliyetlerinin gerçekleştirilebilmesi için çoklu mod alternatiflerinin yer aldığı, kaynak tahsisi politikasını benimseyen, stokastik faaliyet sürelerinin dikkate alındığı PÇP'nin daha önce çalışılmamış olması, gerçekçi çözümlerin elde edilmesi bakımından önemli bir eksiklik olup bu alanda araştırma yapmak için bir ihtiyaç doğurmaktadır.

Tezde ele alınan stokastik faaliyet sürelerine sahip KKÇMÇPÇP, ŞKP yaklaşımı ile modellenmiştir. Amaç, her bir projenin bilinen teslim tarihinden sapsmasını en aza indirecek şekilde tüm projeleri oluşturan faaliyetlerin, KT politikası altında, öncüllük ilişkileri ve

kaynak kısıtı şartlarını sağlayarak, sırasını ve çizelgesini belirlemek şeklinde tanımlanabilir. Küçük boyutlu test problemleri, ŞKP ile çözümlenerek sayısal analizlerle sonuçlar değerlendirilmiştir.

Blazewicz vd. [4] KKÇP'nin NP-zor problem olduğunu ispat etmişlerdir. KKÇMÇPÇP'de buna bağlı olarak NP-zor bir problemdir. Bu nedenle, ŞKP ile çözüm üretilemeyen büyük boyutlu problemler için probleme özgü bir Tavlama Benzetimi (TB) algoritması tez kapsamında önerilmiştir. TB algoritması eniyileme problemleri için iyi çözümler sunan olasılıklı arama yöntemidir. Yinelenen komşu çözüm üretme prosedürü ile çözüm uzayını tarar ve arama yönünü, uygulandığı problemin amaç fonksiyonunu daha iyi seviyeye taşıyacak komşu çözümlere göre belirler. Ancak, yerel eniyilere takılmamak için kötü çözümler de zaman zaman kabul edilir. Sıralama kuralı tabanlı sezgisellerden, En Kısa İşlem Süresi kuralı ile TB için başlangıç çözümü üretilmiştir. Bununla beraber, KT probleminin çözümü için KM yöntemi uygulanmıştır. TB algoritmasının etkinliği sayısal analizlerle incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışma konusunun seçilmesindeki birinci motivasyon kaynağı, proje çizelgeleme ihtiyacının iş yaşamında birçok alanda artarak var olmasıdır. İkinci motivasyon ise, alan yazında yaptığımız araştırmaya göre KKÇMÇPÇP'nin, gerçek hayata uygun bir yaklaşım olan stokastik faaliyet süreleri ile daha önce çalışılmamış olmasıdır. Bu probleme çözüm üretmek hem teorik çalışmalarda hem de pratikte birçok araştırmacıya ve karar vericiye öncülük edecektir.

Tezin diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde KKÇP, ÇMÇP, KKÇMÇPÇP, KT problemi detaylı olarak anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, tez konusu ile ilgili alan yazın taraması sonuçlarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, tez konusu olan problemin tanımı verilmiş, çözümü için geliştirilen ŞKP modeli sunulmuştur. Ayrıca, ŞKP modelinin etkinliği test problemleri üzerinde incelenmiş ve sayısal analizlerle ortaya konulmuştur. Beşinci bölümde, problem için uyarlanan TB algoritması detaylı şekilde incelenmiştir. Sezgisel algoritmanın etkinliği çözüm kalitesi, çözüm zamanı gibi ölçütler dikkate alınarak sayısal analizlerle gösterilmiştir. Tezin altıncı ve son bölümünde, tez kapsamında yapılan çalışmalara ilişkin genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Bu bölümde öncelikle KKPÇP açıklanarak, proje çizelgeleme problemlerindeki mod kavramının ne olduğu ve nasıl kullanıldığı verildikten sonra, sırasıyla ÇMPÇP ve KKÇMÇPÇP tanımlanmıştır. Daha sonra KT politikası altında KKÇMÇPÇP incelenmiştir. Tanımlanan her bir çizelgeleme problemi için matematiksel modelleri sunulmuştur.

2.1. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi

KKPÇP’de, kısıtlı kaynaklar kullanılarak, öncüllük ilişkileri dikkate alınarak projeyi oluşturan faaliyetlerin amaç fonksiyonunu eniyileyecek şekilde çizelgenmesi istenmektedir. Blazewicz vd. [4], KKPÇP’nin NP-zor problem olduğunu göstermişlerdir. Problemin varsayımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Faaliyetlerin süresi belirlidir (deterministik).
- ii. Faaliyetlerin birim zamanda kaynak kullanım miktarı sabittir.
- iii. Faaliyete atanan kaynak, faaliyet süresince ilgili faaliyet tarafından kullanılır.
- iv. Bir faaliyet başladıktan sonra, ara verilmeden, kesintisiz bitirilmek zorundadır.
- v. Faaliyetler iptal edilemez. Projeyi oluşturan her faaliyet tamamlanmak zorundadır.

Bu varsayımların bazıları kullanılarak alan yazında farklı problem türleri tanımlanmıştır [1].

Proje çizelgeleme faaliyetlerin gerçekleşmesi için kullanılan kaynaklar çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Alan yazında en sık kullanılan sınıflandırma, zaman bazında olmaktadır. Buna göre kaynaklar, yenilenebilir, yenilenemez ve çift yönden kısıtlı kaynaklar olarak nitelendirilirler. Yenilenebilir kaynakların belirli zaman diliminde kullanım miktarı kısıtlıdır. Ancak, bu kaynaklar tükenmezler ve gerçekleşmesinde kullandıkları faaliyetler tamamlandığında tekrar kullanıma hazır hale gelirler. İnsan kaynağı, iş makinası yenilenebilir kaynaklara örnek olarak verilebilir.

Bir diğ er kaynak sınıfı da yenilenemez kaynaklardır. Bu kaynaklar proje süresince kullanıldıkça tükenirler ve projede kullanılacak olan miktarları kısıtlıdır. Ofis sarf malzemeleri yenilenemez kaynaklara örnektir. Çift yönden kısıtlı kaynaklar kullanımı ise hem belirli zaman diliminde hem de proje süreci boyunca kısıtlıdır. Bu kaynak tipine örnek olarak para verilebilir. Belirli faaliyet için ayrılan bütçe kısıtlı olurken, projenin toplam bütçesi de kısıtlı olabilir.

Bir diğ er sınıflandırma yöntemi de kaynakları ayrık ve sürekli kaynak olarak sınıflandırmaktır. Adet ile ifade edilebilen kaynaklara ayrık kaynak denilmektedir. Örneğ in, 2 bilgisayar sunucusu ayrık bir kaynaktır. Sürekli kaynaklar ise adet ile ifade edilemez ve bölünemezler. İnternet bağlantısı sürekli kaynağ a örnek olarak verilebilir [1].

KKPÇP için Pritsker vd. [5] tarafından geliştirilen tamsayılı doğrusal programlama modeli:

$$\sum_{t=1}^T x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (2.1)$$

$$\sum_{t=1}^T tx_{it} \leq \sum_{t=1}^T tx_{jt} - d_j \quad \forall (i, j) \in J, i \in P_j \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{jt} q_{jr} \leq Q_r \quad \forall r \in R \quad (2.3)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

kısıtları altında

$$enk z = \sum_{t=1}^T tx_{jt} \quad (2.5)$$

Dizin kümeleri, parametreler:

- t zaman indisi ($t=1, \dots, T$)
- j faaliyet indisi ($j=1, \dots, J$)
- R yenilenebilir kaynaklar kümesi, $r \in R$
- P_j j faaliyetinin öncüllerinin kümesi
- q_{jr} j faaliyetinin r kaynağından birim zaman kullanım miktarı
- Q_r r yenilenebilir kaynağının birim zaman kullanım üst sınırı
- d_j j faaliyetinin süresi

Karar değişkeni:

$$x_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ faaliyeti } t \text{ dönemi sonunda bitiyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Modeldeki, eşitlik (2.5)'te verilen amaç fonksiyonu, proje süresini enküçükmektedir. (2.1) kısıt kümesi her faaliyetin mutlaka çizelgelenmesi sağlanır. (2.2) kısıt kümesi, j faaliyeti ile bunun öncülü olan i faaliyetinin arasındaki öncüllük ilişkisi sağlar. (2.3) kısıt kümesi, birim zamandaki kaynak kısıtı ile ilgilidir. (2.4) değişkenin sınırlarını belirlemek için yazılmıştır.

2.2. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Proje Çizelgeleme Problemi

Faaliyetlerin gerçekleşme süresi ile kullanılan kaynak miktarı arasında bir ilişki bulunmaktadır. Genel olarak birim zamanda daha fazla kaynak kullanımının, maliyeti artırırken, faaliyet süresini kısaltması beklenmektedir. Bu durumda da, faaliyetler için maliyet-süre ödünleşimi ortaya çıkmaktadır. Proje çizelgelemede, her bir maliyet-süre çiftine karşı gelen nokta, mod olarak isimlendirilir. Faaliyetle ilişkilendirilen mod, faaliyetin gerçekleştirilmesi için hangi kaynaktan ne kadar kullanılması gerektiğini, buna bağlı olarak

ne kadarlık bir maliyetin göze alındığını ve sonucunda da faaliyetin ne kadarlık bir sürede tamamlandığını belirtmektedir. Kısaca mod, bir faaliyet için kullanılabilir kaynak alternatiflerine bağlı olarak ortaya çıkacak farklı maliyet ve süreleri temsil eder.

Bir ya da daha çok faaliyeti birden çok moda sahip olan proje çizelgeleme problemi, ÇMPÇP olarak isimlendirilir. Kaynak kısıtının da dikkate alındığı ÇMPÇP’i ise KKÇMPÇP olarak tanımlanır. Alan yazında tanımlanan, maliyet süre ödünleşimi haricinde de ödünleşim türleri bulunmaktadır. Kaynak-kaynak ödünleşiminde, faaliyetlerin süresi sabitken kullanılan kaynak türleri değişmektedir. Örneğin inşaat projelerinde, temel açma işleminde, 2 iş makinesi ve 2 operatör kullanılırken, aynı faaliyetin 10 işçiyle de yapılması gibi [1].

Bir faaliyetin, her iki modu için de aynı kaynaktan eşit miktarda kullanım söz konusu iken, faaliyet süreleri eşit ise ya da birinin ki diğerinden daha uzun ise, bu mod verimsiz mod olarak isimlendirilir. Herhangi bir modun kaynak kullanım miktarı, proje ortamında eldeki yenilenebilir ya da yenilenemez kaynak miktarını aşıyorsa bu mod, uygulanamaz mod olarak ifade edilir.

KKÇMPÇP’nin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir [1].

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jm\tau} \leq K_r \quad t = 1, \dots, T, r \in R \quad (2.7)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} t x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t - d_{jm}) x_{jmt} \quad j = 2, \dots, J, i \in P_j \quad (2.8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} x_{jmt} \leq K_r \quad r \in N \quad (2.9)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J, m = 1, \dots, M_j, t = EFT_j, \dots, LFT_j \quad (2.10)$$

kısıtları altında

$$enk z = \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} tx_{j1t} \quad (2.11)$$

Dizin kümeleri, parametreler:

- t zaman indisi ($t=1, \dots, T$)
- m mod indisi ($m=1, \dots, M_j$)
- j faaliyet indisi ($j=1, \dots, J$)
- R yenilenebilir kaynaklar kümesi, $r \in R$
- P_j j faaliyetinin öncüllerinin kümesi
- N yenilenemez kaynaklar kümesi
- M_j j faaliyetinin mod sayısı
- k_{jmr} j faaliyetinin m modunda r kaynağından birim zaman kullanım miktarı
- K_r r yenilenebilir kaynağının birim zaman üst sınırı
- d_{jm} j faaliyetinin m modundaki süresi
- EFT_j j faaliyetinin en erken bitiş zamanı
- LFT_j j faaliyetinin en geç bitiş zamanı

Karar değişkeni:

$$x_{jmt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ faaliyeti } m \text{ modunda } t \text{ dönemi sonunda bitiyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Eşitlik (2.11)'de verilen amaç fonksiyonunda, proje süresini enküçükmek hedeflenmektedir. (2.6) kısıt kümesi ile her faaliyetin mutlaka çizelgelenmesi sağlanır. (2.7) kısıt kümesi, yenilenebilir kaynaklar için birim zamanda kullanım üst sınırı getirir. (2.8) kısıt kümesi, j faaliyeti ile bunun öncülü olan i faaliyetinin arasındaki öncüllük ilişkisi gerekliliğinin yerine getirilmesini sağlar. (2.9) kısıt kümesi, yenilenemez kaynaklar için birim zamanda kullanım üst sınırı getirir. (2.10) kısıt kümesi değişken için sınırları belirlemek adına kullanılmaktadır.

2.3. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi

KKÇMÇPÇP'i birden çok projenin aynı anda yürütüldüğü çoklu proje ortamına taşınırsa, yeni problem KKÇMÇPÇP olarak tanımlanır. Bölüm 2.2'de verilen matematiksel model temel alınarak, KKÇMÇPÇP'nin modeli aşağıda verilmiş ve eklenen parametreler açıklanmıştır:

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} x_{vjmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J, \forall v \in V \quad (2.12)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EFT_{vi}}^{LFT_{vi}} t x_{vimt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} (t - d_{vjm}) x_{vjmt} \quad \forall (i, j) \in P_v \text{ ve } \forall v \in V \quad (2.13)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=t}^{t+d_{vjm}-1} k_{vjmr} x_{vjmt} \leq K_r \quad t = 1, \dots, T, r \in R \quad (2.14)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=1}^T k_{vjmr} x_{vjmt} \leq K_r \quad r \in N \quad (2.15)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J, m = 1, \dots, M_j, t = EFT_j, \dots, LFT_j \quad (2.16)$$

kısıtları altında

$$enk z = \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} tx_{vJMt} \quad (2.17)$$

Dizin kümeleri, parametreler:

- t zaman indisi ($t=1, \dots, T$)
- m mod indisi ($m=1, \dots, M_j$)
- j faaliyet indisi ($j=1, \dots, J$)
- V proje kümesi, $v \in V$
- R yenilenebilir kaynaklar kümesi, $r \in R$
- P_v proje v 'nin öncüllük ilişkileri kümesi
- N yenilenemez kaynaklar kümesi
- M_j proje v 'nin j faaliyetinin mod sayısı
- k_{vjmr} v projesindeki j faaliyetinin m modunda r kaynağından birim zaman kullanım miktarı
- K_r r yenilenebilir kaynağının birim zaman üst sınırı
- d_{vjm} proje v 'nin j faaliyetinin m modundaki süresi
- EFT_j j faaliyetinin en erken bitiş zamanı
- LFT_j j faaliyetinin en geç bitiş zamanı

Karar değişkeni:

$$x_{vjmt} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } v \text{ projesinin } j \text{ faaliyeti } m \text{ modunda } t \text{ dönemi sonunda bitiyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Eşitlik (2.17)'deki amaç fonksiyonunda, proje süresini enküçükleme hedeflenmektedir. (2.12) kısıt kümesi ile her faaliyetin mutlaka bir defa çizelgelenmesi sağlanır. (2.13) kısıt kümesi, j faaliyeti ile bunun öncülü olan i faaliyetinin arasındaki öncüllük ilişkisi gerekliliğinin yerine getirilmesini sağlar. (2.14) kısıt kümesi, yenilenebilir kaynaklar için birim zamanda kullanım üst sınırı getirir. (2.15) kısıt kümesi, yenilenemez kaynaklar için birim zamanda kullanım üst sınırı getirir. (2.16) kısıt kümesi değişken için sınırları belirlemek için kullanılmaktadır.

2.4. Proje Çizelgelemede Kaynak Tahsis Politikası

Kaynak yönetim politikası ile kaynakların projelerde nasıl kullanılacağı belirlenmektedir. Çoklu proje çizelgeleme problemi alanında kaynakların yönetimi konusunda farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Günümüzde, şirketlerin aynı anda birden fazla projeyi birlikte yürütmeleri, kaynakların yerine getirecekleri işe uygun olarak özelleşmeleri ve uzmanlaşmaları, KT politikasını Bölüm 1'de açıklanan diğer kaynak yönetim politikalarına göre daha avantajlı hale getirmektedir.

Kaynakların projelere belirli miktarlarda tahsis edildiği ve yalnızca o projelerde kullanımına izin verildiği KT politikasının uygulanmasıyla, coğrafi olarak uzak bölgelerde devam eden projeler için kurulum ve transfer maliyeti en aza indirilirken, bu aşamada boşa harcanan zamandan da tasarruf edilir. Ayrıca, kaynakların projeye özel kullanılmasıyla kaynak verimliliği artırılırken özellikle insan kaynağı konusunda uzmanlaşma imkânı sağlanır.

Beşikçi vd. [6], kaynak kısıtlı çoklu proje ortamında, projeleri oluşturan faaliyetlerin birden fazla maliyet-süre alternatifleri (mod) ile çalışabildiği proje çizelgeleme problemine çözüm aramışlardır. İlk kez KT politikası, bu çalışmada dikkate alınmıştır. KT problemi için çalışmada sunulan model:

$$\sum_{m \in M_{vj}} \sum_{t \in E_{vj}}^{L_{vj}} x_{vjmt} = 1 \quad \forall j \in J_v \text{ ve } \forall v \in V \quad (2.18)$$

$$\sum_{m \in M_{va}} \sum_{t=E_{va}}^{L_{va}} t x_{vamt} \leq \sum_{m \in M_{vb}} \sum_{t=E_{vb}}^{L_{vb}} (t - d_{vbm}) x_{vbm} \quad \forall (a, b) \in P_v \text{ ve } \forall v \in V \quad (2.19)$$

$$\sum_{j \in J_v} \sum_{m \in M_{vj}} \sum_{q=t}^{t+d_{vjm}-1} r_{vjkm} x_{vjmq} \leq BR_{vk} \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (2.20)$$

$$\sum_{j \in J_v} \sum_{m \in M_{vj}} \sum_{t=E_{vj}}^{L_{vj}} w_{vjim} x_{vjmt} \leq BW_{vi} \quad \forall i \in I, \forall v \in V \quad (2.21)$$

$$\sum_{v \in V} BR_{vk} \leq R_k \quad \forall k \in K \quad (2.22)$$

$$\sum_{v \in V} BW_{vi} \leq W_i \quad \forall i \in I \quad (2.23)$$

$$TC_v \geq C_v \left(t \sum_{m \in M_{vN}} x_{vNmt} - DD_v \right) \quad \forall t = E_{vN} \dots L_{vN} \text{ ve } \forall v \in V \quad (2.24)$$

$$BR_{vk}, BW_{vi}, TC_v \in Z^+ \quad \forall v \in V, \forall r \in R, \forall i \in I \quad (2.25)$$

$$x_{vjmt} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J_v, \forall t \in T, \forall m \in M_{vj}, \forall v \in V \quad (2.26)$$

kısıtları altında

$$\text{enk } z = \sum_{v \in V} TC_v \quad (2.27)$$

Dizin kümeleri:

- T zaman dönemleri kümesi, $t= 1 \dots T$
- K yenilenebilir kaynaklar kümesi, $k = 1 \dots K$
- I yenilenemez kaynaklar kümesi, $i = 1 \dots I$
- V proje kümesi, $v = 1 \dots V$
- J_v proje v 'nin faaliyet kümesi, $j = 1 \dots J_v$
- P_v proje v 'nin öncüllük ilişkileri kümesi
- M_{vj} proje v 'nin j inci faaliyetinin mod kümesi, $m = 1 \dots M_{vj}$

Parametreler:

- E_{vj} proje v 'nin j inci faaliyetinin en erken bitiş zamanı
- L_{vj} proje v 'nin j inci faaliyetinin en geç bitiş zamanı
- d_{vjm} proje v 'nin m modundaki j inci faaliyetinin süresi
- $r_{vjk m}$ proje v 'nin m modundaki j inci faaliyetinin yenilenebilir kaynak k kullanım miktarı
- $w_{vji m}$ proje v 'nin m modundaki j inci faaliyetinin yenilenemez kaynak i kullanım miktarı
- C_v proje v 'nin göreceli ağırlığı
- DD_v proje v 'ye atanan bitiş tarihi
- R_k yenilenebilir kaynak k 'nin toplam kapasitesi
- W_i yenilenemez kaynak i 'nin toplam kapasitesi

Karar değişkenleri:

$$x_{vjmt} = \begin{cases} 1, & \text{proje } v \text{ nin } m \text{ modundaki } j \text{ inci faaliyeti } t \text{ periyodunda tamamlanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

BR_{vk} proje v 'ye tahsis edilen yenilenebilir kaynak k miktarı

BW_{vi} proje v 'ye tahsis edilen yenilenemez kaynak i miktarı

TC_v proje v 'nin ağırlıklandırılmış gecikmesi

Eşitlik (2.27)'de verilen amaç fonksiyonunda, tüm projeler için toplam ağırlıklı gecikme enküçüklenmektedir. (2.18) kısıt kümesi, tüm projelerde, faaliyetlerin yalnız bir defa çizelgeleneceğini garanti eder. (2.19) kısıt kümesi, her projenin faaliyetleri arasındaki öncüllük ilişkilerini göstermektedir. Aralarında öncüllük ilişkisi bulunan iki faaliyetten öncül olanın tamamlanma zamanı, ardılının tamamlanma süresinden büyük olamaz. (2.20) kısıt kümesi, her proje için, tahsis edilen yenilenebilir kaynakların en büyük değerini belirlemektedir. Her projenin, her zaman dilimi için yenilenebilir kaynak kullanımı, o projeye tahsis edilen yenilenebilir kaynak kullanımından fazla olamaz. (2.21) kısıt kümesi, her proje için, tahsis edilen yenilenemez kaynakların en büyük değerini ayarlamaktadır. Her projenin, her zaman dilimi için yenilenemez kaynak kullanımı, o projeye tahsis edilen yenilenemez kaynak oranından fazla olamaz. Kısıt kümesi (2.22) ile tüm projeler için tahsis edilen yenilenebilir kaynaklar, toplam yenilenebilir kaynak kapasitesini aşamaz. Kısıt kümesi (2.23) ile tüm projeler için tahsis edilen yenilenemez kaynak miktarı toplam yenilenemez kaynak miktarını aşamaz. (2.24) kısıt kümesi, her proje için ağırlıklı gecikmeyi hesaplamaktadır. Kısıt kümesi (2.25) ve (2.26), değişkenler için sınırları belirlemek için kullanılmaktadır.

KP politikasını benimseyen KKÇMÇPÇP için hazırlanan modelden farklı olarak, KT politikasını benimseyen KKÇMÇPÇP için model geliştirilirken, tahsis edilen yenilenebilir (BR_{vk}) ve yenilenemez kaynak miktarları (BW_{vi}) karar değişkeni olarak tanımlanmış ve kısıt kümesi (2.20) ve (2.21) ile modele dâhil edilmişlerdir. Modeli doğrudan etkileyen ve modelin çözümü sonrası, amaç fonksiyonunu eniyilecek şekilde değer alacak bu değişkenler, KT probleminin de çözüm sonucunu oluşturmuş olacaktır.

3. ALAN YAZIN ARAŞTIRMASI

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri, teorik ve uygulama açısında oldukça önemli olan ve araştırmacıların ilgisini çeken konulardır. Bu sebeple alan yazında, bu problemle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Blazewicz vd. [4] KKPCP'nin NP-zor problem olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenle, problemin çözümü için kullanılacak kesin çözüm yöntemleri sadece küçük boyutlu problemler için kullanılabilir. Kesin çözüm yöntemleri yerine, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemleri önererek probleme özgü çözüm arayan birçok çalışma bulunmaktadır.

Pritsker vd. [5], 0-1 tamsayılı programlamayı kullanarak probleme kesin çözüm arama çalışmalarında öncü olmuşlardır. Çalışmada üç olası amaç fonksiyonu tartışılmıştır: üretimde geçen toplam süreyi enküçükmek, tüm işleri tamamlama süresini enküçükmek ve toplam gecikme süresi/gecikme cezasını enküçükmek. Daha sonra, Patterson ve Huber [7] en kısa süreli çizelgeler elde etmek için 0-1 tamsayılı programlama ile birlikte sınırlama tekniklerini kullanılmışlardır. Stinson vd. [8], Dal ve Sınır algoritmasının KKPCP'ye ilk uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Christofides vd. [9], kaynak ihtiyacının kullanılabilir kaynak miktarından fazla olduğu durumlarda meydana gelen çakışmaları ortadan kaldırmak için ayıran arklar (disjunctive arcs) kullanma fikrine dayalı Dal ve Sınır algoritması önermişlerdir. Brucker vd. [10] KKPCP'nde tüm işlerin tamamlanma süresini enküçükmek için Dal ve Sınır algoritması kullanmışlardır.

KKPCP'ne uygulanan kesin çözüm yöntemlerinin belirli büyüklükteki problemlere makul sürede cevap üretebildiği, problem boyutu büyüdükçe ya çözüme erişilemediği ya da çözüm için uzun süre beklenmesi gerektiği, kesin çözüm yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalarda sunulmuştur ([7], [10]). Bu nedenle, sezgisel algoritmalar makul sürelerde kesin çözüm ya da kesin çözüme yakın çözümler üretmek için kullanılmıştır. Davis ve Patterson [11] çalışmalarında sekiz farklı sezgisel sıralama algoritmasının etkinliğini, seksen üç problem örneğinde test etmiştir. Bunlardan En Kısa Gevşek Zaman kuralı, proje süresinin enküçülenmesi bakımından en iyi performansı vermiştir. Çoklu çözüm üreten sezgisel yöntemlerden, çizelgeleme için yapılacak seçime rassallık katan Örnekleme Yöntemi, Cooper [12] tarafından 1976 yılında çalışılmıştır. Boctor [13] KKPCP'nin çözümü için öncelik kuralına dayalı yedi farklı sezgisel algoritma önermiştir.

Hartmann ve Kolisch [14] sezgisel algoritmaların performansını ölçmek için bir deney tasarımı sunmuşlardır. Proje boyutu, kaynak düzeni, ağ karmaşıklığı gibi probleme ait özelliklerin, sezgisel algoritmalar üzerindeki etkisi de araştırmaya dâhil edilmiştir. Kanit vd. [15] En Büyük Kalan Yol Uzunluğu, En Geç Bitirme Zamanı ve En Kısa Gevşek Zaman olmak üzere üç sezgisel yöntemin etkinliğini, toplu konut projelerinin çizelgelemede test etmişlerdir. Test edilen yöntemler, En Büyük Kalan Yol Uzunluğu yöntemi altı projede, En Geç Bitirme Zamanı üç proje ve kalan tek projede de En Kısa Gevşek Zaman yöntemi etkili olmuştur.

Sezgisel yöntemlerin dışında daha hızlı ve etkin çözümlere ulaşmak için alan yazında meta-sezgisel algoritmalar sıklıkla tercih edilmektedir. Genetik algoritma (GA), kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi için en çok tercih edilen meta-sezgisel algoritmalarındandır. Holland [17] tarafından 1975 yılında Darwin'in evrim teorisinden esinlenilerek önerilmiştir. GA, çeşitli seçme ve çeşitlendirme süreçlerinden yararlanarak büyük çözüm alanından en iyi çözüme erişmeye çalışır. Lee ve Kim [17] çalışmalarında çeşitlendirme yöntemi olarak tek noktada çaprazlama kullanmışlardır. Hartmann [18] yaptığı çalışmada, KKPÇP için daha önce hazırlanan iki GA örneği ile kendi önerdikleri GA'yı karşılaştırmıştır. Önerdiği GA, probleme özgü bilgileri barındıran permütasyon tabanlı genetik şifreleme kullanırken, karşılaştırdığı GA örnekleri öncelik kuralı tabanlıdır. Test sonuçları, çalışmada önerilen GA'nın etkili olduğunu göstermiştir.

Chen ve Weng [19] hem maliyet-süre ödünleşimini hem de kaynak çizelgelemeyi hesaba katan iki aşamalı GA önermişlerdir. Boctor [20] çözüm yöntemi olarak TB algoritmasını kullanmıştır. Algoritmanın istatistiksel yöntemlere göre etkinliği çalışmada test edilmiştir. Cho ve Kim [21] TB algoritmasını önceliğe dayalı çizelgeleme yöntemiyle birlikte sunmuşlardır. Icmeli ve Erenguc [22] nakit akışının net cari değerini enbüyüklemeye çalışan proje çizelgeleme problemi için Tabu Arama algoritması önermişlerdir. Yöntemin etkinliği, elli örnek problem üzerinde test edilmiştir. Doğrusal gevşeme yöntemiyle elde edilen üst sınır değerleri ve En Küçük Gevşek Zaman sezgiseliyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır.

Jia ve Seo [23] meta-sezgisel algoritmalarından, Kuş Sürüsü algoritmasını KKPÇP'ne uygulamışlardır. Merkle vd. [24] Karınca Kolonisi algoritmasını kullanarak aynı problem için çözüm aramışlardır. Chen vd. [25] Yerel Arama, Karınca Kolonisi ve Saçılımlı Arama yöntemlerini yinelenmeli şekilde birleştiren karma bir algoritma sunmuşlardır. Karınca

Kolonisi algoritması, ilk olarak çözüm uzayını araştırır ve Saçılımlı Arama için başlangıç yığını üretilir. Saçılımlı Arama, Karınca Kolonisi algoritmasının feromen denemelerinden referans kümesi oluşturur ve bunları çözümleri geliştirmek için kullanır. Karınca Kolonisi algoritması, üretilen çözümleri feromen kümelerini güncellemek için kullanır. Son olarak, Karınca Kolonisi algoritması, yeni feromen denemelerini kullanarak çözüm kümesini araştırır. Önerilen algoritmanın etkinliği alan yazında sıklıkla kullanılan PSLIB kütüphanesindeki verilerle test edilmiş ve KKÇPÇP'nin çözümünde karma algoritmaların etkinliği gösterilmiştir. Pellerin vd. [26] çalışmalarında KKÇPÇP için geliştirilen karma meta-sezgisel algoritmaları araştırmışlardır. Alan yazında yer alan veri setleri kullanılarak, belirlenen algoritmaların performansı incelenmiştir.

Payne [3] ve Lova vd. [27] sırasıyla projelerin %90 ve %84'ünün çoklu proje ortamında yürütüldüğünü raporlamışlardır. Pratikte çoklu projelerle çalışılmasına ve konunun bu kadar önemli olmasına rağmen, yapılan çalışmaların çoğu tekli proje ortamında gerçekleştirilmiştir. KKÇPÇP'nin NP-zor problem olduğu [4] bilindiğinden, KKÇPÇP de NP-zor problem sınıfındadır. Bu nedenle çalışmaların çoğunda sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmiştir.

Kurtulus ve Davis [28] çoklu proje çizelgeleme problemi için, öncelik kuralı tabanlı algoritmaların etkinliğini belirlerken iki yeni ölçme işlemi tanımlamışlardır. Bunlardan ilki, kaynak ihtiyacının en yüksek seviyeye çıktığı noktayı ortaya koyarken, ikincisi, her bir kaynak türünden yararlanma oranını tanımlamaktadır. Toplamda inceledikleri dokuz farklı öncelik kuralı içinden, En Kısa Projenin En Kısa Faaliyeti ve En Büyük Toplam İş Kapsamı kuralları diğerlerine göre daha üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca, çoklu proje ortamında çizelgeleme problemi çözümünde, projeleri yapay başlangıç ve bitiş düğümleri ekleyerek daha büyük bir ağ haline getirip çözmenin, problemi olduğu gibi çoklu proje ortamında çözmeye göre daha az etkili olduğu gösterilmiştir.

Lawrence ve Morton [29] çalışmalarında amaç fonksiyonu ağırlıklı gecikme maliyetini enküçüklemek olan KKÇPÇP'yi incelemişlerdir. Bu çalışmada uygun durumdaki faaliyetin başlama zamanını ötelemenin sınırsal maliyetiyle, gecikmenin sınırsal yararını dengeleyen, maliyet-yarar çizelgeleme politikasıyla beraber kaynak fiyatlandırma yöntemi geliştirilmiştir. Her proje farklı bir gecikme maliyetine sahiptir. Bu politikanın temelinde, kaynak fiyatlarının sezgisel tahmini yer almaktadır. Uygulanan politikanın sonuçları, proje

çizelgelemedeki birçok dağıtım çizelgeleme kuralı ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle etkin bir çözüm yöntemi olduğu gösterilmiştir.

Lova vd. [27] çoklu proje çizelgeleme problemi için iki kriterli bir sezgisel yöntem önermişlerdir. İlk grup zaman temelli olan: ortalama proje gecikmesi ya da çok projeli süre artımı kriterlerini dikkate alır. Diğer grup zaman temelli olmayan: proje bölünmesi, yarı mamul stoku, kaynak derecelendirme ya da boş kaynaklar kriterlerini dikkate alır. Her iki gruptaki seçeneklerden birer tanesi kullanıcı tarafından seçilir. Bu şekilde proje çizelgeleme araçlarındaki esneklik artırılmıştır. Önerdikleri sezgisel iki aşamalı çalışmaktadır. İlk aşamada, zaman temelli kritere göre çalıştırılır. İkincisinde ise zaman temelli olmayan kritere göre, bulunan sonuç geliştirilmektedir. Lova ve Tormos [30] KKÇPÇP için Rassal Örnekleme sezgiseli ve İleri-geri yöntemleri birleştiren karma bir sezgisel algoritma önermişlerdir.

Krüger ve Scholl [31] çalışmalarında, projeler arası kaynak transferinde, sıra ve kaynak bağımlı transfer zamanlarını da dikkate alarak problemi incelemişlerdir. Çalışmalarında çözüm için tamsayılı doğrusal programlama modeli ve öncelik kuralı temelli yöntemler önerilmiştir. Browning ve Yassine [32] proje gecikmesi ve portföy gecikmesi olmak üzere iki farklı amaca sahip KKÇPÇP'ni çalışmışlardır. Yapılan araştırmada, 20 farklı öncelik kuralı, 12320 test problemi üzerinde denenmiştir. Proje ortamının yapısına göre, hangi kuralların hangi durumlarda başarılı oldukları sunulmuştur. Kumanan vd. [33] KKÇPÇP için GA önermişlerdir. Yöntemin etkinliği, sayısal hesaplama ile örnekler üzerinde test edilmiştir.

Confessore vd. [34] her bir projenin faaliyet kümelerinden oluştuğu, öncüllük ilişkilerinin olduğu, belirli oranlarda projeye tahsis edilmiş ve paylaşılmış kaynakların bulunduğu çoklu proje çizelgeleme problemi çalışmışlardır. Bütün proje faaliyetlerinin öncüllük ve kaynak kısıtları altında tamamlandığı ve toplam proje süresinin enküçüklendiği çizelgenin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, birçok proje ve karar vericinin olduğu merkezi olmayan karar verme süreci önerilmiştir. Çoklu-temsilci sistem modeli ve temsilci koordinasyonu için dinamik programlama ve teklif işlemleri için sezgisel algoritmalar sunulmuştur. Eğer her projenin faaliyetleri yalnızca yerel kaynaklara ihtiyaç duyarsa, çoklu proje problemi, tekli bağımsız proje çizelgeleme problemi haline dönüştürülebilmektedir. Aksine farklı projelerin faaliyetleri paylaşılmış kaynaklara ihtiyaç duyarsa, faaliyetler arasında olası çatışmalar yaşanabilmektedir. Bu durumda da yerel karar verme süreci

bağımlı olmakta, koordinasyon mekanizması çatışmaları çözme sorumluluğunu almakta ve paylaşılmış kaynakları projelere tahsis etmektedir.

Gonçalves vd. [35] KKÇPÇP için GA önermişlerdir. Problemin kromozom sunumu rassal anahtarlara bağlıdır. Çizelgeler, GA tarafından belirlenen, öncüllük ilişkisi, gecikme zamanları ve serbest bırakma zamanlarını dikkate alarak oluşturulan, parametrelili aktif çizelgeleri inşa eden sezgiseller tarafından oluşturulur. Çözüm yaklaşımı test problemleri üzerinde denenmiş ve sayısal sonuçlar, önerilen algoritmanın etkinliğini ortaya koymuştur. Yaklaşımın yenilik getirdiği iki alan: i) Modelde yeni performans ölçütü dikkate alınarak, bitiş tarihi, işlemi süren süreçleri ve stok mantığını bir araya getirerek daha gerçekçi bir inceleme oluşturmuştur. Kısıtların zorladığı serbest bırakma zamanları da ayrıca dikkate alınmıştır, ii) Gerçek hayat problemlerinin, kesin çözüm yöntemleri ile çözmenin zorluğundan dolayı GA ve parametrelili aktif çizelgeleri inşa eden çizelge üretme yordamları birleştirilerek yeni bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir.

Chen ve Shahandashti [36] çözüm yaklaşımı olarak, TB ve GA yöntemlerinden oluşan karma meta-sezgisel yöntem önermişlerdir. TB, GA'nın etkinliğini artırmak için kullanılmıştır. Chiu ve Tsai [37] çalışmalarında, kaynak kısıtlı, indirgenmiş nakit akışlı, çoklu proje çizelgeleme problemini, proje gecikme cezasını ve erken tamamlama ödülünü dikkate alarak incelemişler ve çözüm yaklaşımı olarak, etkin bir sezgisel arama kuralı önermişlerdir. Önerilen sezgisel kuralın etkinliği, en iyi sonucu bilinen 42 küçük ölçekli problem üzerinde test edilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, en iyi değere oldukça yakın çıkmıştır. Ayrıca, problemin çözümü için karışık tamsayılı doğrusal olmayan model önerilmiştir. Karışık tamsayılı doğrusal olmayan model, en iyi değer elde etmek için oldukça büyük hesaplama zamanı gerektirdiği için bu çalışmada önerilen, önceliğe bağlı sezgisel kural, bilgisayar hesaplama zamanını kayda değer şekilde düşürmüştür.

Man vd. [38] KKÇPÇP çözümü için TB ve GA'nın birlikte kullanılmasını önermişlerdir. Bu yöntemde, sıradan GA ve TB algoritmalarının etkinliğini geliştirmek için iki algoritma karma şekilde uygulanmıştır. TB'nin operasyonları, GA'nın yerel en iyi tuzaklara düşme engelini ortadan kaldırmak için GA'nın içinde kullanılmıştır. Önerilen yöntemde ayrıca GA'nın hızlı yakınsama özelliğinden de yararlanılmıştır. Pratik bir örnekle, karma algoritmanın TB ve GA'nın iyi yönlerini birleştirerek projelerin uygulama süresini kısalttığı gösterilmiştir.

Krüger ve Scholl [39] çoklu proje çizelgeleme problemini transfer zamanı ve maliyeti hesaba katarak incelemişlerdir. Problemi bu şekilde incelemek için ilk olarak, tek ve çoklu ortamda kaynak transferi için bir çatı inşa edilmiştir. Kaynak transferlerinin yönetilmesi, kaynak transfer çeşitlerinin sınıflandırılması ve kaynakların bu transferlerde alacağı yeni roller için yönetsel yaklaşımlar bu çatıda yer almaktadır. Daha sonra, Transfer Zamanlı Çoklu Proje Çizelgeleme Problemi tanımlanmıştır. Problem, temel ve genişletilmiş sürümleriyle tamsayı doğrusal programlama olarak modellenmiştir.

Zhao vd. [40] çözüm üretmek için seçme kuralı olarak rassal oranlamayı benimseyen Ençok-Enaz Karınca Sistemi (Max-Min Ant System) algoritmasını temel almışlardır. Amaç, KKÇPÇP'ni görev zaman sırası kısıtını da hesaba katarak incelemektir. Çalışılan örneklerde, güncellenen Karınca Kolonisi algoritmasının uygun ve iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ençok-Enaz Karınca Sistemi algoritmasına bağlı olarak yenilenen bu algoritma, en erken başlama zamanı için sezgisel bilgileri kullanarak daha etkin bir algoritmaya dönüştürülmüştür.

Singh [41], KKÇPÇP için, proje önceliğini proje çizelgeleme ile birleştiren karma bir algoritma sunmaktadır. Çözüme ulaşmak için, proje önceliği, faaliyet önceliği ile birlikte ele alınmıştır. Proje çizelgesi, çözümsel sıradüzen süreci (AHP) ve öncelik kurallarına dayalı karma algoritma kullanılarak elde edilmektedir. Faaliyetler iki önemli kısıta bağlı durumdadır. Bunlardan ilki öncüllük kısıtıdır, öncülleri tamamlanmadan ardıl faaliyetler başlatılamaz. Diğer kısıt ise kaynakların uygunluk durumu ile ilgilidir. Bütün kaynak tipleri verilen bir zaman noktasında sınırlı miktara sahiptir. Makalede, amaç, KKÇPÇP için faaliyetlerin başlama ve tamamlanma zamanlarını belirlemek, böylelikle her projenin kaynak uygunluğu, kritiklik indeksi ve öncüllük kısıtları altında tüm işlerin tamamlanma süresi ve maliyet sapması performans ölçütlerinin sonuçlarını iyileştirmek olarak kabul edilmiştir.

Elazouni [42] çalışmasında nakit kısıtlı çoklu projelerin çizelgelenmesi için sezgisel yöntem önermiştir. Sezgisel, verilen zaman aralığında nakit kullanılabilirliğini, her çizelge için gerekli nakit miktarını, çizelgelenen faaliyetlerin projenin nakit akışı üzerindeki etkisini belirlemekte ve proje sürelerini indirgeme oranlarına göre projeleri ve seçilen çizelgedeki tüm faaliyetleri sıralamaktadır. Sezgisel yöntemin etkinliği, tamsayı programlama ile elde edilen en iyi çözümlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar en iyi değere oldukça yakın çıkmıştır. Chai ve Li [43] KKÇPÇP için karma GA önermişlerdir. Ayrıca, Elit Yığın Arama ve

Değişken Komşuluk Arama gibi standart operatörler kullanmışlardır. Sayısal örnekler üzerinden önerilen algoritmanın etkinliği ortaya konulmuştur.

Yang ve Fu [44] çalışmalarında, otomobil Ar&Ge sürecindeki çoklu proje çizelgeleme problemine çözüm yöntemi geliştirmek için iş önceliklerine, Kanıt Muhakemesi ve Kritik Zincir yaklaşımlarına dayalı çözüm yöntemi önermişlerdir. Bir adet karar, bir adet organizasyon modeli ve iki aksiyomdan oluşan çözüm yöntemi, bir otomobil üreticisinin Ar&Ge sürecine uygulanmıştır. Sonuçlar proje önceliğine dayalı Kritik Zincir Proje Yönetimi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin, çoklu proje ortamında kaynak çakışma problemini, proje önceliğine dayalı Kritik Zincir Proje Yönetimi'ne göre daha etkili çözebildiği sayısal analizlerle ortaya konmuştur.

Ayan [45], KKÇPÇP için TB algoritması geliştirmiştir. Problemin çözümü ile proje gecikmeleri ve faaliyet beklmelerinden kaynaklanan maliyetler toplamını enküçükmek hedeflenmiştir. Kısıtlara uygun çözüm gösterimi, öncüllük ilişkilerine bağlı bir faaliyet listesine ve kaynak tahsislerine dayanmaktadır. Bu çalışmada TB algoritması için daha yavaş bir soğutma planı ve iki ayrı durdurma koşulu kullanılmaktadır. Geliştirilen algoritma, her biri 30 faaliyetli 20 projeden oluşan problem üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın etkinliğini ortaya koymaktadır.

Can ve Ulusoy [46] KKÇMÇPÇP'yi dikkate almışlardır. İlgili problemin çözümü için, iki aşamalı yaklaşım uygulanmıştır. İlk aşamada, her proje makro modlu makro faaliyete indirgenmiştir. Bu problemin çözümü için matematiksel model ve GA yaklaşımı önerilmiştir. İkinci aşamada, ilk aşamada elde edilen kaynak profilleri ve başlangıç zamanları kullanılarak, problem çok amaçlı programlama problemi olarak modellenip çözüm aranmıştır.

Pérez vd. [47] KKÇPÇP'nin eniyilenmesi için Çok Modlu Genetik Algoritma önermişlerdir. Algoritmanın performansını klasik GA ve öncelik kuralı tabanlı sezgisel yaklaşımlarla karşılaştırmak için, tüm işlerin tamamlanma süresi ve ortalama gecikme yüzdesi olmak üzere iki tane zaman temelli amaç fonksiyonu ve rassal anahtarlar, faaliyet listesi ve öncelik kuralı olmak üzere üç kodlama sistemi analiz edilmiştir. Önerilen yöntemlerin etkinlikleri sayısal örneklerle gösterilmiştir.

Beşikçi vd. [6] ilk kez kaynak yönetim politikalarından, KT politikasını proje çizelgeleme problemine uygulamışlardır. KT probleminin niteliğini, proje çizelgeleme problemi kapsamında ne şekilde değerlendirilip işlendiğini, matematiksel formülasyonunu

vererek iki farklı sezgisel çözüm yöntemi önermişlerdir. Kaynakların projelere tahsisi konusunda Doğrusal Gevşeme ve Lagrangian Gevşeme olmak üzere iki farklı yöntem uygulanmıştır. Ayrıca, KKÇMÇPÇP için ilk çözüm yaklaşımı olarak, Kombinatorial Mezat (KM) yöntemini (Combinatorial Auction method) kullanan GA sunulmuştur. İkinci çözüm yaklaşımı, Lagrangian Gevşeme yöntemine dayalı ve Alt Gradyan Eniyileme yöntemi kullanan bir sezgiseldir. Sayısal analizle yaklaşımların doğruluğu ve etkinliği incelenmiştir.

Beşikçi vd. [48] KKÇMÇPÇP için KT politikasının benimsendiği ve projelerin tamamlanması için toplam bütçenin bulunduğu proje çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Tanımlanan problem üzerine inceleme yapılırken, üç farklı durum ortaya çıkmıştır. İlk olarak, genel kaynak kapasitelerini belirlemek için toplam bütçenin farklı kaynak tipleri arasında dağıtılması gerekmiştir. İkinci olarak, genel kaynak kapasitesi hesaplandıktan sonra, her bir projeye bu kaynakların nasıl tahsis edileceğinin belirlenmesi gerekmiştir. Son olarak, KKÇMÇPÇP için etkin çözüm yöntemi önerilmiştir. Bu makalede, çoklu proje ortamı bütünleşik olarak modellenmiştir ve kaynak portföy problemi olarak tanımlanmıştır. İki-aşamalı ve tek parçalı GA olmak üzere iki çözüm yaklaşımı önerilmiş ve her bir yöntem kaynak portföy ve kaynak tahsis işlemleri için KM yöntemini uygulamıştır. Ayrıca, tanımlanan problem için matematiksel model geliştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar ile çözüm yaklaşımının etkinliği gösterilmiştir.

Proje çizelgeleme alanında, kaynak yönetim politikası ayrımı oldukça yeni bir kavram olarak kabul edilebilir. İlk kez Beşikçi vd. [6] çalışmalarında, o zamana kadar alan yazında tek politika olarak çalışılan kaynak paylaşım politikasından farklı şekilde, kaynakların projelere tahsis edildiği bir politikayı benimsemişlerdir. Daha sonra, Beşikçi vd. [48] KT politikası altında, proje çizelgeleme problemlerinden kaynak portföy problemini incelemişlerdir. Alan yazında, gerçeğe daha uygun bir kaynak yönetim politikası olan KT politikasını benimseyen proje çizelgeleme problemleri ile ilgilenen çalışmalar, bilgilerimiz dâhilinde şimdilik bu iki makale ile sınırlıdır.

Proje çizelgeleme alanında yapılan birçok çalışmada, bütün bilgilerin belirli (deterministik) ve tam olduğu, dolayısıyla belirli bir ortamda çalışıldığı varsayımıyla çözüm aranmaktadır. Ancak, gerçek hayatta proje yürütülürken faaliyet süreleri, kaynak kullanım oranı/miktarı gibi birçok parametre belirsizdir. Proje başında bu parametreler belirlense de yapılan planları geçersiz kılacak birden fazla belirsizlik ortaya çıkabilir. Bunlar içinde, hava şartları, ekipman arızaları, grev gibi birçok etken sayılabilir.

Proje yönetiminde, faaliyet sürelerindeki belirsizlik durumunda çözüm üretme çalışmaları PERT (Program Evaluation and Review Technique) analiziyle önem kazanmıştır. Malcolm vd. [49] Polaris balistik füze programı için süreçleri ölçme ve kontrol etmek için yeni bir teknik uygulamışlardır. Faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu ortamda, uzmanlardan süre tahmini alınıp belirsizliğin üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. Ancak PERT yöntemi, kaynakların sonsuz kullanım miktarına sahip olduğu fikrine dayalı bir yöntemdir.

Herroelen ve Leus [50] çizelgelemedeki belirsizliklerin beş farklı yaklaşımla ele alınabileceğini belirtmişlerdir: tepkimeli çizelgeleme, stokastik proje çizelgeleme, bulanıklık altında proje çizelgeleme, önleyici çizelgeleme ve duyarlılık analizi. Temel çizelgenin oluşturulması esnasında meydana çıkan belirsizlikle mücadele etmek yerine, beklenmedik bir olayla karşılaştığında temel çizelgeyi gözden geçiren ya da yeniden eniyileyen tepkimeli çizelgeleme yaklaşımında, öncü çalışmalardan biri Sadeh vd. [51] 'e aittir. Önerilen çözüm yönteminde, çizelgedeki değişiklikten etkilenen tüm faaliyetler, planlama hattı boyunca ötelenmektedir. Ancak, elde edilen sonuçlar etkin değildir ve yeniden çizelge oluşturmamaktadır.

Stokastik proje çizelgeleme problemlerinde parametrelerin en az bir tanesi belirsiz ve rassal değişken olarak tanımlanmıştır. Li ve Womer [52] faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu Kaynak Kısıtlı Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi (KKSPÇP) için Kapalı Devre Yaklaşık Dinamik Programlama (Closed-loop Approximate Dynamic Programming) algoritması geliştirmişlerdir. Çözüm yönteminin etkinliği sayısal analizlerle gösterilmiştir. Dal ve sınır algoritması kullanarak probleme çözüm üreten Stork [53] çözüm yönteminin etkinliğini test problemleri üzerinde göstermiştir.

KKSPÇP'ne sezgisel çözüm öneren öncü çalışmalar, Golenko-Ginzburg ve Gonik [54] ve Tsai ve Gemmil [55] 'e aittir. Golenko-Ginzburg ve Gonik [54] belirsiz faaliyet sürelerine sahip KKSPÇP'ne çözüm üretmek için sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Tsai ve Gemmil [55] ise Tabu Arama algoritmasına dayalı bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Ballestin [56], KKSPÇP'ne çözüm üretmek için GA önermiştir. Ashtiani vd. [57] ise, önerdikleri yeni iki aşamalı GA yöntemi ile aynı problem için etkin bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. Balouka ve Cohen [58], faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu KKSPÇP'nin çözümü için Güçlü (Robust) Eniyileme yaklaşımı önermişlerdir. Xie vd. [59], faaliyet maliyetlerinin belirsiz olduğu KKSPÇP'ni ele almışlardır. Problemin çözümü için tamsayı

doğrusal olmayan model geliştirmişlerdir. Matematiksel modelin yetersiz kaldığı büyük ölçekli problemleri ise, Yapı (Construction) sezgiseli ve Yapı sezgiseli ile GA'dan oluşan karma meta-sezgiselle çözmüşlerdir.

Zheng vd. [60] projelerin kendi aralarında önceliklere sahip olduğu Kaynak Kısıtlı Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi (KKÇSPÇP)'ni ele almışlardır. Çalışmada, aynı anda tüm işlerin tamamlanma süresini ve üretilen çizelgelerin güçlülük (robustness) ölçütünü eniyileyen kavramsal model sunulmuştur. Modelde kısıtlar, faaliyetler arasındaki öncüllük ilişkisini, kısıtlı kaynak kullanımını, faaliyetler arasındaki başlama-bitiş süreleri ilişkisini, projeler arasındaki öncüllük ilişkisini dikkate almaktadır. Ayrıca, problemin çözümü için, Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) yaklaşımına dayalı iki amaçlı GA önerilmiştir. Sayısal analizlerle önerilen çözüm yaklaşımının ve kullanılan parametrelerin etkinliği incelenmiştir. Makalenin katkıları: (i) Öncelikli yapının olduğu ve faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu KKÇSPÇP sunulmuştur; (ii) Problemler için iki amaçlı model ve onun çözüm algoritması önerilmiştir; (iii) KKÇSPÇP için güçlülük ölçütü sunulmuştur ve ilgili proje parametreleri verilmiştir; (iv) Bu parametrelerin KKÇSPÇP üzerindeki etkisi açıklanmıştır.

Yang ve Chang [61] kaynak arzının ve bütçenin belirsiz olduğu, kaynak kısıtlı inşaat projelerinin çizelgelenmesini ele almışlardır. Kısıtlı kaynakları, proje faaliyetleri arasında dağıtarak, projenin tamamlanma süresini enküçülemek için ŞKP modeli geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem, gerçek hayat problemine uygulanmış ve etkinliği test edilmiştir. ŞKP modeli ile hesaplanan proje tamamlanma süresi, proje uygulandıktan sonra elde edilen asıl proje süresi ile karşılaştırılmış ve aralarındaki sapma oranı incelenmiştir.

Tezin bu bölümünde yapılan alan yazın taramasında incelenen kaynaklarla ilgili toplu bilgi, belirlilik altında çalışıp çalışmama, mod kullanım şekli ve kullanılan kaynak yönetim politikası özelliklerine göre sınıflandırılıp, çalışmaların diğer genel özellikleri ile birlikte EK 1'de detaylı olarak verilmiştir. Bu çalışmaların %83,1 belirlilik altında, %16,9'u belirsizlik altında, mod durumuna göre % 84,4'ü tek modlu, %15,6'sı çok modlu ve kaynak yönetim politikası açısından % 94' ü kaynak paylaşımı, % 4'ü kaynak tahsisi ve % 2 ise kaynak transferi politikalarını dikkate alarak yapılan çalışmalardır.

Bilgimiz dâhilinde, alan yazında şu ana kadar, kaynakların kısıtlı olduğu, faaliyetlerin birden çok modda gerçekleştirilebildiği, KT politikasının uygulandığı çoklu proje ortamında stokastik proje çizelgeleme problemi ele alınmamıştır. Ancak, gerçek hayat

uygulamalarında, tanımlanan bu problemin her bir özelliği, proje yürütücülerinin ve projedeki karar vericilerin karşısına, dikkate alınması gereken durumlar olarak çıkmaktadır. Özellikle, son dönemlerde firmaların iş yapış biçimlerini, ortaklıklar kurarak dünyanın farklı birçok noktasında eş zamanlı olarak çoklu projeler şeklinde yürütmeleri, bu durumda kaynakların paylaşılmasını tahsis edilebileceği ve faaliyet sürelerinde var olan belirsizliğin proje çizelgelemesini önemli ölçüde etkileyeceği gerçeği, bu tezin konusunu oluşturan Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi (KKÇMÇSPÇP)'ni ilgi çekici hale getirmiştir. Alan yazındaki bu boşluğu gidermek ve iş dünyasında, proje yönetimi ile uğraşan karar vericilere gerçekçi çözümler sunabilmek bu çalışmanın önemli motivasyonudur.

4. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Bu bölümde tez kapsamında ele alınan, faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu ve rassal değişken olarak tanımlandığı KKÇMÇSPÇP tanımlanmıştır. Daha sonra problemin çözümü için önerilen ŞKP modelinin genel tanımı ve ele alınan probleme özgü geliştirilen model verilmiştir. Devamında ise, çözüm yaklaşımının etkinliği sayısal analizlerle incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

4.1. Problem Tanımı

Bu tez kapsamında, gerçek hayatta birçok sektörde ve organizasyonda karşılaşılan, KKÇMÇSPÇP çalışılmıştır. İncelenen bu problemde, projeleri oluşturan faaliyetlerin sürelerinin belirsiz ve rassal değişken olduğu, kaynak yönetiminde ise KT politikasının kullanıldığı varsayımı ile çalışılmıştır.

KKÇMÇSPÇP’nde amaç, birden çok projeyi oluşturan tüm faaliyetleri, öncülük ilişkilerini dikkate alıp, kısıtlı kaynakları kullanarak, önceden belirlenen amaç fonksiyonunu eniyileyecek şekilde çizelgelemektir. Birim zamanda, daha fazla kaynak kullanılarak faaliyetlerin gerçekleşme süresini belirli oranda kısaltma, maliyeti belirli oranda artırma ilkesine dayalı mod kavramının dikkate alınmasındaki en önemli neden, çoğu durumlarda proje yöneticilerinin, maliyet ve süre arasında belli bir ödünleşime gitmek durumunda kalmalarıdır. Tablo 4.1.’de çok modlu yapının genel özellikleri verilmiştir. Faaliyetin gerçekleştirilmesi için hangi mod tercih edilirse, buna bağlı olarak faaliyetin süresinin ve kullanılacak kaynak türü ve miktarlarının nasıl değiştiği gösterilmiştir. Örneğin, bir numaralı faaliyet 2. modda gerçekleştirilirse, bu faaliyetin gerçekleşmesi 9 birim zaman sürmektedir ve faaliyetin tamamlanması için 5 adet yenilenebilir kaynak 1 ile 8 adet yenilenemez kaynak 2’ye ihtiyaç duymaktadır. Bununla beraber yenilenebilir kaynak 2 ve yenilenmez kaynak 1’e ihtiyaç duymamaktadır.

Tablo 4.1. Çok modlu yapı örneği

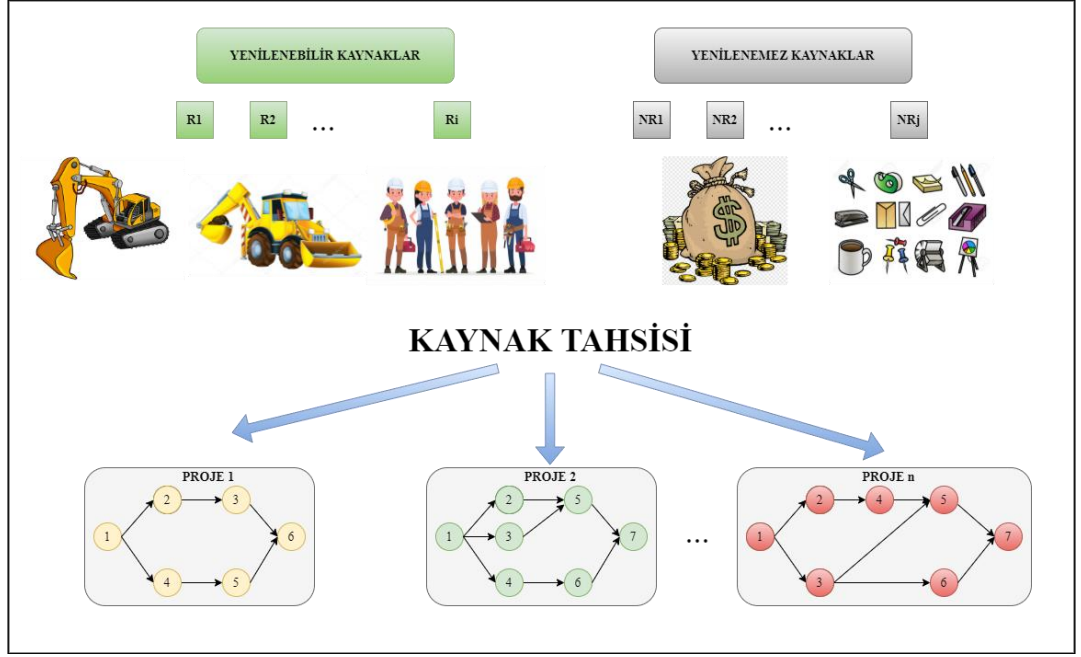
Faaliyet No	Modlar	Süre	Yenilenebilir Kaynak 1	Yenilenebilir Kaynak 2	Yenilenemez Kaynak 1	Yenilenemez Kaynak 2
1	1	3	6	0	9	0
	2	9	5	0	0	8
	3	10	0	6	0	6

Ayrıca, problemi daha gerçekçi boyuta taşımak amacı ile sınırlı sayıda yenilenebilir ve yenilenemez kaynakların kullanımını dikkate alınmıştır. Yenilenebilir kaynaklar, sadece belirli zaman diliminde sınırlandırılmışlardır ve proje süresince tamamen tükenmezler. Yenilenemez kaynaklar ise planlama süresince kısıtlıdır. Herhangi özel bir zaman dilimi için sınırlamaları yoktur ve proje süresince kullanıldıkça tükenirler.

Kaynak yönetim politikaları, problem kapsamındaki kaynakların ne şekilde kullanılacağını belirlemektedir. Alan yazında karşılaşılan kaynak yönetim politikaları Bölüm 1’de açıklanmıştır. Tezde ele alınan problemde KT politikası dikkate alınmıştır.

Alan yazında, gerçek hayat problemlerine daha yakın problemlerle çalışmak için, bazı araştırmacılar belirsizlik altında tek proje çizelgelemesi için KKPÇP üzerine çalışmışlardır [55, 60, 61, 62, 63, 64, 49, 54, 57]. KKÇMÇPÇP için stokastik faaliyet zamanlarının dikkate alındığı bir çalışmaya raslanmamıştır. Belirsizlik altında proje çizelgelemesiyle ilgili detaylı araştırma Herroelen ve Leus [50] ‘un çalışmasında bulunabilir.

Tez kapsamında ele alınan ve yukarıda tanımlanan çoklu proje ortamının genel yapısı Şekil 4.1.’de görülmektedir. Bu şekilde, birden çok projenin yürütüldüğü bir ortamda yenilenebilir ve yenilenemez kaynakların olduğu ve KT politikasının kullanıldığı çoklu proje ortamı şematize edilmiştir.



Şekil 4.1. Çoklu proje ortamının genel yapısı

KKPÇP'nin NP-zor problem olduğu Blazewicz vd. [4] tarafından gösterilmiştir. Bu nedenle, tezde ele alınan KKÇMÇSPÇP de NP-zor problem sınıfındadır. Bu çalışmada, KKÇMÇPÇP belirsizlik altında yani faaliyet sürelerinin rassal değişken olarak tanımlandığı durum ilk defa dikkate alınıp, stokastik modeli oluşturularak ŞKP yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca büyük ölçekli problemler için de TB algoritmasına dayalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

4.2. Şans Kısıtlı Programlama

ŞKP, katsayılarında rassal değişken içeren stokastik programlama problemlerine bir çözüm yaklaşımı olarak ortaya çıkmıştır. ŞKP ilk olarak Charnes ve Cooper [62] tarafından önerilmiştir. Stokastik programlamanın çözümündeki temel yaklaşım, problemdeki olasılıksal yapıyı belirli (deterministik) bir yapıya dönüştürerek, belirli yapı için geliştirilmiş olan bilinen tekniklerle çözmektir.

Stokastik programlama tekniği olan ŞKP, rassal değişken içeren kısıtların belirli olasılık seviyesine kadar bozulmasına izin vererek, belirli duruma getirmeyi amaçlar. ŞKP, yaklaşık güvenilirliği sağlayan bir yöntem olarak nitelendirilebilir.

ŞKP modelinin genel gösterimi aşığıda verilmiştir.

$$P \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \right\} \geq 1 - \alpha_i \quad i = 1, 2, \dots, m, x_j \geq 0 \forall j \text{ için}$$

kısıtları altında

$$\text{enb } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Model için üç durum söz konusu olabilir:

1. Modelin teknolojik katsayıları a_{ij} rassal değişken olabilir.
2. Modelin sağ taraf sabiti b_i rassal değişken olabilir.
3. Modelin teknolojik katsayıları a_{ij} ve sağ taraf sabiti b_i birlikte rassal değişken olabilir [63].

Her üç durumda da parametrelerin uyumlu olduğu olasılık dağılımına göre, stokastik kısıtların karşılığını sağlayacak belirli eşitlikler yazılabilmekte ve belirli modellerin çözümü için kullanılan klasik yöntemler kullanılarak, ŞKP modeli için çözüm üretilebilmektedir.

4.3. Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi için Şans Kısıtlı Programlama Modeli

Bu tezde ele alınan, KKÇMÇSPÇP için kurulan stokastik model aşığıda verilmektedir.

Dizin kümeleri:

P	proje kümesi, $p \in P$
A_p	proje “ p ” nin faaliyet kümesi, $a \in A_p$
pN	proje “ p ” nin son faaliyeti
O_p	proje “ p ” nin öncüllük ilişkileri kümesi
M_{pa}	proje “ p ” nin “ a ” ıncı faaliyetinin mod kümesi, $m \in M_{pa}$
R	yenilenebilir kaynaklar kümesi, $r \in R$
U	yenilenemez kaynaklar kümesi, $u \in U$
Z_p	proje “ p ” nin zaman dönemleri kümesi, $z \in Z_p$
T^+	pozitif tamsayı kümesi

Belirli parametreler:

$\gamma_{p a r m}$	proje “ p ” nin “ a ” ıncı faaliyetinin yenilenebilir kaynak “ r ” yi “ m ” modunda kullanım miktarı
$h_{p a u m}$	proje “ p ” nin “ a ” ıncı faaliyetinin yenilenemez kaynak “ u ” yu “ m ” modunda kullanım miktarı
vt_p	proje “ p ” ye atanan bitiş tarihi
PR_r	yenilenebilir kaynak “ r ” nin toplam kapasitesi
PU_u	yenilenemez kaynak “ u ” nin toplam kapasitesi
g_p	proje “ p ” nin görelı ağırlığı

Belirsiz parametreler:

$s_{p a m}$	proje “ p ” nin “ m ” modundaki “ a ” ıncı faaliyetinin süresi
EF_{pa}	proje “ p ” nin “ a ” ıncı faaliyetinin en erken bitiş zamanı

LF_{pa} proje “ p ” nin “ a ” ıncı faaliyetinin en geç bitiş zamanı

Karar değişkenleri:

$x_{pamz} = \begin{cases} 1, & \text{proje "p" nin "m" modundaki "a" ıncı faaliyeti "z" döneminde tamamlanır} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$

TR_{pr} proje “ p ” ye tahsis edilen yenilenebilir kaynak “ r ” miktarı

TU_{pu} proje “ p ” ye tahsis edilen yenilenemez kaynak “ u ” miktarı

GM_p proje “ p ” nin ağırlıklandırılmış gecikmesi

Matematiksel model:

Tüm projelerde, faaliyetlerin yalnız bir defa çizelgeleneceğini (4.1) numaralı kısıt garanti eder.

$$\sum_{m \in M_{pa}} \sum_{z \in EF_{pa}}^{LF_{pa}} x_{pamz} = 1 \quad \forall a \in A_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.1)$$

Her projenin faaliyetleri arasındaki öncüllük ilişkileri tanımlıdır. Aralarında öncüllük ilişkisi bulunan iki faaliyetten öncül olanın tamamlanma zamanı, ardılının tamamlanma süresinden büyük olamaz.

s_{pqm} , $E(s_{pqm})$ ortalamalı ve $Var(s_{pqm})$ varyanslı Normal dağılıma sahip stokastik değişken olsun. (4.2)’de öncüllük ilişkisi ile ilgili olasılıklı kısıt tanımlanmıştır.

$$P \left[\sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z \in EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \leq \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} (z - s_{pqm}) x_{pqmz} \right] \geq 1 - \alpha_r \quad \forall (w, q) \in O_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.2)$$

Burada, $1 - \alpha_r$, $0 < \alpha_r < 1$, önceden belirlenen güven düzeyini temsil etmektedir ve kısıtın sağlanma olasılığının en düşük düzeyini göstermektedir.

$$c_{qp} = \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} s_{pqm} x_{pqmz} \quad q \in O_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.3)$$

$c_{qp} \sim Normal(E(c_{qp}), Var(c_{qp}))$ rassal değişken olarak tanımlanmaktadır.

Parametreleri:

$$E(c_{qp}) = \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} E(s_{pqm}) x_{pqmz} \quad q \in O_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.4)$$

$$Var(c_{qp}) = X^T V_{qp} X \quad q \in O_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.5)$$

öyleki, $X = (x_1, \dots, x_n)^T$

Kovaryans matrisi V_{qp} :

$$V_{qp} = \begin{bmatrix} Var(s_{pq1}) & Cov(s_{pq1}, s_{pq2}) & \dots & Cov(s_{pq1}, s_{pqm}) \\ Cov(s_{pq2}, s_{pq1}) & Var(s_{pq2}) & \dots & Cov(s_{pq2}, s_{pqm}) \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ Cov(s_{pqm}, s_{pq1}) & Cov(s_{pqm}, s_{pq2}) & \dots & Var(s_{pqm}) \end{bmatrix}$$

(4.2) eşitsizliği tekrar yazılırsa,

$$P \left[c_{qp} \leq \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z \in EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right] \geq 1 - \alpha_r \quad \forall (w, q) \in O_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.6)$$

ve $\frac{(c_{qp} - E(c_{qp}))}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \sim N(0,1)$ için (4.6) yeniden yazılırsa,

$$P \left[\left(\frac{c_{qp} - E(c_{qp})}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \right) \leq \left(\frac{\left(\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z \in EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right) - E(c_{qp})}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \right) \right] \geq 1 - \alpha_r$$

Yani,

$$P \left[c_{qp} \leq \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right] = F \left(\frac{\left(\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right) - E(c_{qp})}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \right) \quad (4.7)$$

F Standart Normal dağılıma sahip dağılım fonksiyonunu göstermek üzere, K_{α_r} , Standart Normal değer olsun. $F(K_{\alpha_r}) = 1 - \alpha_r$ olarak alınırsa,

$$F \left(\frac{\left(\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right) - E(c_{qp})}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \right) \geq F(K_{\alpha_r}) \quad (4.8)$$

(4.8) sadece aşağıdaki durumda sağlanabilir.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\left(\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right) - E(c_{qp})}{\sqrt{Var(c_{qp})}} \right) \geq K_{\alpha_r} \\ = & \left(\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \right) \geq E(c_{qp}) + \left(K_{\alpha_r} \sqrt{Var(c_{qp})} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

(4.9)'da c_{qp} , kendi değeri ile yer değiştirirse

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \geq \\ & \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} E(s_{pqm}) x_{pqmz} + \left(K_{\alpha_r} \sqrt{X^T V_{qp} X} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Rassal değişken, s_{pqm} bağımsızdır, bu durumda $Cov(s_{pqi}, s_{pqj}) = 0$ dır. Yani (4.10) şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z=EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \geq \\
& \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} E(s_{pqm}) x_{pqmz} + \left(K_{\alpha_r} \sqrt{\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z=EF_{pq}}^{LF_{pq}} Var(s_{pqm}) x_{pqmz}^2} \right) \quad (4.11)
\end{aligned}$$

Her proje için, tahsis edilen yenilenebilir kaynakların en büyük değerini belirlemektedir. Her projenin, her zaman dilimi için yenilenebilir kaynak kullanımı, o projeye tahsis edilen yenilenebilir kaynak kullanımından fazla olamaz.

$$\sum_{a \in A_p} \sum_{m \in M_{pa}} \sum_{t=\max\{z, EF_{pa}\}}^{\min\{z+s_{pam}-1, LF_{pa}\}} y_{pam} x_{pamt} \leq TR_{pr} \quad \forall r \in R, z \in Z_p, p \in P \quad (4.12)$$

(4.12)'de faaliyet süresi (s_{pam}) ile toplama işlemi için üst limit oluşturulmakta ve rassal değişken s_{pam} 'nin değeri Standart Normal dağılım dönüşümü kullanılarak aşağıda açıklandığı şekilde belirlenmektedir,

$$z_{1-\alpha_r} = \frac{s_{pam} - E(s_{pam})}{\sigma_{s_{pam}}} \sim Normal(0,1)$$

öyleki $z_{1-\alpha_r}$ güven düzeyine göre Standart Normal değişken değerini göstermektedir. $E(s_{pam})$ ve $\sigma_{s_{pam}}$ ise sırasıyla rassal değişken s_{pam} nin ortalamasını ve standart sapmasını temsil etmektedir. (4.12) yeniden yazıldığında, (4.13) elde edilmektedir.

$$\sum_{a \in A_p} \sum_{m \in M_{pa}} \sum_{t=\max\{z, EF_{pa}\}}^A y_{pam} x_{pamt} \leq TR_{pr} \quad \forall r \in R, z \in Z_p, p \in P \quad (4.13)$$

$$\text{ve } A = \min\{z + \sigma_{s_{pam}} z_{1-\alpha_r} + E(s_{pam}) - 1, LF_{pa}\}.$$

(4.14)'te her proje için, tahsis edilen yenilenemez kaynakların en büyük değeri belirlenmektedir. Her projenin, her zaman dilimi için yenilenemez kaynak kullanımı, o projeye tahsis edilen yenilenemez kaynak oranından fazla olamaz.

$$\sum_{a \in A_p} \sum_{m \in M_{pa}} \sum_{z = EF_{pa}}^{LF_{pa}} h_{pau} x_{pamz} \leq TU_{pu} \quad \forall u \in U, p \in P \quad (4.14)$$

Tüm projeler için tahsis edilen yenilenebilir kaynaklar, toplam yenilenebilir kaynak kapasitesini aşamaz (4.15).

$$\sum_{p \in P} TR_{pr} \leq PR_r \quad \forall r \in R \quad (4.15)$$

Tüm projeler için tahsis edilen yenilenemez kaynak oranı toplam yenilenemez kaynak oranını aşamaz (4.16).

$$\sum_{p \in P} TU_{pu} \leq PU_U \quad \forall u \in U \quad (4.16)$$

Her proje için ağırlıklandırılmış gecikme (4.17) ile hesaplanmaktadır.

$$GM_p \geq g_p \left(z \sum_{m \in M_{pN}} x_{pNmz} - vt_p \right) \quad \forall z = EF_{pN} \dots LF_{pN} \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.17)$$

Kısıt kümesi (4.18) ve (4.19), değişkenler için sınırları belirlemek için kullanılmaktadır.

$$TR_{pr}, TU_{pu}, GM_p \in T^+ \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall u \in U \quad (4.18)$$

$$x_{pamz} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A_p, \forall z \in Z_p, \forall m \in M_{pa}, \forall p \in P, \forall r \in R, \forall u \in U \quad (4.19)$$

Bu kısıtlar altında

Tüm projeler için toplam ağırlıklı gecikmeyi enküçükleyen amaç fonksiyonu eşitlik (4.20)'de verilmektedir.

$$enk z = \sum_{p \in P} GM_p \quad (4.20)$$

Faaliyet süresindeki rassallığa bağlı olarak, bir faaliyetin en erken ve en geç bitiş zamanları da gerçekçi bir yaklaşımla rassal değişken olacaktır. Bu durum ilk defa bu tezde dikkate alınarak, faaliyetlerin en erken ve en geç bitiş zamanlarının rassal değişken olduğu kabul edilmiş ve bu varsayım ile çalışılmıştır. Bundan dolayı, ŞKP modeli ile çözüm üretilirken, ilgili parametreleri içeren kısıtlarda, şans kısıtı olarak yeniden modellenmiştir. Bir projedeki Normal dağılıma sahip bir faaliyet süresinin en erken bitiş zamanı EF_{pa} , kısıtlardaki toplama işlemi için alt limitin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Standart Normal dağılım dönüşümü kullanılarak, bu parametrenin değeri hesaplanır.

$$z_{1-\alpha_r} = \frac{EF_{pa} - E(EF_{pa})}{\sigma_{EF_{pa}}} \sim Normal(0,1)$$

öyleki $z_{1-\alpha_r}$ güven düzeyine göre Standart Normal değişkeni göstermektedir. $E(EF_{pa})$ ve $\sigma_{EF_{pa}}$ ise sırasıyla rassal değişken EF_{pa} için ortalama ve standart sapmayı temsil etmektedir.

Rassal değişken LF_{pa} 'da kısıtlardaki toplama işlemi için üst limitin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Standart Normal dağılım dönüşümü kullanılarak, bu parametrenin değeri de benzer şekilde aşağıda verilen yaklaşımla hesaplanır.

$$z_{1-\alpha_r} = \frac{LF_{pa} - E(LF_{pa})}{\sigma_{LF_{pa}}} \sim Normal(0,1)$$

öyleki $z_{1-\alpha_r}$ güven düzeyine göre Standart Normal değişkeni göstermektedir. $E(LF_{pa})$ ve $\sigma_{LF_{pa}}$ ise sırasıyla rassal değişken LF_{pa} nin ortalama ve standart sapma değerini temsil etmektedir.

Buna göre stokastik modeldeki, toplama işlemine ait alt ve üst limit değerleri, sırasıyla (4.21) ve (4.22)'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{EF_{pa}} z_{1-\alpha_r} + E(EF_{pa}) = EF_{pa} \quad (4.21)$$

$$\sigma_{LF_{pa}} z_{1-\alpha_r} + E(LF_{pa}) = LF_{pa} \quad (4.22)$$

KKÇMÇSPÇP için önerilen model, kısıt (4.11)' den dolayı doğrusal olmayan özellik göstermektedir. Problemin karmaşıklık seviyesinin NP-zor olması ve doğrusal olmayan karmaşık tam sayılı matematiksel model şeklinde formüle edilmesi çözüm sürelerini çok etkilemektedir. Anlamlı sürelerde daha büyük ölçekli problemlere çözüm üretebilmek için, kısıt (4.11) doğrusallaştırılmıştır.

Doğrusallaştırma işlemi için (4.23)'te verilen basit matematiksel gerçek kullanılmıştır.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \leq \sum_{i=1}^n a_i, a_i \in R^+ \Rightarrow$$

$$\sqrt{\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} Var(s_{pqm}) x_{pqmz}^2} \leq \sum_{m \in M_{vb}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} \sigma_{s_{pqm}} x_{pqmz} \quad (4.23)$$

(4.11), (4.23)'e göre yeniden düzenlendiğinde, (4.24) elde edilmektedir.

$$\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z \in EF_{pw}}^{LF_{pw}} z x_{pwmz} \geq$$

$$\sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} E(s_{pqm}) x_{pqmz} + \left(K_{\alpha_r} \sum_{m \in M_{vb}} \sum_{z \in EF_{pq}}^{LF_{pq}} \sigma_{s_{pqm}} x_{pqmz} \right) \quad (4.24)$$

Bu dönüşümler sonunda KKÇMÇSPÇP için elde edilen matematiksel model aşağıda görülmektedir:

$$\sum_{m \in M_{pa}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pa}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pa})}^{\sigma_{LF_{pa}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pa})} x_{pamz} = 1 \quad \forall a \in A_p \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pq})}^{\sigma_{LF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pq})} z x_{pqmz} - \sum_{m \in M_{pw}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pw}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pw})}^{\sigma_{LF_{pw}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pw})} z x_{pwmz} \geq \\ & \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pq})}^{\sigma_{LF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pq})} E(s_{pqm}) x_{pqmz} + \left(K_{\alpha_r} \sum_{m \in M_{pq}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pq})}^{\sigma_{LF_{pq}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pq})} \sigma_{s_{pqm}} x_{pqmz} \right) \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\sum_{a \in A_p} \sum_{m \in M_{pa}} \sum_{t = \max\{z, \sigma_{EF_{pa}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pa})\}}^{\min\{z + \sigma_{spam}^{z_1 - \alpha_r} + E(spam) - 1, LF_{pa}\}} y_{pam} x_{pamt} \leq TR_{pr} \quad \forall r \in R, z \in Z_p, p \in P \quad (4.13)$$

$$\sum_{a \in A_p} \sum_{m \in M_{pa}} \sum_{z = \sigma_{EF_{pa}}^{z_1 - \alpha_r} + E(EF_{pa})}^{\sigma_{LF_{pa}}^{z_1 - \alpha_r} + E(LF_{pa})} h_{paum} x_{pamz} \leq TU_{pu} \quad \forall u \in U, p \in P \quad (4.14)$$

$$\sum_{p \in P} TR_{pr} \leq PR_r \quad \forall r \in R \quad (4.15)$$

$$\sum_{p \in P} TU_{pu} \leq PU_U \quad \forall u \in U \quad (4.16)$$

$$GM_p \geq g_p \left(z \sum_{m \in M_{pN}} x_{pNmz} - vt_p \right) \quad \forall z = EF_{pN} \dots LF_{pN} \text{ ve } \forall p \in P \quad (4.17)$$

$$TR_{pr}, TU_{pu} \in T^+ \quad \forall p \in P, \forall r \in R, \forall u \in U \quad (4.18)$$

$$GM_p \geq 0, x_{pamz} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A_p \quad \forall z \in Z_p \quad \forall m \in M_{pa} \quad \forall p \in P \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (4.19)$$

kısıtları altında

$$enk z = \sum_{p \in P} GM_p \quad (4.20)$$

4.4. Sayısal Analizler

Bu bölümde, KKÇMÇSPÇP'nin çözümü için bu tezde önerilen ŞKP modelinin performansı sayısal analiz ile incelenmiştir. İzleyen bölümde deneysel karşılaştırma amacıyla kullanılan test problemleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra bu test problemleri ile elde edilen çözüm sonuçları tartışılmıştır.

4.4.1. Test problemleri

Tezde geliştirilen ŞKP modeli ve TB algoritmasının etkinliğini test etmek için kullanılan test problemleri, Kolisch ve Sprecher (1996) tarafından geliştirilen PSPLIB (<http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/library.html>) kütüphanesinden yararlanılarak üretilmiştir. Bilindiği üzere bu kütüphanedeki problemler, tek proje problemleridir ve faaliyet zamanları belirlidir (deterministik). Çoklu proje ortamını yani birden fazla projenin aynı anda yürütüldüğü ortam için problem oluşturmak amacıyla, kütüphanedeki *j10* ve *j16* veri kümelerinden altı adet tek proje problemi birleştirilerek altı projeli (çoklu proje) 30 adet test problemi elde edilmiştir.

Kütüphanedeki, veri setlerinin yanındaki rakamlar, o setteki projelerin içerdiği faaliyet sayısını vermektedir. *j10* veri seti 10 faaliyet içerirken, *j16* veri seti ise 16 faaliyet içerir. Bunlara ek olarak her bir proje, başlangıç ve bitiş faaliyetini temsil etmek üzere 2 adet kukla faaliyet içerir. Bu durumda da faaliyet sayısı, *j10* veri seti için 12, *j16* veri seti için 18 olmaktadır. Göreli olarak daha fazla faaliyet içeren (18'den çok) PSBLIB de yer alan büyük ölçekli projelerde, verilen zaman kısıtında (7200 saniye) uygun çözüm bulunamamıştır. Bu

nedenle büyük boyutlu KKÇMÇSPÇP'lerin çözümü için meta-sezgisel bir algoritmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 4.2.'de test problemlerinin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Test problemlerinin özellikleri

PSBLIB veri kümeleri	Test Problemi Sayısı	Her problemdeki proje sayısı	Her projedeki faaliyet sayısı	Her faaliyetteki mod sayısı
<i>j10</i>	30	6	12	3
<i>j16</i>	30	6	18	3

Ancak, PSPLIB deki test problemleri belirli problemler olduğu için stokastik probleme dönüştürülmesi gerekmiştir. Stokastik KKÇMÇSPÇP'de faaliyet sürelerinin Normal dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. Stokastik veri seti oluşturulurken Normal dağılıma sahip olan faaliyet süresinin ortalaması, mevcut problemdeki faaliyet süresi olarak, mevcut faaliyet sürelerinin 1/3 ünün karesi ise varyans olarak dikkate alınmıştır. Böylece aşağıda verilen formülasyona göre Standart Normal dağılım dönüşümü kullanılarak her bir test problemi için projelerdeki faaliyet süreleri hesaplanmıştır. z , $1 - \alpha$ güven düzeyine ait Standart Normal dağılım değerini ($\alpha=0,05$), μ faaliyet süresinin ortalama değerini, σ faaliyet süresinin standart sapma değerini göstermektedir.

$$z = (X - \mu)/\sigma \rightarrow X = z * \sigma + \mu$$

Projelerdeki ağırlıklandırma ise şu şekilde yapılmıştır: 1'den 6'ya kadar ağırlık değerleri, projelerin teslim tarihine göre atanmıştır. En uzak teslim tarihli projeye en düşük ağırlık verilmiştir; en yakın tarihli olana da en büyük ağırlık. Aynı teslim tarihine sahip projelerde ise, ağırlık bu projeler arasında rassal olarak atanmıştır.

4.4.2. Şans Kısıtlı Programlama sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde, ŞKP modelinin test problemleri üzerindeki çözüm sonuçları verilmiş ve tasarım parametrelerinin, önerilen modelin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Faaliyet sürelerinin değişiminin, problemin çözümü üzerindeki etkisini görmek için faaliyet süresi dağılımında, 1σ , 3σ ve 6σ olmak üzere üç farklı standart sapma dikkate alınmıştır. Öte yandan, ikinci tasarım parametresi olan, şans kısıtının sağlanma olasılığını belirleyen, α düzeylerinin etkisini görmek için üç farklı değer (0,15, 0,1 ve 0,05) ile çalışılmıştır.

KKÇMÇSPÇP için önerilen ŞKP modeli, karma tamsayılı doğrusal matematiksel modele dönüştürülerek, GAMS 24.1'de kodlanmıştır. Intel Core i5 3.1 GHz hızında işlemciye, 8 GB RAM ara belleğe sahip Win10 Pro işletim sistemi ile çalışan kişisel bilgisayar üzerinde 7200 saniye süre sınırı altında, CPLEX 12.5.0.1 çözücü kullanılarak çözülmüştür.

Tablo 4.3.'te *j10* veri setinden seçilen projelerle oluşturulan problemlerin çözüm sonuçları verilmiştir. Tabloda faaliyet sürelerinin farklı σ düzeyleri ve şans kısıtının farklı α değerleri için elde edilen toplam ağırlıklı gecikme ve işlemci zamanı sonuçları verilmiştir. Faaliyet sürelerinin standart sapması 1σ 'dan 6σ 'ya değişirken aynı anda amaç fonksiyon değerinin arttığı yani beklendiği şekilde stokastik faaliyet sürelerinin değişiminin toplam ağırlıklı gecikmeyi arttırdığı görülmektedir.

Standart sapma değerinin artması, ortalamadan daha uzak faaliyet süreleri demek olduğu için, projeler daha ileri zaman dilimlerinde tamamlanmaktadır. Bu durumda, toplam ağırlıklı gecikmeyi etkilemektedir. Örneğin 1. problem için, α düzeyi 0,10 olduğunda, faaliyet sürelerinin standart sapması 6σ için toplam ağırlıklı gecikme değeri en yüksek değerini (206 birim) almaktadır. Öte yandan, 1σ ve 3σ sapmaları için toplam ağırlıklı gecikme değerleri sırasıyla 124 ve 179 zaman birimidir.

Çalışan personelin yetkinliği, kaynak miktarı, beklenmedik hava koşulları veya coğrafi koşullar gibi birçok kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen faktörler faaliyet sürelerindeki değişkenliğe neden olabilmektedir. Ancak, bu faktörlerin büyük kısmı, alınacak doğru yönetimsel ve stratejik kararlarla yönetilebilirler ve böylelikle faaliyet sürelerindeki değişkenlik düşürülebilir. Projelerdeki gecikme miktarı ve faaliyet sürelerindeki değişkenlik

arasındaki ilişki, proje yöneticilerini faaliyet sürelerindeki değişkenliği düşürmek için arayışlarda bulunma konusunda motive edecektir.

Aynı tabloda, α değeri düştükçe, toplam ağırlıklı gecikmenin arttığı görülmektedir. Şans kısıtının sağlandığı en küçük olasılık değerini gösteren $1-\alpha$ değeri, α değeri küçüldükçe büyümektedir. Öyle ki, ilgili şans kısıtının sağlanması daha kesin ve zor hale gelmektedir. Kısıtın bozulmasına daha az izin verilmekte ve projelerin tamamlanma süreleri buna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 4. Probleme, 1σ düzeyinde, α değeri 0.15'ten 0.05'e düşerken, toplam ağırlıklı gecikmenin sırasıyla 62, 112, 152 birim olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3. tasarım parametrelerinin tüm olası kombinasyonları altında, önerilen ŞKP modelinin performansının özetini sunmaktadır. Sonuçlar, faaliyet sürelerindeki yüksek değişkenliğin ve düşük α değerinin, çözülen modelin amaç fonksiyonu olan, toplam ağırlıklı gecikmeyi yükselttiğini ortaya koymuştur.

Tabloda görüldüğü üzere, en düşük işlemci zamanı 2277,32 saniye ve en yüksek işlemci zamanı 3386,04 saniyedir. Tablo 4.3. incelendiğinde, problemlerin en küçük ve en büyük çözüm süresi arasındaki farkın yaklaşık 1108 saniye (18,47 dakika) olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3. Standart sapma (σ) ve α düzeylerinin ŞKP modelinin performansına etkisi

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
1	<i>j1010_1, j1010_2, j1010_3, j1010_4, j1010_5, j1010_6</i>	0,15	105	2945,40	140	2865,12	182	3258,35
		0,10	124	3318,50	179	2812,48	206	3271,31
		0,05	205	3129,29	232	3247,46	254	2622,48
2	<i>j1010_7, j1010_8, j1010_9, j1010_10, j1011_1, j1011_2</i>	0,15	56	2475,13	84	2378,11	122	2424,01
		0,10	71	3054,02	125	2977,57	164	3003,30
		0,05	161	2910,50	182	3098,52	210	2350,48
3	<i>j1011_3, j1011_4, j1011_5, j1011_6, j1011_7, j1011_8</i>	0,15	71	2970,49	119	3178,41	143	2530,05
		0,10	104	3000,56	142	2801,35	173	3017,33
		0,05	165	3025,26	194	3039,45	224	2889,29

Tablo 4.3. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
4	<i>j1011_9, j1011_10, j1012_1, j1012_2, j1012_3, j1012_4</i>	0,15	62	2958,33	80	2766,31	142	2599,45
		0,10	112	2635,38	138	2803,47	181	3257,38
		0,05	152	3265,12	172	2904,40	214	2631,29
5	<i>j1012_5, j1012_6, j1012_7, j1012_8, j1012_9, j1012_10</i>	0,15	44	2672,44	85	3016,38	123	2590,55
		0,10	50	3222,57	116	2598,33	176	3371,50
		0,05	115	3316,09	150	3153,48	204	3286,57
6	<i>j1013_1, j1013_2, j1013_3, j1013_4, j1013_5, j1013_6</i>	0,15	120	2832,30	155	2652,37	232	3138,46
		0,10	163	3310,31	194	2707,25	285	3061,39
		0,05	205	3094,06	231	2628,40	307	3298,59
7	<i>j1013_7, j1013_8, j1013_9, j1013_10, j1014_1, j1014_2</i>	0,15	61	2722,37	97	2345,38	130	2637,15
		0,10	80	2739,19	105	2822,11	177	2547,42
		0,05	105	2877,34	139	3040,55	201	3270,24
8	<i>j1014_3, j1014_4, j1014_5, j1014_6, j1014_7, j1014_8</i>	0,15	49	3161,30	82	2630,19	112	2494,44
		0,10	80	2612,39	103	3086,13	147	3322,09
		0,05	106	3309,00	145	2424,25	174	2383,40
9	<i>j1014_9, j1014_10, j1015_1, j1015_2, j1015_3, j1015_4</i>	0,15	61	3164,29	97	3272,30	114	2832,33
		0,10	94	3363,57	132	2801,32	155	2305,56
		0,05	116	2706,40	179	2873,47	192	3039,32
10	<i>j1015_5, j1015_6, j1015_7, j1015_8, j1015_9, j1015_10</i>	0,15	52	3045,55	82	2991,33	123	3051,56
		0,10	58	3210,31	110	3229,05	156	2494,48
		0,05	84	3199,13	146	2687,38	179	3302,26
11	<i>j1016_1, j1016_2, j1016_3, j1016_4, j1016_5, j1016_6</i>	0,15	30	3269,34	52	2872,53	109	3170,32
		0,10	39	2920,31	79	3103,06	147	2930,24
		0,05	60	2948,51	118	2893,38	176	2445,27
12	<i>j1016_7, j1016_8, j1016_9, j1016_10, j1018_1, j1018_2</i>	0,15	72	2665,48	116	3366,38	150	3269,41
		0,10	122	2591,53	141	2506,42	174	3025,34
		0,05	155	2577,04	187	2535,06	200	2345,07
13	<i>j1018_3, j1018_4, j1018_5, j1018_6, j1018_7, j1018_8</i>	0,15	49	2441,46	80	2997,21	107	2859,20
		0,10	84	3236,25	108	2955,40	135	2788,38
		0,05	140	2697,26	174	2767,54	210	3171,38
14	<i>j1018_9, j1018_10, j1019_1, j1019_2, j1019_3, j1019_4</i>	0,15	55	2673,57	81	3187,42	120	2868,14
		0,10	100	2527,48	124	2715,49	149	2495,57
		0,05	145	2910,00	180	2665,49	202	3237,39

Tablo 4.3. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
15	<i>j1019_5, j1019_6, j1019_7, j1019_8, j1019_9, j1019_10</i>	0,15	72	2835,55	114	2422,15	166	3246,48
		0,10	122	2892,38	151	2834,01	192	2412,51
		0,05	150	2585,43	177	3312,52	229	3101,47
16	<i>j1020_1, j1020_2, j1020_3, j1020_4, j1020_5, j1020_6</i>	0,15	50	3264,32	83	2663,03	126	2584,35
		0,10	69	2831,30	107	2441,59	165	2711,33
		0,05	88	3075,48	138	2408,17	184	2580,26
17	<i>j1020_8, j1020_9, j1020_10, j1021_1, j1021_2, j1021_3</i>	0,15	59	2705,03	96	3070,07	136	3245,54
		0,10	61	3032,03	127	3306,47	167	3238,56
		0,05	85	3150,38	142	2530,23	202	2407,34
18	<i>j1021_4, j1021_5, j1021_6, j1021_7, j1021_8, j1021_9</i>	0,15	54	2329,51	101	3386,04	145	2801,45
		0,10	74	2881,57	151	2760,39	183	2468,57
		0,05	98	2963,38	197	3350,33	225	3211,44
19	<i>j1021_10, j1022_1, j1022_2, j1022_3, j1022_4, j1022_5</i>	0,15	80	2933,23	122	2484,20	183	3146,52
		0,10	119	2446,43	156	2721,47	206	2971,56
		0,05	157	2857,14	197	2464,36	250	3171,25
20	<i>j1022_6, j1022_7, j1022_8, j1022_9, j1022_10, j1023_1</i>	0,15	78	3073,33	131	3372,33	171	3164,58
		0,10	94	3149,33	170	2716,50	206	2778,00
		0,05	119	3218,55	209	2482,45	246	2550,11
21	<i>j1023_2, j1023_3, j1023_4, j1023_5, j1023_6, j1023_8</i>	0,15	32	2927,35	98	2606,11	130	2579,01
		0,10	39	2743,08	118	2993,48	157	2512,45
		0,05	72	2702,13	116	2401,40	212	2711,41
22	<i>j1023_9, j1023_10, j1024_1, j1024_2, j1024_3, j1024_4</i>	0,15	55	2758,36	84	2429,33	149	2446,33
		0,10	75	2874,59	111	3086,36	177	2916,54
		0,05	110	2989,50	165	2664,51	216	2937,32
23	<i>j1024_5, j1024_6, j1024_7, j1024_8, j1024_9, j1024_10</i>	0,15	26	2428,34	128	3032,57	165	2561,17
		0,10	50	2577,45	179	2375,19	203	2742,49
		0,05	86	2799,53	215	2839,55	240	2703,38
24	<i>j1026_1, j1026_2, j1026_3, j1026_4, j1026_5, j1026_6</i>	0,15	52	2562,58	86	3038,36	129	2929,44
		0,10	80	2657,48	117	3029,30	167	2543,52
		0,05	125	2678,31	162	3123,52	224	2676,35
25	<i>j1026_7, j1026_8, j1026_9, j1026_10, j1027_1, j1027_2</i>	0,15	88	3020,28	137	2612,33	178	2789,34
		0,10	120	3002,43	165	2760,44	215	2433,54
		0,05	158	2953,47	210	3163,53	269	2656,59

Tablo 4.3. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
26	j1027_3, j1027_4, j1027_5, j1027_6, j1027_7, j1027_8	0,15	85	3102,05	134	3056,38	180	2394,01
		0,10	113	2740,56	173	3058,34	214	2951,39
		0,05	137	2381,40	206	3104,54	256	2277,32
27	j1027_9, j1027_10, j1028_1, j1028_2, j1028_3, j1028_4	0,15	55	2823,21	94	2946,38	131	2424,15
		0,10	99	2902,37	134	2341,00	164	2381,45
		0,05	127	2445,04	177	2817,34	205	3078,33
28	j1028_5, j1028_6, j1028_7, j1028_8, j1028_9, j1028_10	0,15	98	2426,42	145	2922,32	183	2658,19
		0,10	148	2855,29	186	2596,05	219	2804,49
		0,05	182	2990,29	231	2506,38	267	2680,12
29	j1029_1, j1029_2, j1029_3, j1029_4, j1029_5, j1029_6	0,15	47	3172,28	96	2352,21	136	2711,08
		0,10	76	2974,39	127	2332,50	171	3160,47
		0,05	115	2332,07	148	2759,36	208	2876,32
30	j1029_7, j1029_8, j1029_9, j1029_10, j1030_1, j1030_2	0,15	55	2855,57	108	3067,58	141	2717,13
		0,10	72	2779,45	139	2861,58	186	2454,35
		0,05	116	2669,30	179	2346,55	216	2682,47

Ayrıca α ve σ düzeylerinin, toplam ağırlıklı gecikme ve işlemci zamanına bağlı olarak ŞKP modelinin performansı üzerindeki etkisini görmek için istatistiksel analizler yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizlerde verilerin Normal dağılıma uyum kontrolleri için Kolmogorov-Smirnov testi kullanılmıştır. Hem toplam ağırlıklı gecikme hem de işlemci zamanı değerlerinin Normal dağılıma uygun olduğu gözlenmiştir ($p>0,05$). Varyansların homojenliğinin kontrolü için Levene istatistiği kullanılmıştır. Veri analizi, SPSS uygulaması (Statistical Package for the Social Sciences, version 17.0; SPSS, Inc., Chicago, IL) kullanılarak yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.'te, ortalama \pm standart sapma ($\bar{X} \pm SS$), enküçük-enbüyük değerler (enk-enb) olarak gösterilmiştir. Hem toplam ağırlıklı gecikme hem de işlemci zamanı değerlerinin, farklı σ düzeylerinde homojen varyanslara sahip olduğu görülmüştür ($p>0,05$).

Tablo 4.4. Standart sapma (σ) için tek yönlü varyans analizi sonuçları

σ	n	Toplam Ağırlıklı Gecikme $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p	İşlemci Zamanı $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p
1 σ	90	93,38 \pm 40,36 (26,00-205,00)	0,000	2878,53 \pm 261,31 (2329,81-3363,57)	0,268
3 σ	90	139,02 \pm 41,18 (52,00-232,00)		2826,25 \pm 290,93 (2332,80-3386,04)	
6 σ	90	181,90 \pm 42,45 (107,00-307,00)		2812,04 \pm 312,23 (2277,32-3371,90)	

ANOVA sonuçlarına göre 0,05 anlamlılık düzeyinde toplam ağırlıklı gecikme ortalamaları farklı σ düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$).

Hangi σ düzeyinin farklı olduğunu anlamak amacıyla çiftli karşılaştırma testlerinden Bonferroni testi uygulanmış ve tüm σ düzeyleri için toplam ağırlıklı gecikme ortalamalarının farklı olduğu 0,05 anlamlılık derecesinde gözlenmiştir ($p < 0,05$).

Bununla beraber, 0,05 anlamlılık düzeyinde işlemci zamanı ortalamaları, farklı σ düzeylerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$).

Tablo 4.5. α düzeyleri için tek yönlü varyans analizi sonuçları

α	n	Toplam Ağırlıklı Gecikme $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p	İşlemci Zamanı $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p
0,15	90	103,76 \pm 42,086 (26,00-232,00)	0,000	2837,03 \pm 290,84 (2329,81-3386,04)	0,997
0,10	90	135,73 \pm 47,49 (39,00-285,00)		2840,02 \pm 277,80 (2305,56-3371,90)	
0,05	90	174,81 \pm 50,02 (60,00-307,00)		2839,76 \pm 301,88 (2277,32-3350,73)	

ANOVA sonuçlarına göre 0,05 anlamlılık düzeyinde toplam ağırlıklı gecikme ortalamaları farklı α düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Hangi

α düzeyinin farklı olduğunu anlamak amacıyla çiftli karşılaştırma testlerinden Bonferroni uygulanmış ve tüm α düzeyleri için toplam ağırlıklı gecikme ortalamalarının birbirinden farklı olduğu 0,05 anlamlılık derecesinde gözlenmiştir ($p < 0,05$).

Bununla beraber, 0,05 anlamlılık düzeyinde işlemci zamanı ortalamaları farklı α düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$).

Tablo 4.6. Standart sapma (σ) ve α düzeylerinin ŞKP modelinin performansına etkisi

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
1	j1610_1, j1610_2, j1610_3, j1610_4, j1610_5, j1610_6	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
2	j1610_7, j1610_8, j1610_9, j1610_10, j1611_1, j1611_2	0,15	98	5041,49	128	5540,59	149	5635,30
		0,10	139	6157,13	159	5164,42	183	5709,42
		0,05	164	6178,37	185	5986,34	203	5740,38
3	j1611_3, j1611_4, j1611_5, j1611_6, j1611_7, j1611_8	0,15	35	6208,38	58	6018,39	96	5678,43
		0,10	62	6220,47	84	4912,49	157	6267,08
		0,05	89	6221,52	136	5136,41	179	6409,29
4	j1611_9, j1611_10, j1612_1, j1612_2, j1612_3, j1612_4	0,15	64	5927,47	102	5053,00	159	6158,37
		0,10	85	5365,05	153	5205,37	196	6227,11
		0,05	118	5800,37	188	5225,34	240	5769,17
5	j1612_5, j1612_6, j1612_7, j1612_8, j1612_9, j1612_10	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
6	j1613_1, j1613_2, j1613_3, j1613_4, j1613_5, j1613_6	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
7	j1613_7, j1613_8, j1613_9, j1613_10, j1614_1, j1614_2	0,15	71	5259,30	129	4412,33	206	5488,45
		0,10	108	5442,49	166	4974,56	256	5488,38
		0,05	152	5620,22	200	5550,51	275	6096,10
8	j1614_3, j1614_4, j1614_5, j1614_6, j1614_7, j1614_8	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00

Tablo 4.6. devam ediyor

			Standart Sapma					
			1 σ		3 σ		6 σ	
Problem No	Çoklu Proje	α	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
9	j1614_9, j1614_10, j1615_1, j1615_2, j1615_3, j1615_4	0,15	62	5716,56	115	6121,47	186	5652,14
		0,10	96	6381,10	143	6059,53	209	5111,48
		0,05	142	5794,17	167	5403,45	244	6142,00
10	j1615_5, j1615_6, j1615_7, j1615_8, j1615_9, j1615_10	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
11	j1616_1, j1616_2, j1616_3, j1616_4, j1616_5, j1616_6	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
12	j1616_7, j1616_8, j1616_9, j1616_10, j1617_1, j1617_2	0,15	77	5671,57	121	6711,48	165	5997,02
		0,10	100	5784,27	155	4779,15	204	6255,15
		0,05	129	5642,25	182	5044,58	248	5313,53
13	j1617_3, j1617_4, j1617_5, j1617_6, j1617_7, j1617_8	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
14	j1617_9, j1617_10, j1618_1, j1618_2, j1618_3, j1618_4	0,15	74	5556,04	134	5385,06	166	6135,44
		0,10	103	5643,39	165	5810,52	195	5279,59
		0,05	142	5452,35	190	5078,53	231	6524,34
15	j1618_5, j1618_6, j1618_7, j1618_8, j1618_9, j1618_10	0,15	92	5525,31	162	5477,44	183	6649,58
		0,10	115	5536,01	197	5857,23	224	5972,45
		0,05	144	5643,02	226	6700,42	264	5903,35
16	j1619_1, j1619_2, j1619_3, j1619_4, j1619_5, j1619_6	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
17	j1619_7, j1619_8, j1619_9, j1619_10, j1620_1, j1620_2	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
18	j1620_3, j1620_4, j1620_5, j1620_6, j1620_7, j1620_8	0,15	60	5424,31	89	5840,36	122	6283,24
		0,10	94	6190,35	132	5447,09	156	6015,18
		0,05	145	6122,03	174	5379,38	196	6606,58
19	j1620_9, j1620_10, j1621_1, j1621_2, j1621_3, j1621_4	0,15	88	6174,45	130	5578,34	172	6674,20
		0,10	129	5787,20	174	5908,51	204	5698,08
		0,05	157	5507,52	202	5343,38	245	6258,47

Tablo 4.6. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	α	Standart Sapma					
			1σ		3σ		6σ	
			Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)	Toplam Ağırlıklı Gecikme	İşlemci Zamanı (San.)
20	j1621_5, j1621_6, j1621_7, j1621_8, j1621_9, j1621_10	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
21	j1622_1, j1622_2, j1622_3, j1622_4, j1622_5, j1622_6	0,15	116	5632,43	167	5663,27	196	5305,30
		0,10	146	5963,37	204	5275,50	228	5498,58
		0,05	184	5521,38	236	5014,41	251	5928,35
22	j1622_7, j1622_8, j1622_9, j1622_10, j1623_1, j1623_2	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
23	j1623_3, j1623_4, j1623_5, j1623_6, j1623_7, j1623_8	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
24	j1623_9, j1623_10, j1624_1, j1624_2, j1624_3, j1624_4	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
25	j1624_5, j1624_6, j1624_7, j1624_8, j1624_9, j1624_10	0,15	53	5664,29	85	4933,08	153	5860,30
		0,10	78	5821,08	111	5757,31	174	5629,55
		0,05	91	5783,10	143	5991,22	205	6108,07
26	j1625_1, j1625_2, j1625_3, j1625_4, j1625_5, j1625_6	0,15	50	5730,23	74	5688,30	109	5167,24
		0,10	84	5478,59	115	5505,12	142	5843,08
		0,05	117	5418,59	153	6301,35	181	5192,38
27	j1625_7, j1625_8, j1625_9, j1625_10, j1626_1, j1626_2	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
28	j1626_3, j1626_4, j1626_5, j1626_6, j1626_7, j1626_8	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
29	j1626_9, j1626_10, j1627_1, j1627_2, j1627_3, j1627_4	0,15	61	6541,38	82	5198,30	104	5807,00
		0,10	85	6198,26	129	5597,33	148	6060,43
		0,05	125	5432,58	156	5932,29	186	5579,49
30	j1627_5, j1627_6, j1627_7, j1627_8, j1627_9, j1627_10	0,15	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,10	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00
		0,05	*	7200,00	*	7200,00	*	7200,00

*: ŞKP modeli ile 7200 saniye içerisinde çözüm bulunamayan problemleri göstermektedir.

Tablo 4.6.'da $j16$ veri setinden oluşturulan test problemleri için, farklı σ ve α düzeyleri için elde edilen toplam ağırlıklı gecikme ve işlemci zamanı sonuçları verilmiştir. Problemler $j16$ veri setinden oluşturulduğunda, önceden belirlenen 7200 saniyelik zaman kısıtı için bazı problemlere çözüm üretilmediği saptanmıştır. Çözümü bulunamayan bu problemler Tablo 4.6 üzerinde “*” ile işaretlenmişlerdir.

Faaliyet sürelerindeki değişkenliğin (σ) ve şans kısıtının sağlanma olasılığının en düşük seviyesinin (α), Tablo 4.3.'te listelenen sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Örneğin 29. problem için, α düzeyi 0,10 olduğunda, faaliyet sürelerinin standart sapması 6σ için toplam ağırlıklı gecikme değeri en yüksek değerini (148 birim) almaktadır. Öte yandan, 1σ ve 3σ sapmaları için toplam ağırlıklı gecikme değerleri sırasıyla 85 ve 129 birimdir.

Tablo 4.6. α değeri küçüldükçe, toplam ağırlıklı gecikmenin arttığını ortaya koymaktadır. Şans kısıtıyla ilgili α değerinin küçülmesiyle, kısıtın bozulmasına daha az izin verilmektedir ve projelerin tamamlanma süreleri buna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 15. Problemden, 3σ düzeyinde, α düzeyi 0,15'ten 0,05'e düşerken, toplam ağırlıklı gecikmenin kısıtın gevşemesine bağlı olarak sırasıyla 162, 197, 226 birim olduğu görülmektedir.

Faaliyet sürelerindeki yüksek değişkenliğin ve düşük α değerinin, toplam ağırlıklı gecikmeyi artırdığı, Tablo 4.3.'te olduğu gibi, Tablo 4.6. ile de ortaya konmuştur. Tabloda görüldüğü üzere, en düşük işlemci zamanı 4412,33 saniye ve en yüksek işlemci zamanı 6711,48 saniyedir. Tablo 4.6. incelendiğinde, problemlerin en küçük ve en büyük çözüm süresi arasındaki farkın yaklaşık 1131 saniye (38,32 dakika) olduğu görülmektedir.

α ve σ düzeylerinin, ŞKP modelinin performansı üzerindeki etkisini görmek için istatistiksel analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde verilerin Normal dağılıma uyum kontrolleri için Kolmogorov-Smirnov testi kullanılmıştır. Hem toplam ağırlıklı gecikme hem de işlemci zamanı değerlerinin Normal dağılıma uygun olduğu gözlenmiştir ($p>0.05$). Varyansların homojenliğinin kontrolü için Levene istatistiği kullanılmıştır. Test sonuçları Tablo 4.7. ve Tablo 4.8.'de, ortalama \pm standart sapma ($\bar{X} \pm SS$), enküçük-enbüyük değerler (enk-enb) olarak gösterilmiştir. Hem toplam ağırlıklı gecikme hem de işlemci zamanı değerlerinin, farklı σ düzeylerinde homojen varyanslara sahip olduğu görülmüştür ($p>0,05$).

$j16$ için $30*3=90$ çözüm yerine, çözüm elde edilen denemeler üzerinde çalışıldığından örnek genişliği $14*3=42$ olmuştur.

Tablo 4.7. Standart sapma (σ) için tek yönlü varyans analizi sonuçları

σ	n	Toplam Ağırlıklı Gecikme $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p	İşlemci Zamanı $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p
1 σ	42	102,95 \pm 35,37 (35,00- 184,00)	0,000	5766,30 \pm 335,31 (5041,49- 6541,78)	0,000
3 σ	42	147,64 \pm 41,91 (58,00- 236,00)		5523,06 \pm 491,28 (4412,63- 6711,88)	
6 σ	42	190,24 \pm 43,69 (96,00- 275,00)		5883,90 \pm 412,87 (5111,48- 6674,20)	

ANOVA sonuçlarına göre 0,05 anlamlılık düzeyinde toplam ağırlıklı gecikme ortalamaları farklı σ düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Hangi σ düzeyinin farklı olduğunu anlamak amacıyla çiftli karşılaştırma testlerinden Bonferroni testi uygulanmış ve tüm σ düzeyleri için toplam ağırlıklı gecikme ortalamalarının farklı olduğu 0,05 anlamlılık derecesinde gözlenmiştir ($p < 0,05$).

Bununla beraber, 0,05 anlamlılık düzeyinde işlemci zamanı ortalamaları arasında, farklı σ düzeylerinde istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur ($p < 0,05$). Yapılan Bonferroni test sonuçlarına göre, hem toplam ağırlıklı gecikme hem de işlemci zamanı değerlerinin, farklı α düzeylerinde yapılan Levene testi sonucunda homojen varyanslara sahip olduğu gözlenmiştir ($p > 0,05$).

Tablo 4.8. α düzeyleri için tek yönlü varyans analizi sonuçları

α	n	Toplam Ağırlıklı Gecikme $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p	İşlemci Zamanı $\bar{X} \pm SS,$ (enk-enb)	p
0,15	42	112,93 \pm 45,23 (35,00- 206,00)	0,000	5718,87 \pm 484,61 (4412,63- 6711,88)	0,822
0,10	42	147,31 \pm 47,38 (62,00- 256,00)		5697,19 \pm 403,16 (4779,15- 6381,10)	
0,05	42	180,60 \pm 46,72 (89,00- 275,00)		5757,20 \pm 440,86 (5014,41- 6700,42)	

ANOVA sonuçlarına göre 0,05 anlamlılık düzeyinde toplam ağırlıklı gecikme ortalamaları farklı α düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Hangi α düzeyinin farklı olduğunu anlamak amacıyla çiftli karşılaştırma testlerinden Bonferroni uygulanmış ve tüm α düzeyleri için toplam ağırlıklı gecikme ortalamalarının birbirinden farklı olduğu 0,05 anlamlılık derecesinde gözlenmiştir ($p<0,05$).

Bununla beraber, 0,05 anlamlılık düzeyinde işlemci zamanı ortalamaları farklı α düzeyleri için istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$).

5. KAYNAK KISITLI ÇOK MODLU ÇOKLU STOKASTİK PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMA

KKPÇP'nin NP-zor problem olduğu, Blazewicz vd. [4] tarafından ispat edilmiştir. KKÇMÇPÇP ise, KKPÇP'ye ek olarak çoklu proje ortamında, birden fazla mod alternatifini dikkate alarak faaliyetlerin çizelgelenmesiyle ilgilenen bir problemdir. Bu durum, KKÇMÇPÇP'nin de NP-zor problem sınıfında olduğunu göstermektedir. Öyle ki, kabul edilebilir makul zaman sınırları dâhilinde büyük ölçekli problemlere kesin çözüm yöntemleri kullanarak, çözüm üretmek mümkün değildir. Bu nedenle, KKÇMÇSPÇP'nin çözümü için meta-sezgisel algoritmalarından TB algoritmasına dayalı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Ayrıca, bu tez kapsamında incelenen ve Bölüm 4.1'de geniş tanımı verilen çizelgeleme problemi için KT politikası benimsenmiştir. Bu durumda klasik KKÇMÇSPÇP'ye ek olarak, çoklu proje ortamında, toplam ağırlıklı gecikme değerini eniyilecek şekilde, sınırlı kaynakların her bir projeye hangi miktarda tahsis edilmesi gerektiği ile ilgilenen KT problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problemin çözümü için Beşikçi vd. [6] tarafından uyarlanan KM yöntemi kullanılmıştır.

Bu bölümde, öncelikle TB algoritması ve uygulama adımları hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra, KM yöntemi ve geliştirilen TB algoritması detaylı şekilde açıklanmıştır.

5.1. Tavlama Benzetimi Algoritması

TB algoritması, kombinatoriyal eniyileme problemleri için, iyi ve etkin çözümler veren stokastik bir arama yöntemidir. İsmi, katıların fiziksel tavlama süreci ile benzerliğinden ileri gelmektedir. Metallerin, soğuyarak minimum enerjili kristal yapıda donmaları (tavlama süreci) olayından esinlenilerek ortaya konulmuş olan bir meta-sezgisel yöntemdir. Birbirlerinden bağımsız olarak, 1983 yılında Kirkpatrick vd. [64] ve 1985 yılında Cerny [65] tarafından ortaya konmuştur. Komşu Arama yöntemine dayalı bir algoritmadır ve bu yöntemin basit bir şekli olan İniş (descent) algoritmasını kullanarak, rassal olarak seçilen bir başlangıç çözümden başlayarak aramaya başlar.

TB algoritması, karmaşık veri yapısının bulunduğu, çok fazla kısıt içeren yüksek dereceli doğrusal olmayan modellerde de uygulanabilen genel ve güçlü bir meta-sezgiseldir. Kolay uyumludur, yani makul zorluktaki doğrusal olmayan ve stokastik sistemlerin çözümü için kolaylıkla performansını arttırabilir. Uyum gösterme özelliği sayesinde algoritma, etkinliğini yükselterek değişik problemlere çözüm bulmada kullanılabilir.

Genel en iyi çözüme ulaşmak için, etkin bir eniyileme algoritması iki teknik kullanılmalıdır. İlki, arama uzayındaki yeni ve bilinmeyen alanların ortaya çıkarılmasıdır (diversification). Diğeri ise, önceden ulaşılan noktalarda elde edilen bilgilerin, daha iyi sonuçların elde edilebilmesi (iyileştirilmesi) (intensification) için kullanılmasıdır. Bu iki özellik birbirleriyle bağlantılı olduğundan aralarında iyi bir denge kurulmalıdır.

TB uygun bir başlangıç çözümünden başlar ve daha sonra arama uzayının yüksek derecede uygunluk gösteren bölgelerinde daha fazla sayıda deneme yaparak aramayı yoğunlaştırır. Bir meta-sezgisel olan TB'nin bir algoritmaya dönüştürülebilmesi için birçok tercih yapılır. Çözümlerin kalitesi ile çözüm zamanı arasında net bir ilişki vardır. TB'nde bulunan çözümlerin amaç fonksiyonu kullanılarak değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu ölçümlerin yapılması toplam çözüm zamanı içinde değerlendirildiği için, ölçümlerin etkin bir şekilde yapılması oldukça önemlidir.

Bu algoritmada ilk sonuçlar bulduktan sonra, mevcut çözümler üzerinde değişimler gerçekleştirilerek yeni komşu çözümler elde edilir. Komşu çözümler öncekilerden daha iyi ise kabul edilir ve yeni araştırma süreci, elde edilen çözümler üzerinden devam eder. Daha kötü amaç fonksiyonu değerine sahip komşu çözüm, belirlenen bir olasılıkla yeni çözüm olarak kabul edilebilir. Bu sayede yerel en iyiye takılma tuzağından kurtulmuş olur ve genel en iyiyi arama süreci devam eder.

TB algoritması olasılıklı bir arama yöntemidir. Arama esnasında, amaç fonksiyonu değerini etkileyen değişimler kabul edilebilir. Bir sonraki hareketin kabul edilip edilmeyeceğine olasılıklı olarak karar verilir: herhangi i çözümünden j komşu çözümüne geçme olasılığı (enküçükleme için) aşağıda verilen kabul fonksiyonuna göre belirlenir;

$$P = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \Delta < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta}{T}\right) & \text{eğer } \Delta > 0 \end{cases}$$

$\Delta = f_j - f_i$ yeni çözümün, mevcut çözümden sapmasını göstermektedir ve T mevcut sıcaklığı göstermektedir.

TB'de;

- Olası çözümlerin gösterimi,
- Çözümlerde rastgele değişimler gerçekleştirilmesi,
- Amaç fonksiyonunun hesaplanması,
- Tavlama süreci – Başlangıç sıcaklığı ve arama boyunca sıcaklığın değişimini belirleyecek kurallar yer almalıdır.

TB algoritmasını anlayabilmek için algoritmayla ilgili olan temel kavramların bilinmesi gerekmektedir.

➤ **Başlangıç sıcaklığı ve son sıcaklık:**

Başlangıç sıcaklığı, ilk aşamada kötü çözümleri kabul edecek ve elde edilen son çözümün başlangıç çözümden bağımsız olmasını sağlayacak kadar yüksek bir sıcaklık olmalıdır. Başlangıç sıcaklığı, TB'nin ilk aşamalarında mevcut çözümü iyileştiren ve iyileştirmeyen çözümlerin belirli bir oranını (yaklaşık %90) kabul edecek kadar yüksek olmalıdır. Bir başka ifade ile başlangıç sıcaklık değeri, maddenin sıvı hale ulaştığında tüm atomlarının rassal olarak düzenlenmesini taklit etmek için, denenen hareketlerin büyük bir kısmı kabul edilecek kadar yüksek bir değer olmalıdır. Son sıcaklık değeri ise, durdurma koşulu olarak belirlenir. Bu değere ulaşıldığında arama işlemi sonlandırılır.

➤ **Soğutma planı:**

Soğutma planı algoritmanın önemli özelliklerinden biridir. Öyle ayarlanmalıdır ki, mevcut sıcaklıkta, sistem denge dağılımına yaklaşmalıdır ve algoritmanın sonlarına doğru sıcaklık, kötü çözümleri kabul etme olasılığını sıfıra yaklaştıracak şekilde düşük olmalıdır.

Bu iki özelliği gerçekleştirmek için iki yol bulunmaktadır:

1. Sıcaklığı görece hızlı düşürerek, her sıcaklıkta büyük sayıda çözüm noktası aramak.
2. Sıcaklığı görece yavaş düşürerek, her sıcaklıkta daha az sayıda çözüm noktası aramak.

Sıcaklığın azaltılma oranını kontrol etmek için en çok kullanılan yöntemlerden biri geometrik soğutma olarak adlandırılır. Geometrik soğutma işlemi bir başlangıç sıcaklığı ile

başlar ve sıcaklık her yinelemede veya belirli sayıda yineleme sonunda, genellikle 0,8 – 0,99 arasında seçilen bir a değeri (soğutma oranı) ile çarpılarak düşürülür.

➤ **Durdurma koşulu:**

TB algoritması aşağıda listelenen durdurma koşullarından bir veya birkaçını kullanabilir. Algoritma, kullanılan koşullardan herhangi biri karşılanana dek aramaya devam eder.

- Belirlenmiş alt sınıra ulaşılması,
- Tüm komşu çözümlerin reddedilmesi,
- Sıcaklığın en küçük değere ulaşması,
- Belirlenmiş en büyük yineleme sayısına ulaşılması,
- En büyük hesaplama zamanının aşılması.

Enküçükleme problemi için TB algoritmasının genel adımları aşağıda özetlenmiştir:

Adım 1: Başlangıç çözümünü (S) ve başlangıç sıcaklığını (T_0) belirle.

Adım 2: Başlangıç çözümü (S)'i, mevcut çözüm (S_{mevcut}) ve en iyi çözüm ($S_{en\ iyi}$) olarak kabul et.

Adım 3: Bitiş koşulu sağlanmışsa Dur. Aksi halde Adım 4 e git.

Adım 4: Mevcut çözümden (S_{mevcut}) komşu çözüm üret S' .

$\Delta = \text{Amaç Fonk}(S') - \text{Amaç Fonk}(S)$ hesapla.

Eğer $\Delta \leq 0$ ise yeni çözümü mevcut çözüm olarak kabul et.

Eğer $\Delta > 0$ ise $e^{-\Delta/T}$ olasılığı ile yeni çözümü mevcut çözüm olarak kabul et.

Eğer $S_{mevcut} < S_{en\ iyi}$ ise, S_{mevcut} 'u $S_{en\ iyi}$ olarak kabul et.

Adım 3'e git.

5.1.1. Kombinatoryal Mezat yöntemi

KT politikası altında KKÇMÇSPÇP iki temel problemi içermektedir: (1) kaynakların projelere hangi miktarlarda tahsis edileceği (KT problemi) ve (2) projedeki her bir faaliyetin belirlenen amaç fonksiyonu değerini eniyilemek için nasıl çözümlenmesi gerektiği.

KT probleminin çözümü için, Beşikçi vd. [6] tarafından önerilen yerel iyileştirme sezgisellerinden, KM yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde ilk olarak, kaynakların projeler için değeri hesaplanmaktadır. Daha sonra hesaplanan bu değerler üzerinden, kaynakların tahsis işlemi gerçekleştirilmektedir.

Kaynakların projeler için ne kadar değerli olduğu, aslında herhangi bir kaynak için projenin tercih edilirlilik seviyesini göstermektedir. Projelerin kaynaklar için tercih edilirlilik seviyesi ise, ilgili projeye bir birimlik kaynak artışı yapıldığında, amaç fonksiyonunda ne kadarlık iyileşme olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle, tercih edilirlilik seviyesi doğru hesaplanırsa kaynakların projelere tahsis işlemi, toplam ağırlıklı gecikmeyi enküçükleyecek şekilde gerçekleştirilebilir.

KM yöntemi ile önce tercih edilirlilik seviyesi hesabı için Doğrusal Gevşeme tabanlı yaklaşım [6] kullanılmıştır. Bu yaklaşımın temel dayanağı, çoklu proje ortamında KT politikası uygulandığında, kaynaklar her bir projeye tahsis edildiği ve sadece o projede kullanımlarına izin verildiği için, her bir projenin kendi içinde değerlendirilebilir durumda olmasıdır. Bu durumda KKÇMÇPÇP, KKÇMPÇP'ye indirgenmiş olmaktadır. KKÇMPÇP doğrusal gevşeme modeline dönüştürülüp çözümlerse, elde edilen çözümler, kaynakların projeler için değerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Doğrusal gevşeme modeli için Bölüm 2.2'de verilen matematiksel modeldeki, $x_{pamz} \in \{0, 1\}$ kısıtı gevşetilerek $0 \leq x_{pamz} \leq 1$ haline getirilir.

Doğrusal gevşeme modelinin çözümü ile iki farklı bilgi elde edilir: (1) eşters değişken (gölge ederi) ve (2) kısıtların sağ taraf değeri için izin verilen üst-alt sınırlar. Elde edilen bu bilgiler, eşterslik teorisine göre, sağ taraf değerindeki 1 birimlik artışın, amaç fonksiyonu değerindeki iyileşme miktarını ve amaç fonksiyonunun en iyi değerini etkilemeden sağ taraf değerinin ne kadar değiştirilebileceğini göstermektedir.

Her bir proje için hazırlanan doğrusal gevşeme modeli çözümlenerek, kaynakların projeler için değeri hesaplanmaktadır. Kaynak kısıtı için izin verilen üst sınırın, sağ taraf değerine yakınlığı, kaynak için projenin tercih edilirlilik seviyesini belirlemede kullanılmıştır:

Yenilenebilir kaynak r için

$$cls_{rp} = \frac{1}{\min_z \{AUB_{rzp} - DR_{rp}\}}$$

$$p_{rp} = \frac{cls_{rp}}{\sum_p^p cls_{rp}}$$

Yenilenemez kaynak u için

$$cls_{up} = \frac{1}{AUB_{up} - DW_{up}}$$

$$p_{up} = \frac{cls_{up}}{\sum_p^p cls_{up}}$$

cls_{rp} ve cls_{up} sırasıyla izin verilen üst sınırların, tahsis edilen yenilenebilir ve yenilenemez kaynak seviyelerine yakınlığını göstermek üzere AUB_{rzp} , z zaman döneminde r yenilenebilir kaynağı için izin verilen üst sınırı temsil etmektedir. AUB_{up} ise yenilenemez kaynak u için izin verilen üst sınırı temsil etmektedir. Ayrıca, DR_{rp} ve DW_{up} ise p projesi için, tahsis edilen yenilenebilir kaynak r ve yenilenemez kaynak u miktarını ifade etmektedir. p_{rp} ve p_{up} ise sırasıyla proje p nin yenilenebilir kaynak r ve yenilenemez kaynak u için tercih edilirlilik seviyesini göstermektedir.

Kaynaklar açısından, projelerin değerleri hesaplandıktan sonra, bu bilgiler kullanılarak proje çizelgeleme problemi için amaç fonksiyonunu eniyileyecek şekilde kaynakların projelere tahsis miktarları belirlenir. Bunun için, doğrusal gevşeme modelinin çözümü sonrası hesaplanan gevşek kaynak miktarı kullanılır. Gevşek kaynak miktarları, herhangi bir projede kullanılmayan kaynak miktarını göstermektedir ve kaynakların artık kapasitesini ortaya koymaktadır. Kullanılmayan bu kaynakların, ilk aşamada hesaplanan proje değerlerine göre projeler içerisinde dağıtılması sağlanarak KT problemine çözüm üretilir.

Beşikçi vd. [6] tarafından KT problemi için uyarlanan KM yönteminin ikinci adımında, kaynaklar için hesaplanan projelerin değerleri ve gevşeklik miktarları Sırt Çantası problemi şeklinde modellenir. Sırt Çantası modelinin çözümü ile tüm projeler için elde edilecek faydayı enbüyüklenecek şekilde artık kaynak kapasitesi projeler arasında dağıtılır ve KT işlemi tamamlanmış olur. Yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar için Sırt Çantası problemi modeli (5.1) - (5.6) arasında verildiği şekilde oluşturulmuştur:

Yenilenebilir kaynaklar için:

$$\sum_p x_{rp} \leq y_r \quad \forall r \in R \quad (5.1)$$

$$x_{rp} \in R^+ \quad (5.2)$$

kısıtları altında

$$enb z = \sum_r \sum_p p_{rp} * x_{rp} \quad (5.3)$$

Yenilenemez kaynaklar için:

$$\sum_p x_{up} \leq y_u \quad \forall u \in U \quad (5.4)$$

$$x_{up} \in R^+ \quad (5.5)$$

kısıtları altında

$$enb z = \sum_u \sum_p p_{up} * x_{up} \quad (5.6)$$

p_{rp} ve p_{up} sırasıyla proje p nin yenilenebilir kaynak r ve yenilenemez kaynak u için tercih edilirlilik seviyesini, y_r ve y_u ise farklı projelere tahsis edilebilecek durumdaki yenilenebilir kaynak r ve yenilenemez kaynak u miktarlarını göstermektedir. x_{rp} ile x_{up} karar değişkenleri ise proje p ye tahsis edilen yedek yenilenebilir kaynak r ve yenilenemez kaynak u miktarını temsil etmektedir.

5.1.2. Probleme özgü geliştirilen Tavlama Benzetimi algoritması

Alan yazındaki çalışmalar, proje çizelgelemesi problemlerine TB algoritmasının kolay şekilde uygulanabildiğini ve başarılı olduğunu yani kaliteli sonuçların kısa sürede elde edilebildiğini göstermiştir [66]. Bu bilgiler ışığında, NP-zor problem olan KKÇMÇSPÇP'nin çözümü için TB meta-sezgiseli tercih edilmiştir.

KKÇMÇSPÇP özgü geliştirilen TB algoritmasında kullanılan parametreler tezin bu bölümünde açıklanmıştır.

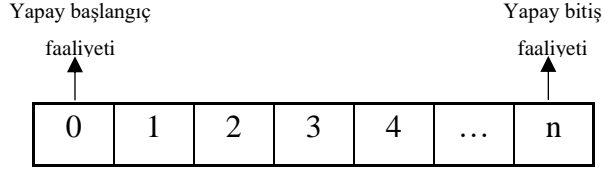
➤ Çözüm gösterimi:

Çözümün gösterim şekli, TB algoritmasının önemli bir parçasıdır. Kolay komşu çözüm üretmeyi ve hızlı hesaplama olanak sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bununla birlikte, çözüm gösterimi tüm çözüm uzayını temsil edebilecek yetkinlikte olmalıdır.

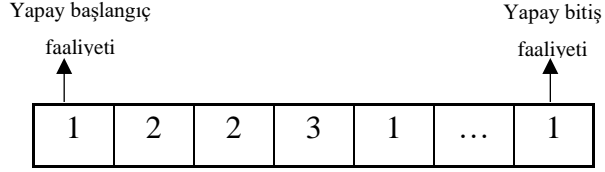
Uygun çözümün gösterimi için, boyutu $2 \times n$ -faaliyet sayısı olan liste kullanılmıştır. Listelerin ilki, faaliyetlerin öncüllük ilişkilerini göstermektedir. Diğer liste ise, faaliyet gerçekleştiği modu göstermektedir. Şekil 5.1'de çözüm gösteriminin genel hali verilmiştir.

Proje 1

Faaliyet

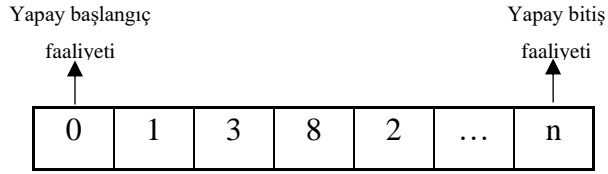


Mod

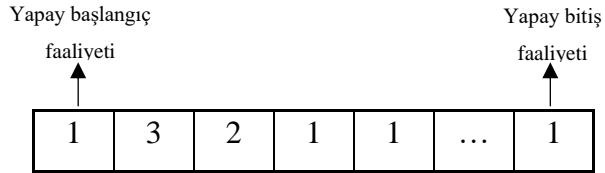


Proje 2

Faaliyet

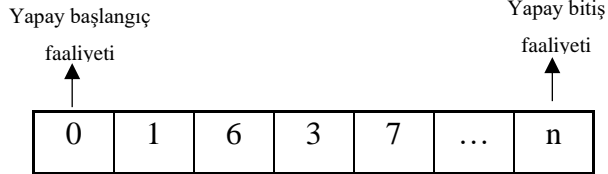


Mod

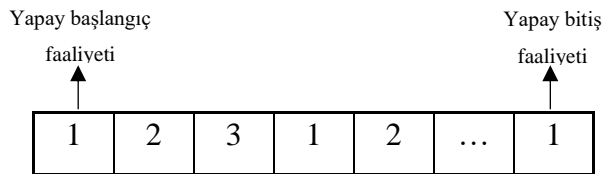


Proje n

Faaliyet



Mod



Şekil 5.1. TB algoritması çözüm gösterimi

➤ Başlangıç çözümü:

Başlangıç çözümünün belirlenmesi için, sıralama kuralı tabanlı sezgisellerden, En Kısa İşlem Süresi (SPT) kuralı kullanılmıştır. SPT'ye göre öncüllük şartını sağlayan faaliyetlerden, en kısa süreli faaliyet ilk olarak gerçekleştirilecek şekilde çizelgeleme işlemi

kurgulanır. İlgili yöntem, yerel arama algoritmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bouleimen ve Lecocq [68] KKÇMPÇP için geliştirdikleri TB algoritmasının başlangıç çözümünü belirlemek için SPT kuralını uygulamışlardır. Bu aşamada ilk olarak, öncüllük ilişkisi kontrolü gerçekleştirilir. Öncüllük ilişkisi sağlandığında, faaliyet için tercih edilen modun ihtiyaç duyduğu kaynak miktarının mevcut olup olmadığı kontrol edilir. Tüm kısıtlar sağlandığında başlangıç çözümü oluşturulmuş demektir.

➤ **Başlangıç sıcaklığı:**

Algoritmanın ilk aşamalarında mevcut çözümü iyileştirecek, kötü çözümlerin belli oranlarını kabul edecek ve son çözümün başlangıç çözümünden bağımsız olmasını sağlayacak kadar yüksek sıcaklık seçilmelidir. Alan yazında başlangıç sıcaklığının belirlenmesi için değişik yaklaşımlar önerilmektedir. En sık kullanılanı, sabit bir başlangıç sıcaklığı değeri belirlemektir. Bizim çalışmamızda, problem boyutundan bağımsız olarak, başlangıç sıcaklığı belirlenmiştir. Örneğin, başlangıç çözümündeki %75 kötü çözümleri %90 olasılıkla kabul edecek başlangıç sıcaklığı aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta}{T_0}\right) \Rightarrow 0.90 = \exp\left(-\frac{75}{T_0}\right) \Rightarrow T_0 \cong 712$$

Herhangi bir sıcaklıkta bulunan kötü çözümlerin kabul olasılığı, $P = \exp\left(-\frac{\Delta}{T}\right)$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Δ ise yeni çözümün, mevcut çözümden sapma yüzdesini göstermektedir ve aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\Delta = \left[\frac{f_j - f_i}{f_i} \right] * 100$$

Farklı boyutlarda oluşturulan test problemleri üzerinde yapılan, kapsamlı ön deneysel çalışmalar sonucu, başlangıç sıcaklığı olarak $T_0 = 712$ belirlenmiştir.

➤ **Soğutma planı:**

TB algoritmasının başarısı için soğutma planı tercihi önemlidir. Bu tezde, alan yazında sıklıkla kullanılan geometrik soğutma fonksiyonu kullanılmıştır [67, 68]. Buna göre yeni sıcaklık, soğutma katsayısı (a) ve mevcut sıcaklığa (T_{i-1}) bağlı olarak aşağıda verilen eşitliğe göre hesaplanır.

$$T_i = a * T_{i-1}$$

Farklı boyutlarda oluşturulan test problemleri üzerinde yapılan, kapsamlı ön deneysel çalışmalar sonucu, soğutma katsayısı, $a = 0,99$ olarak belirlenmiştir.

➤ **Her sıcaklıktaki komşu sayısı:**

TB algoritmasında, tanımlanan komşu çözüm üretme mekanizmasına göre, mevcut çözümden komşu çözümler üretilmektedir. Sıcaklık değeri değiştirilmeden önce, her sıcaklıkta aranacak komşu sayısı, $L = 4$ olarak belirlenmiştir.

TB parametreleri, farklı boyutlarda oluşturulan test problemleri üzerinde yapılan kapsamlı ön deneysel çalışmalar sonucu belirlenmiştir.

➤ **Durdurma koşulu:**

Yerel en iyi çözüm tuzaklarına düşmemek için belirlenecek durdurma koşulu önemli bir kriterdir. Tavlama benzetimi algoritmasının hangi durumda durdurulacağını belirlemesi için alan yazında çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunların en yaygını, son sıcaklık değerinin belirlenen bir alt değere erişmesidir. Bunun dışında, en iyi değerinden önceden belirlenen ardışık yineleme sayısı sonunda iyileşmemesi, toplam yineleme sayısının önceden belirlenen sayıya erişmesi ya da her bir sıcaklıkta yapılacak hareketlerin sayısı durdurma koşulu olarak kullanılabilir. Diğer bir kuralda hesaplama süresini sınırlamaktır.

Yapılan ön deneysel çalışmalar sonrası, bu çalışmada 3 durdurma koşulu dikkate alınmıştır: ilk durdurma koşulu, son sıcaklık değerinin belirlenen bitiş sıcaklığı değeri olan, $T_s = 0,20$ 'ye ulaştığında arama işleminin sonlanması şeklinde tanımlanmıştır. İkinci durdurma koşulu olarak, ardışık 1000 komşu çözüm üretimi sonunda, çözüm iyileşmiyorsa arama işleminin durdurulması şeklinde belirlenmiştir. Üçüncü durdurma koşulu ise, kaynakların sonsuz olduğu varsayımını kullanarak, kritik yol (KY) değeri hesaplanmakta ve algoritmanın amaç fonksiyonu değeri KY değeri ile karşılaştırılmaktadır. Eğer KY değerine ulaşılmışsa arama tamamlanır. Bu tezde geliştirilen TB algoritmasında bu koşullardan herhangi biri ile karşılaşıldığında, arama işlemi sonlandırılmaktadır.

➤ **Komşu çözüm üretimi:**

Komşu çözüm üretimi, TB algoritmasının performansını etkileyen önemli bir işlemdir. Tez çalışmasında komşu çözüm üretmek için üç yöntem kullanılmıştır [66]. Her bir komşu çözüm üretiminde, bu yöntemlerden biri rassal olarak seçilerek kullanılmaktadır.

Ön denemeler sonucunda, Yöntem 3'ün olasılığı 0,5 olarak belirlenmiştir. Yöntem 2'nin olasılığı aşağıda verilen eşitliğe göre belirlenmektedir.

$$P_{Yöntem2} = \left(0,5 - \frac{Ayrit\ Sayısı}{düğüm\ sayısı(düğüm\ sayısı - 1)} \right)$$

Yöntem 1'in olasılığı ise,

$$P_{Yöntem1} = 1 - P_{Yöntem2} - P_{Yöntem3}$$

eşitliğine göre hesaplanır.

Hangi komşu çözüm üretme yönteminin kullanılacağı, [0, 1) aralığında üretilen rassal sayıya bağlı olarak belirlenir.

Yöntem 1:

Adım 1: Mevcut uygun çözüm üzerinde, rastgele bir faaliyet seçilir.

Adım 2: Seçilen faaliyetin mevcut mod değeri, yine rastgele seçilen yeni bir mod değeri ile değiştirilir.

Adım 3: Mod değişikliği ile birlikte, faaliyetin süresi ve kullanılan kaynak miktarı değişmektedir. Çizelgede buna bağlı olarak değişmektedir. Bu aşamada, tamir (repair) fonksiyonu devreye alınır. Buna göre, faaliyet listesinin, modu değiştirilen faaliyetten sonraki bölümü, en erken şekilde işleri tamamlayacak şekilde öncülük ve kaynak kısıtlarını dikkate alarak yeniden çizelgelenir.



Şekil 5.2. Yöntem 1'e göre komşu çözüm üretimi

Yöntem 2:

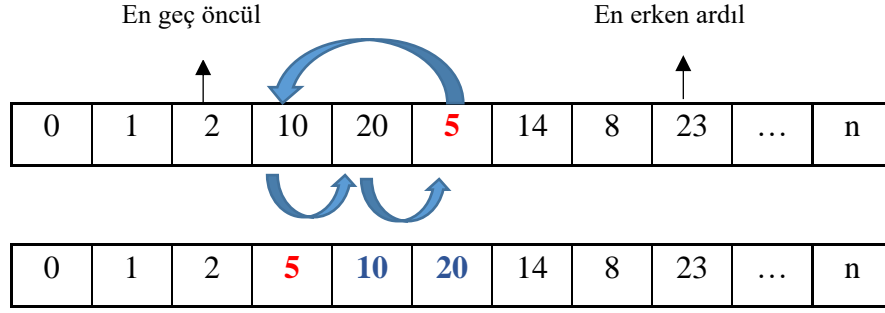
Adım 1: Mevcut uygun çözüm üzerinde, rastgele bir faaliyet seçilir.

Adım 2: Bu faaliyetin, en geç öncülü ve en erken ardılı, faaliyet listesi üzerinde belirlenir.

Adım 3: Adım 2'de belirlenen iki nokta arasında, faaliyetin taşınacağı yeni pozisyon, x , rastgele belirlenir. Pozisyon x , faaliyetin en geç öncülü ve en erken ardılı arasında seçilerek, öncüllük ilişkisinin bozulmayacağı garanti edilir.

Adım 4: Adım 1'de seçilen faaliyet, Adım 3'te belirlenen yeni pozisyona, x , taşınır. $x+1$ ($x-1$) pozisyonundaki faaliyetler sağa (sola) doğru kaydırılır.

Adım 5: Faaliyet listesinin değişmesi ile birlikte, çizelge tamamen değişmektedir. Bu aşamada, tamir fonksiyonu devreye alınır. Buna göre, faaliyet listesinde yeri değiştirilen faaliyetten önceki bölüm olduğu gibi korunur. Ancak, yeri değiştirilen faaliyetin çizelgelendiği noktadan itibaren kalan tüm faaliyetler, en erken şekilde tüm faaliyetleri çizelgeleyecek şekilde tekrar düzenlenir.



Şekil 5.3. Yöntem 2'ye göre komşu çözüm üretimi

Yöntem 3:

Adım 1: Yöntem 1 ve Yöntem 2 birlikte uygulanır.

Tez kapsamında incelediğimiz KKÇMÇSPÇP için geliştirilen TB algoritmasının adımları aşağıda özetlenmiştir.

Adım 1: Proje verilerini oku ve KY değerini hesapla. KM yöntemi ile kaynakları projelere tahsis et.

Adım 2: Başlangıç çözümü x_0 ve başlangıç çözümüne göre amaç fonksiyonu değeri $f(x_0)$ 'ı hesapla.

Adım 3: Başlangıç çözümü x_0 'ı, en iyi çözüm x_{eniyi} olarak ve amaç fonksiyonu değeri $f(x_0)$ 'ı, en iyi çözüm amaç fonksiyonu değeri f_{eniyi} olarak ata.

Adım 4: Başlangıç çözümü x_0 'ı, mevcut çözüm x_{mevcut} ve amaç fonksiyonu değeri $f(x_0)$ 'ı, mevcut çözüm amaç fonksiyonu değeri f_{mevcut} olarak ata.

Adım 5: TB ye ait parametreleri, T_0, T_s, a, L oku. T_0 'ı mevcut sıcaklık değeri T , olarak ata.

Adım 6:

SayaçEniyi = 0

TAVLAMA ITERASYONU:

L defa Yap

Mevcut çözümün, x_{mevcut} komşu çözümünü üret, x' .

Amaç fonksiyonu değerini hesapla, $f(x')$.

$\Delta = \left[\frac{f(x') - f(x)}{f(x)} \right] * 100$ hesapla.

Eğer $\Delta < 0$ ise, $x_{mevcut} = x'$ ve $f_{mevcut} = f(x')$.

Eğer $f(x') < f_{eniye}$, $x_{eniye} = x'$ ve $f_{eniye} = f(x')$.

Eğer bir önceki komşu çözümde en iyi
değer güncellenmemişse

SayaçEniyi = SayaçEniyi + 1

Diğer Eğer bir önceki komşu çözümde en iyi
değer güncellenmişse

SayaçEniyi = 0

Eğer $f_{eniye} = KY$ değerine eşitse, aramayı durdur.

Diğer Eğer $P = e^{(-\Delta)/T} > x_{rassal} \sim U(0,1)$ ise

$x_{mevcut} = x'$ ve $f_{mevcut} = f(x')$ olarak sakla.

Yeni sıcaklığı hesapla, $T_i = aT_{i-1}$

Eğer $T = T_s$ ise ya da SayaçEniyi = 1000 ise aramayı durdur.

TAVLAMA ITERASYONU'NA GİR

5.2. Sayısal Analizler

Bu bölümde, KKÇMÇSPÇP çözümü için önerilen TB algoritmasının performansı incelenmiştir. Önerilen sezgisel algoritma, Microsoft Visual Studio 2016 ortamında, C++ programlama dilinde kodlanmıştır. Denemeler, Intel Core i5 3.1 GHz hızında işlemciye, 8 GB RAM ara belleğe sahip Win10 Pro işletim sistemi ile çalışan bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneysel karşılaştırma amacıyla kullanılan test problemleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra önerilen algoritmanın etkinliği incelenmiştir.

5.2.1. Test problemleri

Tezde geliştirilen sezgisel algoritmanın etkinliğini incelemek için kullanılan test problemleri, Kolisch ve Sprecher (1996) tarafından oluşturulan PSPLIB (<http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/library.html>) kütüphanesinden yararlanılarak üretilmiştir. Stokastik matematiksel modelin etkinliğini test etmek için kullanılan, $j10$ ve $j16$, veri setleri, TB algoritmasının başarısının değerlendirilmesinde de kullanılmıştır (Bkz. Bölüm 4.4.1). Orta ve büyük ölçekli projeler üzerinde test işlemleri gerçekleştirmek için, PSPLIB kütüphanesinde, KKÇMPÇP problemleri için sağlanan en fazla faaliyet sayısına sahip ilk iki veri seti kullanılmıştır. Her bir projesi 20 faaliyet içeren $j20$ ve her bir projesi 30 faaliyet içeren $j30$ veri setlerinden altı adet tek proje problemi birleştirilerek, altı projeli 30 adet test problemi elde edilmiştir.

Kütüphanedeki, veri setlerinin yanındaki rakamlar, o setteki projelerin içerdiği faaliyet sayısını vermektedir. $j10$ veri seti 10 faaliyet içerirken, $j30$ veri seti 30 faaliyet içerir. Bunlara ek olarak her bir proje, başlangıç ve bitiş faaliyeti temsil etmek üzere 2 adet kukla faaliyet içerir. Bu durumda da faaliyet sayısı, $j16$ veri seti için 18, $j20$ veri seti için 22 olmaktadır.

Tablo 5.1.'de TB algoritmasının başarısının değerlendirilmesinde kullanılan test problemlerinin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Test problemlerinin özellikleri

PSBLIB veri setleri	Test problemi sayısı	Her problemdeki proje sayısı	Her projedeki faaliyet sayısı	Her faaliyetteki mod sayısı
$j10$	30	6	12	3
$j16$	30	6	18	3
$j20$	30	6	22	3
$j30$	30	6	32	3

PSPLIB'deki test problemleri belirli parametrelere sahip olduğu için stokastik probleme dönüştürülmesi gerekmiştir. Bunun için, PSPLIB'de verilen belirli faaliyet süresi, stokastik modelde Normal dağılıma sahip olan faaliyet süresinin ortalaması olarak kabul

edilmiştir. Kabul edilen bu ortalama değerin 1/3 ünün karesi ise faaliyet süresinin varyansı olarak dikkate alınmıştır.

Böylece aşağıda verilen Standart Normal dağılım dönüşümü formülasyonu kullanılarak her bir test problemi için projelerdeki faaliyet süreleri hesaplanmıştır. z , $1 - \alpha$ güven düzeyine ait Standart Normal dağılım değerini ($\alpha=0,05$ alınmıştır), μ faaliyet süresinin ortalama değerini, σ faaliyet süresinin standart sapma değerini göstermektedir.

$$z = (X - \mu) / \sigma \rightarrow X = z * \sigma + \mu$$

Projelerdeki ağırlıklandırma ise proje teslim tarihlerine göre belirlenmiştir. 1'den 6 ya kadar ağırlık değerleri, en uzak teslim tarihli projeye en düşük ağırlık, en yakın tarihli olana da en büyük ağırlık verilerek oluşturulmuştur. Aynı teslim tarihine sahip projelerde ise, ağırlık bu projeler arasında rastgele olarak atanmıştır.

5.2.2. Sonuçların değerlendirilmesi

Bu bölümde, probleme özgü geliştirilen TB algoritmasının performansını test etmek amacıyla yapılan analizler yer almaktadır. Önerilen çözüm yaklaşımı, aşağıda listelenen performans ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

- Yüzde Sapma Değeri (YSD): TB ile elde edilen toplam ağırlıklı gecikme değerinin (TB_TAG), ŞKP modeli sonucunda elde edilen toplam ağırlıklı gecikme değerinden (ŞKP_TAG) sapma yüzdesi.

$$YSD = \frac{TB_TAG - \text{ŞKP_TAG}}{\text{ŞKP_TAG}} \times 100$$

- Her bir problem için TB algoritmasının 10 kez çalıştırılması ile elde edilen, En İyi Çözüm (EÇ), En İyi Çözüm Süresi (EÇS), Ortalama Çözüm (OÇ), Ortalama Çözüm Süresi (OÇ) ve Değişim Katsayısı (DK).

Tablo 5.2. ve Tablo 5.3.'te sırasıyla *j10* ve *j16* veri setinden seçilen projelerle oluşturulan problemlerin test sonuçları verilmiştir. Her iki tabloda, ilk sütunda problem numarası, ikinci sütunda çoklu proje ortamını oluşturan projelerin PSBLIB kütüphanesindeki isimleri, üçüncü ve yedinci sütunlar arasında sırasıyla TB algoritmasına göre test problemleri için elde edilen en iyi çözüm (EÇ), en iyi çözümün elde edilme süresi (EÇS), ortalama çözüm (OÇ), 10 denemede elde edilen sonuçların ortalama çözüm süresi (OÇS) ve değişim katsayısı (DK) sonuçları verilmiştir. TB algoritması ile elde edilen sonuçlar, ŞKP modeli sonuçları ile karşılaştırılmış ve YSD hesaplanmıştır.

Bölüm 4.4.2'de ŞKP modelinin iki tasarım parametresinden (α , σ) ve bunların ŞKP modeli sonucu üzerindeki etkilerinden detaylı şekilde bahsedilmiştir. TB algoritmasının doğruluğunu göstermek için yapılacak geçerlilik analizinde şans kısıtının sağlanma olasılığını belirleyen, α düzeyi çok küçük bir değer olarak 0,001 kabul edilmiştir. Bu değer alabileceğimiz en düşük olasılık değeri olup, amacımız kesin değere çok yakınsayacak bir sonuç elde edebilmektir. Böylece, ilgili şans kısıtının bozulmasına neredeyse hiç izin verilmemektedir.

Tablo 5.2.'de dikkate alınan 30 test problemi ve Tablo 5.3'de ŞKP modeli ile çözülebilen tüm problemler için, TB algoritması ve ŞKP modelinin çözüm sonuçları eşit çıkmıştır. İki çözüm yönteminin sonuçları arasında herhangi bir sapma tespit edilmemiş, YSD sıfır olarak hesaplanmıştır.

α düzeyinin 0,001 olarak kabul edilmesiyle stokastik matematiksel modelin KKÇMÇSPÇP için en iyi değeri ürettiğini varsayarsak, YSD'nin tüm test problemleri için sıfır olarak hesaplanması TB algoritmasının doğruluğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla tez kapsamında geliştirilen ŞKP modeli ile çözümü elde edilemeyen problemlerin çözümünde, yine bu tez kapsamında geliştirilen TB algoritmasının kullanılması önerilmektedir.

Tablo 5.2.'de görüldüğü üzere, DK'nın en yüksek 0,0042 gibi çok küçük bir değer alması, TB algoritmasının ne kadar güçlü (robust) bir algoritma olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çözüm zamanı ortalamasının 213,79 saniye olduğu ve en iyi durumda ortalama değerlerin 182,91 saniyeye düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.2. TB algoritması analiz sonuçları – *j10* veri seti için

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
1	<i>j1010_1, j1010_2, j1010_3, j1010_4, j1010_5, j1010_6</i>	225	225,43	141,50	190,55	0,0022
2	<i>j1010_7, j1010_8, j1010_9, j1010_10, j1011_1, j1011_2</i>	188	188,00	192,11	228,17	0,0000
3	<i>j1011_3, j1011_4, j1011_5, j1011_6, j1011_7, j1011_8</i>	189	189,00	173,68	201,49	0,0000
4	<i>j1011_9, j1011_10, j1012_1, j1012_2, j1012_3, j1012_4</i>	182	182,00	188,30	225,19	0,0000
5	<i>j1012_5, j1012_6, j1012_7, j1012_8, j1012_9, j1012_10</i>	136	136,00	189,82	204,09	0,0000
6	<i>j1013_1, j1013_2, j1013_3, j1013_4, j1013_5, j1013_6</i>	235	235,00	130,31	173,98	0,0000
7	<i>j1013_7, j1013_8, j1013_9, j1013_10, j1014_1, j1014_2</i>	134	134,50	210,61	264,63	0,0037
8	<i>j1014_3, j1014_4, j1014_5, j1014_6, j1014_7, j1014_8</i>	132	132,00	182,63	214,97	0,0000
9	<i>j1014_9, j1014_10, j1015_1, j1015_2, j1015_3, j1015_4</i>	152	152,00	181,92	209,91	0,0000
10	<i>j1015_5, j1015_6, j1015_7, j1015_8, j1015_9, j1015_10</i>	113	113,00	213,24	226,77	0,0000
11	<i>j1016_1, j1016_2, j1016_3, j1016_4, j1016_5, j1016_6</i>	84	84,00	207,33	231,14	0,0000
12	<i>j1016_7, j1016_8, j1016_9, j1016_10, j1018_1, j1018_2</i>	186	186,00	201,36	221,92	0,0000
13	<i>j1018_3, j1018_4, j1018_5, j1018_6, j1018_7, j1018_8</i>	173	173,00	166,37	223,03	0,0000

Tablo 5.2. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
14	<i>j1018_9,j1018_10, j1019_1,j1019_2, j1019_3,j1019_4</i>	174	174,00	190,81	198,71	0,0000
15	<i>j1019_5,j1019_6, j1019_7,j1019_8, j1019_9,j1019_10</i>	173	173,00	219,50	231,20	0,0000
16	<i>j1020_1,j1020_2, j1020_3,j1020_4, j1020_5,j1020_6</i>	115	115,00	195,11	210,62	0,0000
17	<i>j1020_8,j1020_9, j1020_10,j1021_1, j1021_2,j1021_3</i>	119	119,53	174,57	207,96	0,0042
18	<i>j1021_4,j1021_5, j1021_6,j1021_7, j1021_8,j1021_9</i>	140	140,00	199,13	227,65	0,0000
19	<i>j1021_10,j1022_1, j1022_2,j1022_3, j1022_4,j1022_5</i>	193	193,00	162,27	222,42	0,0000
20	<i>j1022_6,j1022_7, j1022_8,j1022_9, j1022_10,j1023_1</i>	144	144,00	181,90	214,08	0,0000
21	<i>j1023_2,j1023_3, j1023_4,j1023_5, j1023_6,j1023_8</i>	106	106,00	173,02	195,92	0,0000
22	<i>j1023_9,j1023_10, j1024_1,j1024_2, j1024_3,j1024_4</i>	142	142,00	158,85	192,47	0,0000
23	<i>j1024_5,j1024_6, j1024_7,j1024_8, j1024_9,j1024_10</i>	122	122,00	195,18	218,00	0,0000
24	<i>j1026_1,j1026_2, j1026_3,j1026_4, j1026_5,j1026_6</i>	164	164,60	184,85	248,39	0,0030
25	<i>j1026_7,j1026_8, j1026_9,j1026_10, j1027_1,j1027_2</i>	191	191,00	191,99	232,23	0,0000
26	<i>j1027_3,j1027_4, j1027_5,j1027_6, j1027_7,j1027_8</i>	190	190,00	189,35	225,11	0,0000

Tablo 5.2. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
27	j1027_9,j1027_10, j1028_1,j1028_2, j1028_3,j1028_4	152	152,00	184,86	218,51	0,0000
28	j1028_5,j1028_6, j1028_7,j1028_8, j1028_9,j1028_10	222	222,00	182,61	205,62	0,0000
29	j1029_1,j1029_2, j1029_3,j1029_4, j1029_5,j1029_6	141	141,00	165,29	178,25	0,0000
30	j1029_7,j1029_8, j1029_9,j1029_10, j1030_1,j1030_2	152	152,00	158,78	170,87	0,0000
	Ortalamalar			182,91	213,79	

Tablo 5.3. incelendiğinde, 30 adet test problemi içerisinde en büyük DK değeri 0,0058 olarak hesaplanmıştır.

Problemlerdeki projelerin faaliyet sayısı, 10'dan 16'ya çıkarak daha büyük ölçekli projelerle çalışılmasına karşın, geliştirilen TB algoritması ile üretilen çözümler çok küçük DK değerlerine sahiptir. 16 faaliyete sahip projeler üzerinde de önerilen TB algoritmasının güçlü bir algoritma olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca, ortalama 257,87 saniyede çözüm bulunduğu, en iyi durumda bu ortalama değer 215,04 saniyeye düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.3. TB algoritması analiz sonuçları - *j16* veri seti için

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
1	<i>j1610_1, j1610_2, j1610_3, j1610_4, j1610_5, j1610_6</i>	146	146,53	212,66	249,41	0,0034
2	<i>j1610_7, j1610_8, j1610_9, j1610_10, j1611_1, j1611_2</i>	195	195,57	215,12	248,20	0,0025
3	<i>j1611_3, j1611_4, j1611_5, j1611_6, j1611_7, j1611_8</i>	122	122,37	195,20	228,02	0,0039
4	<i>j1611_9, j1611_10, j1612_1, j1612_2, j1612_3, j1612_4</i>	144	144,47	252,02	304,43	0,0035
5	<i>j1612_5, j1612_6, j1612_7, j1612_8, j1612_9, j1612_10</i>	116	116,00	241,85	261,67	0,0000
6	<i>j1613_1, j1613_2, j1613_3, j1613_4, j1613_5, j1613_6</i>	161	161,53	247,00	300,93	0,0031
7	<i>j1613_7, j1613_8, j1613_9, j1613_10, j1614_1, j1614_2</i>	194	194,00	261,23	282,90	0,0000
8	<i>j1614_3, j1614_4, j1614_5, j1614_6, j1614_7, j1614_8</i>	144	144,63	230,63	290,37	0,0033
9	<i>j1614_9, j1614_10, j1615_1, j1615_2, j1615_3, j1615_4</i>	177	177,00	244,64	282,29	0,0000
10	<i>j1615_5, j1615_6, j1615_7, j1615_8, j1615_9, j1615_10</i>	184	184,47	197,24	213,37	0,0027
11	<i>j1616_1, j1616_2, j1616_3, j1616_4, j1616_5, j1616_6</i>	162	162,67	220,98	266,99	0,0058
12	<i>j1616_7, j1616_8, j1616_9, j1616_10, j1617_1, j1617_2</i>	156	156,37	194,40	219,08	0,0031
13	<i>j1617_3, j1617_4, j1617_5, j1617_6, j1617_7, j1617_8</i>	170	170,00	218,14	276,41	0,0000

Tablo 5.3. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
14	<i>j1617_9, j1617_10, j1618_1, j1618_2, j1618_3, j1618_4</i>	174	174,57	186,31	247,63	0,0028
15	<i>j1618_5, j1618_6, j1618_7, j1618_8, j1618_9, j1618_10</i>	184	184,00	203,90	261,59	0,0000
16	<i>j1619_1, j1619_2, j1619_3, j1619_4, j1619_5, j1619_6</i>	200	200,40	230,19	289,37	0,0040
17	<i>j1619_7, j1619_8, j1619_9, j1619_10, j1620_1, j1620_2</i>	156	156,00	169,14	200,05	0,0000
18	<i>j1620_3, j1620_4, j1620_5, j1620_6, j1620_7, j1620_8</i>	168	168,00	212,90	264,45	0,0000
19	<i>j1620_9, j1620_10, j1621_1, j1621_2, j1621_3, j1621_4</i>	186	186,47	183,77	231,73	0,0027
20	<i>j1621_5, j1621_6, j1621_7, j1621_8, j1621_9, j1621_10</i>	128	128,00	167,40	218,86	0,0000
21	<i>j1622_1, j1622_2, j1622_3, j1622_4, j1622_5, j1622_6</i>	204	204,00	179,39	217,71	0,0000
22	<i>j1622_7, j1622_8, j1622_9, j1622_10, j1623_1, j1623_2</i>	192	192,00	194,61	247,59	0,0000
23	<i>j1623_3, j1623_4, j1623_5, j1623_6, j1623_7, j1623_8</i>	184	184,43	222,19	269,01	0,0027
24	<i>j1623_9, j1623_10, j1624_1, j1624_2, j1624_3, j1624_4</i>	160	160,00	206,73	271,65	0,0000
25	<i>j1624_5, j1624_6, j1624_7, j1624_8, j1624_9, j1624_10</i>	122	122,33	200,23	223,24	0,0039
26	<i>j1625_1, j1625_2, j1625_3, j1625_4, j1625_5, j1625_6</i>	144	144,00	202,59	255,96	0,0000

Tablo 5.3. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
27	<i>j1625_7, j1625_8, j1625_9, j1625_10, j1626_1, j1626_2</i>	146	146,00	233,86	302,56	0,0000
28	<i>j1626_3, j1626_4, j1626_5, j1626_6, j1626_7, j1626_8</i>	120	120,50	223,98	257,09	0,0041
29	<i>j1626_9, j1626_10, j1627_1, j1627_2, j1627_3, j1627_4</i>	167	167,00	250,99	275,89	0,0000
30	<i>j1627_5, j1627_6, j1627_7, j1627_8, j1627_9, j1627_10</i>	132	132,00	251,89	277,49	0,0000
	Ortalamalar			215,04	257,87	

Geliştirilen TB algoritmasını, orta ve büyük ölçekli problemler üzerinde test etmek için Beşikçi vd. [6] 'de verilen 20 ve 30 faaliyetli 10'ar adet problem kullanılmıştır.

Beşikçi vd. [6] çalışmalarında önerdikleri GA'nın etkinliğini, 10 test problemi için elde edilen ortalama toplam ağırlıklı gecikme (GA_TAG), ortalama çözüm süresi (OÇS), 10 test probleminin kaçında eniyi değere ulaşıldığı (UED) ve kaçında çözüm üretilmediği (ÇY) üzerinden raporlamışlardır. Beşikçi vd. [6] 'de herhangi bir test probleminin alacağı en küçük toplam ağırlıklı gecikme değerinin 35 olacağı belirtilmiştir. Buna göre, çoklu proje ortamındaki tüm projeler için eniyi çözüm değerine ulaşırsa, toplam ağırlıklı gecikme 35 çıkacaktır. Test problemleri bu kurguya göre oluşturulmuştur.

Tablo 5.4.'de Beşikçi vd. [6] 'nin çalışmalarında kullanılan problem setleri üzerinden yapılan test sonuçları gösterilmiştir. Dolayısıyla bu problemlerin TB ile çözümü için bu defa Beşikçi vd. [6] 'daki problem varsayımları kullanılmış ve TB algoritması buna göre uyarlanmıştır.

İlk sütunda, 6 projeden oluşan test problemlerinde her projenin kaç faaliyet içerdiği belirtilmiştir. İkinci ve dokuzuncu sütunlar arasında, sırasıyla Beşikçi vd. [6] 'nin önerdiği GA ile tez kapsamında geliştirilmiş olan TB algoritmasına ait ortalama toplam ağırlıklı gecikme (GA-TAG, TB-TAG), ortalama çözüm süresi (GA-OÇS, TB-OÇS), 10 test

probleminin kaçında eniyi değere ulaşıldığı (GA-UED, TB-UED) ve kaçında çözüm üretilmediği (GA-ÇY, TB-ÇY) listelenmiştir.

GA ve TB algoritması ile 20 ve 30 faaliyetli projeler içeren test problemlerinin 10'da 10 u için eniyi değere ulaşılmış ve çözüm bulunmayan hiçbir problem olmamıştır. Tüm test problemleri için eniyi değer bulunduğundan, her iki algoritma için de ortalama toplam ağırlıklı gecikme 35 olarak hesaplanmıştır. TB algoritması çözüme GA'dan daha hızlı ulaşmıştır.

Tablo 5.4.'de listelenen performans ölçütlerine göre, geliştirilen TB algoritması orta ve büyük ölçekli problemlerin çözümünde de oldukça etkin ve başarılıdır. Test problemleri için hızlı ve kaliteli çözümler üretilmiştir.

Tablo 5.4. Beşikçi test problemleri için GA ve TB algoritmasının karşılaştırılması

Faaliyet Sayısı	GA-TAG	TB-TAG	GA-OÇS (Dk.)	TB-OÇS (Dk.)	GA-UED	TB-UED	GA-ÇY	TB-ÇY
20	35	35	6,19	5,68	10	10	0	0
30	35	35	18,22	15,4	10	10	0	0

Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da sırasıyla $j20$ ve $j30$ veri setinden seçilen projelerle oluşturulan problemlerin test sonuçları verilmiştir. Bu tablolardaki test problemlerinin son 10 tanesi, Beşikçi vd. [6] 'nin çalışmasında verilen 20 ve 30 faaliyetli, belirli 10'ar adet problemin stokastik probleme çevrilmiş halidir. İlk 20 problem ise, test problemi sayısını 30'a tamamlamak için Bölüm 5.2.1.'de açıklandığı şekilde $j20$ ve $j30$ veri setlerinden oluşturulmuştur.

Tablo 5.5.'de görüldüğü üzere, DK en yüksek 0,0051 gibi çok küçük bir değer almıştır. Bu durum, TB algoritmasının büyük boyutlu problemlerde de ne kadar güçlü bir algoritma olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ortalama 385,9 saniyede çözüm bulunduğu, en iyi durumda bu ortalama değer 330,01 saniyeye düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.5. TB algoritması analiz sonuçları – *j20* veri seti için

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
1	<i>j2010_1, j2010_2, j2010_3, j2010_4, j2010_5, j2010_6</i>	184	184,33	319,63	362,22	0,0026
2	<i>j2010_7, j2010_8, j2010_9, j2010_10, j2011_1, j2011_2</i>	212	212,47	314,50	377,59	0,0023
3	<i>j2011_3, j2011_4, j2011_5, j2011_6, j2011_7, j2011_8</i>	183	183,00	324,00	373,36	0,0000
4	<i>j2011_9, j2011_10, j2012_1, j2012_2, j2012_3, j2012_4</i>	119	119,00	317,08	395,48	0,0000
5	<i>j2012_5, j2012_6, j2012_7, j2012_8, j2012_9, j2012_10</i>	175	175,00	296,56	369,42	0,0000
6	<i>j2013_1, j2013_2, j2013_3, j2013_4, j2013_5, j2013_6</i>	159	159,67	338,91	388,93	0,0030
7	<i>j2013_7, j2013_8, j2013_9, j2013_10, j2014_1, j2014_2</i>	211	211,00	315,27	385,72	0,0000
8	<i>j2014_3, j2014_4, j2014_5, j2014_6, j2014_7, j2014_8</i>	123	123,60	304,08	371,69	0,0040
9	<i>j2014_9, j2014_10, j2015_1, j2015_2, j2015_3, j2015_4</i>	152	152,57	320,24	378,24	0,0032
10	<i>j2015_5, j2015_6, j2015_7, j2015_8, j2015_9, j2015_10</i>	232	232,00	315,78	387,84	0,0000
11	<i>j2016_1, j2016_2, j2016_3, j2016_4, j2016_5, j2016_6</i>	156	156,00	337,59	374,12	0,0000
12	<i>j2016_7, j2016_8, j2016_9, j2016_10, j2017_1, j2017_2</i>	145	145,33	346,76	380,38	0,0051

Tablo 5.5. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
13	<i>j2017_3, j2017_4, j2017_5, j2017_6, j2017_7, j2017_8</i>	201	201,57	349,31	390,96	0,0025
14	<i>j2017_9, j2017_10, j2018_1, j2018_2, j2018_3, j2018_4</i>	180	180,00	350,67	405,60	0,0000
15	<i>j2018_5, j2018_6, j2018_7, j2018_8, j2018_9, j2018_10</i>	204	204,20	324,57	383,23	0,0029
16	<i>j2019_1, j2019_2, j2019_3, j2019_4, j2019_5, j2019_6</i>	149	149,00	328,51	380,32	0,0000
17	<i>j2019_7, j2019_8, j2019_9, j2019_10, j2020_1, j2020_2</i>	200	200,33	298,19	366,69	0,0037
18	<i>j2020_3, j2020_4, j2020_5, j2020_6, j2020_7, j2020_8</i>	212	212,57	312,55	372,55	0,0023
19	<i>j2020_9, j2020_10, j2021_1, j2021_2, j2021_3, j2021_4</i>	200	200,47	312,81	376,41	0,0042
20	<i>j2021_5, j2021_6, j2021_7, j2021_8, j2021_9, j2021_10</i>	183	183,00	328,22	379,41	0,0000
21	<i>j2032_10, j2025_3, j2043_8, j2059_10, j2053_4, j2042_10</i>	231	231,00	341,82	396,29	0,0000
22	<i>j2038_5, j2017_1, j2024_9, j2052_6, j2021_10, j2035_8</i>	208	208,50	331,49	390,99	0,0024
23	<i>j2019_4, j2054_6, j2053_2, j2033_9, j2051_2, j2014_5</i>	195	195,00	344,67	395,72	0,0000
24	<i>j2055_6, j2017_4, j2024_4, j2027_9, j2039_9, j2060_4</i>	149	149,47	335,07	391,53	0,0033

Tablo 5.5. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
25	<i>j2028_2, j2060_10, j2035_10, j2061_5, j2064_7, j2048_4</i>	219	219,50	345,50	403,28	0,0023
26	<i>j2056_4, j2055_5, j2020_4, j2019_5, j2015_1, j2063_3</i>	197	197,00	331,12	386,17	0,0000
27	<i>j2022_9, j2046_2, j2013_6, j2033_4, j2019_6, j2055_1</i>	199	199,30	360,91	408,11	0,0023
28	<i>j203_5, j2042_2, j2054_3, j2054_4, j2044_10, j2012_2</i>	185	185,00	354,34	403,72	0,0000
29	<i>j2038_4, j2046_8, j2038_10, j2055_10, j2040_3, j2027_6</i>	195	195,00	342,73	390,39	0,0000
30	<i>j2024_1, j2018_6, j2044_9, j2052_5, j2022_1, j2025_8</i>	144	144,33	357,31	410,63	0,0033
	Ortalamalar			330,01	385,90	

Tablo 5.6. incelendiğinde, 30 adet test problemi içerisinde en büyük DK değeri 0,0106 olarak hesaplanmıştır. Problemlerdeki projelerin faaliyet sayısı 30'a çıkarıldığında da çözümler çok küçük DK değerlerine sahip olmaktadır. Bu durum geliştirilen TB algoritmasının büyük boyutlu problemler için de güçlü bir algoritma olarak çözüm bulunduğunu göstermektedir. Tablo 5.2., Tablo 5.3. ve Tablo 5.5.'te gösterildiği gibi 10, 16 ve 20 faaliyetli projeler için de DK oldukça küçük değerler almıştır. Sonuç olarak faaliyet sayısından bağımsız olarak önerilen algoritmanın güçlü bir algoritma olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca, ortalama 853,56 saniyede çözüm bulunduğu, en iyi durumda bu ortalama değer 685,14 saniyeye düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.6. TB algoritması analiz sonuçları – *j30* veri seti için

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
1	<i>j3010_1, j3010_2, j3010_3, j3010_4, j3010_5, j3010_6</i>	398	398,53	702,05	935,60	0,0034
2	<i>j3010_7, j3010_8, j3010_9, j3010_10, j3011_1, j3011_2</i>	335	335,00	567,46	809,81	0,0000
3	<i>j3011_3, j3011_4, j3011_5, j3011_6, j3011_7, j3011_8</i>	321	321,00	574,99	811,83	0,0000
4	<i>j3011_9, j3011_10, j3012_1, j3012_2, j3012_3, j3012_4</i>	364	364,00	676,62	901,99	0,0000
5	<i>j3012_5, j3012_6, j3012_7, j3012_8, j3012_9, j3012_10</i>	289	289,00	745,94	938,65	0,0000
6	<i>j3013_1, j3013_2, j3013_3, j3013_4, j3013_5, j3013_6</i>	312	312,40	675,06	879,69	0,0038
7	<i>j3013_7, j3013_8, j3013_9, j3013_10, j3014_1, j3014_2</i>	338	338,53	679,38	794,52	0,0040
8	<i>j3014_3, j3014_4, j3014_5, j3014_6, j3014_7, j3014_8</i>	298	298,00	669,94	778,43	0,0000
9	<i>j3014_9, j3014_10, j3015_1, j3015_2, j3015_3, j3015_4</i>	350	350,00	744,50	929,23	0,0000
10	<i>j3015_5, j3015_6, j3015_7, j3015_8, j3015_9, j3015_10</i>	284	284,00	635,12	821,64	0,0000
11	<i>j3016_1, j3016_2, j3016_3, j3016_4, j3016_5, j3016_6</i>	397	397,80	815,11	938,88	0,0060
12	<i>j3016_7, j3016_8, j3016_9, j3016_10, j3017_1, j3017_2</i>	367	367,00	769,34	940,78	0,0000

Tablo 5.6. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
13	<i>j3017_3, j3017_4, j3017_5, j3017_6, j3017_7, j3017_8</i>	329	329,00	560,93	750,06	0,0000
14	<i>j3017_9, j3017_10, j3018_1, j3018_2, j3018_3, j3018_4</i>	333	333,40	698,59	859,39	0,0036
15	<i>j3018_5, j3018_6, j3018_7, j3018_8, j3018_9, j3018_10</i>	314	314,00	761,33	939,92	0,0000
16	<i>j3019_1, j3019_2, j3019_3, j3019_4, j3019_5, j3019_6</i>	291	291,00	703,03	856,92	0,0000
17	<i>j3019_7, j3019_8, j3019_9, j3019_10, j3020_1, j3020_2</i>	331	332,00	736,45	904,19	0,0067
18	<i>j3020_3, j3020_4, j3020_5, j3020_6, j3020_7, j3020_8</i>	322	322,00	804,21	934,38	0,0000
19	<i>j3020_9, j3020_10, j3021_1, j3021_2, j3021_3, j3021_4</i>	373	373,40	510,15	638,85	0,0027
20	<i>j3021_5, j3021_6, j3021_7, j3021_8, j3021_9, j3021_10</i>	355	354,00	680,96	816,06	0,0106
21	<i>j3030_10, j3023_8, j3035_8, j3048_4, j3035_5, j3019_8</i>	303	303,00	713,65	878,34	0,0000
22	<i>j306_2, j3060_7, j3030_4, j3024_6, j3029_1, j3041_5</i>	414	414,00	691,12	857,44	0,0000
23	<i>j3017_3, j3013_3, j305_4, j3016_9, j3025_9, j3045_10</i>	345	345,30	668,32	813,21	0,0026
24	<i>j3036_3, j3022_4, j3043_9, j3038_5, j303_1, j3039_1</i>	297	297,00	733,93	875,212876	0,0000

Tablo 5.6. devam ediyor

Problem No	Çoklu Proje	EÇ	OÇ	EÇS (Sn.)	OÇS (Sn.)	DK
25	<i>j301_10, j3051_4, j3063_1, j3064_2, j3023_9, j3020_2</i>	324	324,80	707,50	853,38	0,0092
26	<i>j306_9, j3030_8, j306_1, j3044_2, j3035_10, j3026_10</i>	372	372,80	634,38	825,01	0,0064
27	<i>j3039_10, j3044_10, j3013_10, j3048_9, j3035_4, j3022_7</i>	396	397,00	679,99	853,85	0,0056
28	<i>j3028_5, j3012_5, j3042_10, j3059_10, j3010_2, j3026_7</i>	321	322,07	570,92	709,94	0,0084
29	<i>j3063_9, j3019_7, j3036_10, j3010_9, j3053_3, j3064_1</i>	373	373,00	643,57	799,43	0,0000
30	<i>j3056_1, j3016_5, j3014_10, j3055_5, j3028_10, j301_9</i>	382	382,30	799,82	960,044	0,0024
	Ortalamalar			685,14	853,56	

Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da Beşikçi vd. [6] 'nin çalışmasındaki test problemlerinin stokastik probleme dönüştürülmüş halleri için çözüm sonuçları verilmiştir. Belirli parametrelere sahip problemler için eniyi değere ulaşıldığında hesaplanan toplam ağırlıklı gecikme değeri ile stokastik problem çözüldüğünde hesaplanan toplam ağırlıklı gecikme değeri arasındaki fark oldukça yüksek çıkmaktadır. Örneğin, Tablo5.5.'te Problem 24 için toplam ağırlıklı gecikme 149 olarak hesaplanırken, belirli problem tipinde bu değer 35 olarak hesaplanmıştır.

Gerçek hayatta proje yönetiminde, kontrol edilebilir ve edilemez birçok faktörden dolayı faaliyet süreleri belirli olmaktan uzaktır. Faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu durumlarda ise, projelerin tamamlanma süreleri Tablo5.5. ve Tablo 5.6.'daki problem çözüm sonuçlarından anlaşılacağı üzere belirli duruma göre büyük değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle etkin proje yönetimi için her zaman gerçek değerlerle çalışmak ve proje yönetimindeki karar vericilerin gerçekçi veriler üzerinden karar almalarının sağlanması

büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, tez kapsamında KKÇMÇSPÇP için geliştirilen TB algoritması, gerçekçi yaklaşımla büyük boyutlu projelerin yer aldığı çoklu proje ortamında kaynakların kısıtlı, faaliyetlerin birden çok farklı modda gerçekleştirilebildiği ve faaliyet sürelerinin stokastik olduğu, ayrıca kaynak tahsis politikasının kullanıldığı varsayımları ile projelerin çizelgelemede kullanımını önerilmektedir.

6. SONUÇ

Günümüzün çetin rekabet ortamında üretim ve servis sektöründeki firmalar, varlıklarını sürdürebilmek ve hızlı değişen ürün ve hizmet beklentilerine cevap verebilmek için iş yapış biçimlerini projeler şeklinde gerçekleştirmeye başlamışlardır. Her proje, planlama, uygulama ve kontrol süreçlerinden geçmektedir. Bu süreçte, çizelgeleme ve kaynak dağıtımı ile projeler yapılandırılmaktadır. Buna bağlı olarak proje çizelgeleme problemleri birçok sektörde sıklıkla karşılaşılan önemli bir eniyileme problemi haline gelmiştir.

Alan yazında PÇP'leri üzerine çalışmalar son yıllarda artış göstermektedir. Özellikle, iş dünyasının güçlü, etkili ve çok yönlü proje planlama araçlarına olan ihtiyacı, araştırmaların daha gerçekçi, varsayımlardan uzak ve karmaşık PÇP türleri üzerine kaymasına sebep olmuştur. Gerçek hayatta kaynaklar sonsuz değil kısıtlıdır. Projelendirilen işlerin büyük bölümü tek bir proje ile yönetilemeyecek kadar büyük ve kapsamlıdır. Bu nedenle, birden fazla proje aynı anda başlatılıp, eş zamanlı yönetilip tamamlanmaktadır. Proje yöneticileri en çok, zaman ve maliyet arasındaki dengeyi sağlamak için çaba harcamaktadır ve bu durumda faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için farklı kaynak alternatifleri oluşturmaktadırlar (bir faaliyetin farklı modlardan birinde gerçekleştirilerek istenilen amaca ulaşılabilecek çözümün elde edilebilmesi amacıyla). Öte yandan, bütün parametrelerin proje başlamadan önce belirli olduğu bir ortam gerçek hayatta mümkün değildir. Projeler, birçok belirsizlik altında yürütülmek zorunda kalmaktadırlar. Bu nedenle, tez kapsamında faaliyet sürelerinin belirsiz (rassal değişken olarak tanımlanmış) olduğu durum dikkate alınmıştır. Ayrıca, gerçekçi bir yaklaşım olması bakımından kaynak tahsis politikası benimsenmiştir. Diğer bir gerçekçi varsayım ise kaynakların kısıtlı olması durumunun dikkate alınmış olmasıdır. Bu varsayımlarla tanımlanan problem, Kaynak Kısıtlı Çok Modlu Çoklu Stokastik Proje Çizelgeleme Problemi olarak ortaya çıkmaktadır ve KKÇMÇSPÇP olarak kısaltılmış notasyonla tanımlanmıştır.

Bu tez kapsamında KKÇMÇSPÇP için:

- Problem tanımı ortaya konmuş ve stokastik problem için ŞKP modeli geliştirilmiştir.

- ŞKP modelinin etkinliğinin araştırılması amacıyla sayısal analizler yapılmıştır. ŞKP modeli ile görece küçük ölçekli problemlere makul sürelerde çözüm üretilebilmiştir. Tasarım parametreleri olan σ ve α düzeylerinin problemin çözümü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Faaliyet sürelerindeki yüksek değişkenliğin (σ) ve düşük α değerinin, çözülen modelin amaç fonksiyonu olan, toplam ağırlıklı gecikmeyi yükselttiği ortaya konmuştur. Proje yöneticileri ve karar vericilerin, proje yönetiminde dikkat etmesi gereken iki önemli faktör ortaya konmuştur.
- KKÇMÇSPÇP NP-zor bir problem olduğu için büyük ölçekli problemlere makul sürelerde kaliteli çözüm üretebilmek için TB algoritması önerilmiştir.
- TB algoritmasında başlangıç çözümü oluşturmak için öncelik kuralına dayalı sezgisellerden En Kısa İşlem Süresi (SPT) sezgiselinden yararlanılmıştır. SPT sezgiseli ile oluşturulan başlangıç çözümlerinin, önerilen TB algoritması üzerindeki etkisi ön inceleme çalışmalarında gözlemlenmiştir.
- TB algoritmasının parametrelerinin en iyi kombinasyonu yapılan ön inceleme ile belirlenmiştir. Probleme özgü geliştirilen TB algoritmasının etkinliğini araştırmak için yapılan sayısal analizler sonucunda, TB algoritmasının makul sürelerde iyi çözümler elde ettiği görülmüştür.

İleride yapılabilecek çalışmalar şöyle sıralanabilir:

- KKÇMÇSPÇP için farklı amaç tanımlanabilir. Problem, farklı kaynak yönetim politikalarının kombinasyonu altında incelenebilir.
- Rassal değişken olarak ifade edilen faaliyet süreleri, Normal dağılım yerine, farklı istatistiksel dağılımlar üzerinden incelenebilir.
- Faaliyet süreleri dışında, kaynak kullanım miktarı gibi farklı parametreler de rassal değişken olarak çalışılabilir.
- Birden fazla amacın birbiriyle çeliştiği gerçek hayat problemleri söz konusu olabilir. Bu durumda çok-amaçlı KKÇMÇSPÇP dikkate alınabilir. Pareto eniyi çözümler üzerine çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] G. Ulusoy, "Proje planlamada kaynak kısıtlı çizelgeleme" in *Yöneylem Araştırması: Halim Doğrusöz'e Armağan*, M. Köksalan and N. Erkip, Eds., Ankara, Turkey: ODTÜ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi), 2002, pp. 89-128.
- [2] J. E. Kelley, "Critical path planning and scheduling, mathematical basis," *Operations Research*, vol. 9, pp. 296-320, 1961.
- [3] J. H. Payne, "Management of multiple simultaneous projects: a state-of-the-art review," *International Journal of Project Management*, vol. 13, pp. 163-168, 1995.
- [4] J. Blazewicz, J. K. Lenstra and A. Rinnooy Kan, "Scheduling subject to resource constraints- classification and complexity," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 5, pp. 11-24, 1983.
- [5] A. A. B. Pritsker, L. J. Walters and P. M. Wolfe, "Multiproject scheduling with limited resources: a zero one programming approach," *Management Science*, vol. 16, pp. 93-108, 1969.
- [6] U. Beşikçi, Ü. Bilge and G. Ulusoy, "Resource dedication problem in a multi-project environment," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 25, pp. 206–229, 2013.
- [7] J. H. Patterson and W. D. Huber, "A horizon varying, zero-one approach to project scheduling," *Management Science*, vol. 20, no. 6, pp. 990-998, 1974.
- [8] J. P. Stinson, E. W. Davis and B. M. Khumawala, "Multiple resource-constrained scheduling using branch and bound," *AIIE Transactions*, vol. 10, pp. 252-259, 1978.
- [9] N. Christofides, R. Alvarez-Valdes and J. M. Tamarit, "Project scheduling with resource constraints: A branch and bound approach," *European Journal of Operational Research*, vol. 29, no. 3, pp. 262-273, 1987.

- [10] P. Brucker, S. Knust, A. Schoo and O. Thiele, "A branch & bound algorithm for the resource constrained project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 107, pp. 272-288, 1998.
- [11] E. W. Davis and J. H. Patterson, "A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling," *Management Science*, vol. 21, no. 8, pp. 944-955, 1975.
- [12] D. F. Cooper, "Heuristics for scheduling resource-constrained projects: An experimental investigation," *Management Science*, vol. 22, pp. 1186-1194, 1976.
- [13] F. F. Boctor, "Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 49, pp. 3-13, 1990.
- [14] S. Hartmann and R. Kolisch, "Experimental evaluation of state-of-the-art heuristic for the RCPSP," *European Journal of Operational Research*, vol. 127, pp. 394-407, 2000.
- [15] R. Kanit, M. Gündüz and O. Ozkan, "Investigating the effectiveness of certain priority rules on resource scheduling of housing estate projects," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 135, no. 7, pp. 609-613, 2009.
- [16] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Michigan, USA: The University of Michigan Press, 1975.
- [17] J. K. Lee and Y. D. Kim, "Search heuristics for resource-constrained project scheduling," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 47, pp. 678-689, 1996.
- [18] S. Hartman, "A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling," *Naval Research Logistics*, vol. 45, pp. 733-750, 1998.
- [19] P-H. Chen and H. Weng "A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling," *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 485-498, 2009.

- [20] F. F. Boctor, "An adaptation of the simulated annealing algorithm for solving resource constrained project scheduling problems," *International Journal of Production Research*, vol. 34, pp. 2335- 2351, 1996.
- [21] J. H. Cho and Y. D. Kim, "A simulated annealing algorithm for resource constrained project scheduling problems," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 7, pp. 736-744, 1997.
- [22] O. Icmeli and S. S. Erenguc, "A tabu search procedure for the resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows," *Computers & Operations Research*, vol. 21, no. 8, pp. 841-853, 1994.
- [23] Q. Jia and Y. Seo, "An improved particle swarm optimization for the resource-constrained project scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 2627-2638, 2013.
- [24] D. Merkle, M. Middendorf and H. Schmeck, "Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 64, no. 4, pp. 333-346, 2002.
- [25] W. Chen, Y. Shi, H. Teng, X. Lan and L. Hu, "An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling," *Information Sciences*, vol. 180, pp. 1031-1039, 2010.
- [26] R. Pellerin, N. Perrier and F. Berthaut, "A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 280, pp. 395-416, 2020.
- [27] A. Lova, C. Maroto and P. Tormos, "A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 127, pp. 408-424, 2000.

- [28] I. S. Kurtulus and E. W. Davis, "Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rule performance," *Management Science*, vol. 2, pp. 161-172, 1982.
- [29] S. R. Lawrence and T. E. Morton, "Resource-constrained multi-project scheduling with tardy costs: Comparing myopic, bottleneck and resource pricing heuristics," *European Journal of Operational Research*, vol. 64, pp. 168-187, 1993.
- [30] A. Lova and P. Tormos, "Combining random sampling and backward-forward heuristics for resource-constrained multi-project scheduling," in *International Workshop on Project Management and Scheduling*, Valencia, Spain, 2002, pp. 244-248.
- [31] D. Krüger and A. Scholl, "A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-) project scheduling problem with sequence-dependent transfer times," *European Journal of Operational Research*, vol. 197, pp. 492-508, 2009.
- [32] T. R. Browning and A. A. Yassine, "Resource-constrained multi-project scheduling: priority rule performance revisited," *International Journal of Production Economics*, vol. 126, pp. 212-228, 2010.
- [33] S. Kumanan, G. J. Jose and K. Raja, "Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 31, pp. 360–366, 2006.
- [34] G. Confessore, S. Giordani and S. Rismondo, "A market based multi-agent system model for decentralized multi project scheduling," *Annals of Operations Research*, vol. 150, pp. 115–135, 2007.
- [35] J. F. Gonçalves, J. J. M. Mendes and M. G. C. Resende, "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, pp. 1171–1190, 2008.

- [36] P. H. Chen and S. M. Shahandashti, "Hybrid of genetic algorithm and simulated annealing for multiple project scheduling with multiple resource constraints," *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 434-443, 2009.
- [37] H. N. Chiu and D. M. Tsai, "An efficient search procedure for the resource-constrained multi-project scheduling problem with discounted cash flows," *Construction Management and Economics*, vol. 20, pp. 55-66, 2002.
- [38] Z. Man, T. Wei, L. Xiang and K. Lishan, "Research on multi-project scheduling problem based on hybrid genetic algorithm," in *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, Wuhan, China, 2008, pp. 48-53.
- [39] D. Krüger and A. Scholl, "Managing and modelling general resource transfers in (multi-) project scheduling," *Springer - OR Spectrum*, vol. 32, pp. 369-394, 2010.
- [40] J. C Zhao, Y. M. Zhang, H. Y. Qu and H. Qi, "Ant colony optimization for resource-constrained multi-project scheduling," *IEEE*, vol. 978, no. 1, pp. 4244-3894, 2009.
- [41] A. Singh, "Resource constrained multi-project scheduling with priority rules & analytic hierarchy process," *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 725 - 734, 2014.
- [42] A. Elazouni, "Heuristic method for multi project finance based scheduling," *Construction Management and Economics*, vol. 27, pp. 199-211, 2008.
- [43] Z. Cai and X. Li, "A hybrid genetic algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem with resource transfer time," in *8th IEEE - International Conference on Automation Science and Engineering*, Seoul, Korea, 2012, pp. 50-56.

- [44] S. Yang and L. Fu, "Critical chain and evidence reasoning applied to multi-project resource schedule in automobile R&D process," *International Journal of Project Management*, vol. 32, pp. 166–177, 2014.
- [45] T. Y. Ayan, "Kaynak kısıtlı çoklu proje programlama problemi için tavlama benzetimi algoritması," *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, cilt. 23, sayı. 2, 2009.
- [46] A. Can and G. Ulusoy, "Multi-project scheduling with two-stage decomposition," *Annals of Operations Research*, vol. 217, pp. 95–116, 2014.
- [47] E. Pérez, M. Posada and A. Lorenzana, "Taking advantage of solving the resource constrained multi-project scheduling problems using multi-modal genetic algorithms," *Soft Computing*, vol. 10, no. 1007, pp. 500-515, 2015.
- [48] U. Beşikçi, Ü. Bilge and G. Ulusoy, "Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 240, pp. 22–31, 2014.
- [49] D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C. G. Clark and W. Fazar, "Applications of a technique for research and development program evaluation," *Operations Research*, vol. 7, no. 5, pp. 646-669, 1959.
- [50] W. Herroelen and R. Leus, "Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials," *European Journal of Operational Research*, vol. 165, pp. 289–306, 2015.
- [51] N. Sadeh, S. Otsuka and R. Schelback, "Predictive and reactive scheduling with the microboss production scheduling and control system," in *IJCAI-93 Workshop on Knowledge-Based Production Planning, Scheduling and Control*, Chambéry, France, 1993, 125-134.

- [52] H. Li and N. K. Womer, "Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming," *European Journal of Operations Research*, vol. 246, pp. 20-33, 2015.
- [53] F. Stork, "Branch-and-bound algorithms for stochastic resource-constrained project scheduling," Technische Universität, Berlin, Germany, 702, 2000.[Online]. Available: <ftp://ftp.math.tu-berlin.de/pub/Preprints/combi/Report-702-2000.pdf>.
- [54] D. Galenko-Ginzburg and A. Gonik, "A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation," *International Journal on Production Economics*, vol. 55, pp. 149–162, 1998.
- [55] Y. W. Tsai and D. D. Gemmil, "Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects," *European Journal of Operational Research*, vol. 111, pp. 129–141, 1998.
- [56] F. Ballestin, "When it is worthwhile to work with the stochastic RCPSp," *Journal of Scheduling*, vol. 10, pp. 153-166, 2007.
- [57] B. Ashtiani, R. Leus and M-B. Aryanezhad, "New competitive results for the stochastic resource-constrained project scheduling problem: Exploring the benefits of pre-processing," *Journal of Scheduling*, vol. 14, no. 2, pp. 157-171, 2011.
- [58] N. Balouka and I. Cohen, "A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 291, pp. 457–470, 2021.
- [59] F. Xie, H. Li and Z. Xu, "Multi-mode resource-constrained project scheduling with uncertain activity cost," *Expert Systems with Applications*, vol. 168, 2021.

- [60] Z. Zheng, L. Shumin, G. Ze and Z. Yueni, "Resource-constraint multi-project scheduling with priorities and uncertain activity durations," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 530-547, 2013.
- [61] I-T. Yang and C-Y. Chang, "Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding," *International Journal of Project Management*, vol. 23, pp. 546-553, 2005.
- [62] A. Charnes and W. W. Cooper, "Chance constrained programming," *Management Science*, vol. 6, pp. 73-79, 1959.
- [63] H. A. Taha, "Chance-constrained programming," in *Operations Research An Introduction*, M. J. Horton, Ed., Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall, 2007, pp.713-718.
- [64] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [65] V. Cerny, "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 45, pp. 41-51, 1985.
- [66] J. Jozefowska, M. Mika, R. Rozycki, G. Waligora and J. Weglarz, "Simulated annealing for multi-mode resource-constrained project scheduling," *Annals of Operations Research*, vol. 102, pp. 137-155, 2001.
- [67] F. F Boctor, "Resource-constrained project scheduling by simulated annealing," *International Journal of Production Research*, vol. 34, pp. 2335–2351, 1996.
- [68] K. Bouleimen and H. Lecocq, "A new efficient simulated annealing algorithm for the RCPSP and its multiple mode version," in *Proc. of the 6th International Workshop on Project Management and Scheduling*, Istanbul, Turkey, 1998, pp. 48-57.

EKLER

EK 1: Özet Alan Yazın Kaynak Tablosu

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Multiproject scheduling with limited resources: a zero one programming approach - A.A.B. Pritsker, L.J. Waiters, P.M. Wolfe	Management Science, vol.16, s.93- 108	1969	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi	Üç tip amaç fonksiyonu: tüm projeler için üretimde geçen toplam süre, tüm işleri bitirme süresi, toplam gecikme ya da gecikme cezasını enazlamak,	X	X		X			

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
A horizon varying, zero-one approach to project scheduling - J.H. Patterson, W.D. Huber	Management Science, vol.20, no.6, s.990-998	1974	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak	X	X		X	X		
A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling - E.W. Davis, J.H. Patterson	Management Science, vol.21, no.8, s.944-955	1975	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Eniyi değeri bilinen 83 farklı problem için, 8 farklı sezgisel yöntemin etkinliği test edilmiştir.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Heuristics for scheduling resource-constrained projects: An experimental investigation - D.F. Cooper	Management Science, vol.22, s.1186-1194	1976	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak ve Kullanım faktörünü ençoklamak	X	X		X	X		
Scheduling subject to resource constraints-classification and complexity - J. Blazewicz, J.K. Lenstra, A. Rinnooy Kan	Discrete Applied Mathematics, vol.5, s.11-24	1983	Kaynak kısıtlı çizelgeleme problemi	Kaynak kısıtlı deterministik çizelgeleme problemi: sınıflandırma ve karmaşıklık analizi ortaya konmuştur.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Heuristic performance and network/resource characteristics in resource-constrained project scheduling - G. Ulusoy, L. Ozdamar	Journal of Operational Research Society, vol.40, s.114-1152	1989	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak	X	X		X	X		
A branch and bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem - E. Demeulemeester, W. Herroelen	Management Science, vol.38, no.12, s.1803-1818	1992	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Resource-constrained multi-project scheduling with tardy costs: Comparing myopic, bottleneck and resource pricing heuristics - S.R. Lawrence, T.E. Morton	European Journal of Operational Research, vol.64, s.168-187	1993	Kaynak kısıtlı çoklu proje çizelgeleme problemi	Ağırlıklandırılmış gecikme maliyetine enazlamak	X	X		X	X		
Management of multiple simultaneous projects: a state-of-the-art review - J.H. Payne	International Journal of Project Management, vol.13, s.163-168	1995	Çok projeli çizelgeleme problemi	Tek organizasyon tarafından çoklu projelerin eş zamanlı yönetilmesi konusundaki araştırmalar incelenmiş ve eksiklikler ortaya konmuştur.	X	X			X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						Search heuristics for resource-constrained project scheduling - J.K. Lee, Y.D. Kim	Journal of the Operational Research Society, vol.47, s.678-689	1996	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak.	X
A simulated annealing algorithm for resource constrained project scheduling problems - J.H. Cho, Y.D. Kim	The Journal of the Operational Research Society, vol.48, no.7, s.736-744	1997	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işleri bitirme süresini enazlamak	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
A branch & bound algorithm for the resource constrained project scheduling problem - P. Brucker, S. Knust, A. Schoo, O. Thiele	European Journal of Operational Research, vol.107, s.272-288	1998	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işleri bitirme süresini enazlamak	X	X		X	X		
A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation - D. Galenko-Ginzburg, A. Gonik	International Journal on Production Economics, vol.55, s.149-162	1998	Kaynak kısıtlı, faaliyet süreleri belirsiz proje çizelgeleme problemi	Beklenen proje süresini enazlamak		X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects - Y.W. Tsai, D.D. Gemmil	European Journal of Operational Research, vol.111, s.129-141	1998	Kaynak kısıtlı, faaliyet süreleri belirsiz proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak.		X		X	X		
A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling - S. Hartman	Naval Research Logistics, vol.45, s.733-750	1998	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işleri bitirme süresini enazlamak	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling - A. Lova, C. Maroto, P. Tormos	European Journal of Operational Research, vol.127, s.408-424		2000	Kaynak kısıtlı çoklu proje çizelgeleme problemi	İki kritere göre iyileştirme yapılır. İlki, ortalama proje gecikmesi ya da çoklu proje süresindeki artıştır. Diğeri, projelerin bölünmesi işleme envanteri, kaynak seviyelendirme ya da boş kaynak miktarına balıdır.
Experimental evaluation of state-of-the-art heuristic for the RCPS- S. Hartmann, R. Kolisch	European Journal of Operational Research, vol.127, s.394-407	2000	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işlerin tamamlanma süresini enazlamak.	X	X	X	X			

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
An Efficient Search Procedure for the Resource-constrained Multi-project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows - H. N. Chiu, D. M. Tsai	Construction Management and Economics 20, 55-66	2002	Kaynak kısıtlı indirgenmiş nakit akışlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Net cari değeri enbüyüklerken, toplam proje gecikmesini de enazlamak.	X	X		X			
Combining random sampling and backward-forward heuristics for resource-constrained multi-project scheduling - A. Lova, P. Tormos	International Workshop on Project Management and Scheduling, Valencia, Spain, s.244-248	2002	Kaynak kısıtlı çoklu proje çizelgeleme problemi	Ortalama proje gecikmesini ve çok-projeli süre kriterinin enazlaması	X	X		X			

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding - I-T. Yang, C-Y. Chang	International Journal of Project Management, vol.23, s.546-553	2005	Kaynak kısıtlı, kaynakların arzı ve bütçenin belirsiz olduğu proje çizelgeleme problemi	Üretim oranını enbüyüklemek		X		X	X		
Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials - W. Herroelen, R. Leus	European Journal of Operational Research, vol.165, s.289-306	2005		Belirsizlik altında proje çizelgeleme problemi incelenmiş, çeşitleri ve bu çeşitler için geliştirilen çözüm yöntemleri raporlanmıştır.		X	X	X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						A Market Based Multi-agent System Model for Decentralized Multi Project Scheduling - G. Confessore, S. Giordani, S. Rismondo	Springer - Science + Business Media - Ann Oper Res 150:115– 135	2006	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Bütün proje faaliyetlerinin tamamlanması, öncüllük ve kaynak kısıtlarının sağlanması ve her proje tamamlanma süresinin enazlanması.	X
Multi-project Scheduling Using an Heuristic and a Genetic Algorithm - S. Kumanan, G. J. Jose, K. Raja	Springer - Int J Adv Manuf Technol 31: 360–366	2006	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Projelerin tüm işlerinin tamamlanma süresini enazlamak.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
When it is worthwhile to work with the stochastic RCPSP - F. Ballestin	Journal of Scheduling, vol.10, s.153-166	2007		Belirsizlik altında proje çizelgeleme problemi incelenmiş ve geliştirilen çözüm yöntemleri raporlanmıştır.		X		X	X		
Research on Multi-project Scheduling Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm - Z. Man, T. Wei, L. Xiang, K. Lishan	International Conference on Computer Science and Software Engineering	2008	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problem.	Proje işlerinin tamamlanma süresini enazlamak.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Heuristic Method for Multi Project Finance Based Scheduling - A. Elazouni	Taylor & Francis Construction Management and Economics 27, 199–211	2008	Nakit kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Sezgisel kullanılarak tercih edilebilir faaliyetler bulunur ve olabilecek kombinasyonlar belirlenir. Kullanılabilir nakit miktarı belirlenir. Son olarak sezgisel mevcut dönemdeki en iyi kombinasyonu seçer.	X	X		X	X		
A Genetic Algorithm for the Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem - J.F. Gonçaves, J.J.M. Mendes, M.G.C. Resende	ScienceDirect - European Journal of Operational Research 189 1171–1190	2008	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi	Üç kriterin birleşimi: Gecikme, erken olma, akış zamanının toplam ağırlığının enazlanması.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling - P.H. Chen, H. Weng	Automation in Construction, vol.18, s.485-498	2009	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Zaman-maliyet eniyilemesi	X
A Heuristic Solution Framework for the Resource Constrained (Multi-)Project Scheduling Problem with Sequence-dependent Transfer Times - D. Krüger, A. Scholl	ScienceDirect - European Journal of Operational Research 197 492-508	2009	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi	Amaç, tekli proje yaklaşımı için çoklu proje süresini ya da çoklu proje yaklaşımı için ortalama proje süresini enazlamaktır.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Hybrid of Genetic Algorithm And Simulated Annealing For Multiple Project Scheduling with Multiple Resource Constraints - P. Chen, S.M. Shahandashti	ScienceDirect - International Journal of Project Management 32 166-177	2009	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	İşlerin en uzun tamamlanma süresini enazlamak.	X	X		X	X		
Kaynak Kısıtlı Çoklu Proje Programlama Problemi için Tavlama Benzetimi Algoritması - T. Y. Ayan	Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, Cilt: 23, Sayı: 2	2009	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Proje gecikmeleri ve faaliyet beklmelerinden kaynaklanan maliyetler toplamını enazlamaktır.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayınlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Investigating the effectiveness of certain priority rules on resource scheduling of housing estate projects - R. Kanit, M. Gündüz, O. Ozkan	Journal of Construction Engineering and Management, vol.135, no.7, s.609-613	2009	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Proje süresini enazlamak.	X	X		X	X		
Ant Colony Optimization for Resource-Constrained Multi-Project Scheduling - J.C Zhao, Y.M Zhang, H.Y Qu, H. Qi	IEEE - 978-1-4244-3894	2009	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Projelerin tüm işlerinin tamamlanma süresini enazlamak.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling - W. Chen, Y. Shi, H. Teng, X. Lan, L. Hu	Information Sciences, vol.180, s.1031-1039	2010	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işleri bitirme süresini enazlamak	X	X		X	X		
Resource-constrained Multi-project Scheduling Priority Rule Performance Revisited - T. R. Browning, A. A. Yassine	ScienceDirect - Int. J. Production Economics 126 212–228	2010	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Proje ve portfölye gecikmesi olarak iki farklı amaç fonksiyonunu enazlamak.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Managing and Modelling General Resource Transfers in (Multi-)Project Scheduling - D. Krüger, A. Scholl	Springer - OR Spectrum 32:369–394	2010	Transfer zamanlı, kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Çok projeli çizelgeleme problemlerinde toplam maliyeti enazlamak.	X	X		X	X		
A Hybrid Genetic Algorithm for Resource-constrained Multi-project Scheduling Problem with Resource Transfer Time - Z. Cai, X. Li	IEEE - International Conf. on Automation Science and Engineering	2012	Kaynak kısıtlı kaynak transfer süreli çok projeli çizelgeleme problemi.	Ortalama proje gecikmesini enazlamak.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Resource Dedication Problem in a Multi-project Environment - U. Beşikçi, U. Bilge, G. Ulusoy	Springer - Science + Business Media - Flex Serv Manuf J 25:206–229	2013	Çok modlu kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Toplam ağırlıklı gecikmenin enazlanması ve kaynakların eniyi şekilde projelere tahsis edilmesi.	X		X	X		X	
An improved particle swarm optimization for the resource-constrained project scheduling problem - Q. Jia, Y. Seo	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.67, no.9-12, s.2627-2638	2013	Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi	Tüm işleri bitirme süresini enazlamak	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Resource-constraint Multi-project Scheduling with Priorities and Uncertain Activity Durations - Z. Zheng, L. Shumin, G. Ze, Z. Yueni	Taylor & Francis - International Journal of Computational Intelligence Systems, Vol. 6, No. 3, 530-547	2013	Belirsiz faaliyet süreli, kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Tüm işleri tamamlama süresini ve dayanıklılık ölçütünü eş zamanlı en azlamak.		X		X	X		
A combination of different resource management policies in a multi-project environment - U. Beşikçi, G. Ulusoy, U. Bilge	Proceedings of the 5 th IESM Conference, Rabat, Morocco	2013	Üç farklı kaynak yönetim politikası kullanılmıştır ve genel bir bütçe bulunmaktadır. Çoklu proje ortamı bütünlük olarak modellenmiştir.	Projelerin toplam ağırlıklı gecikmesini enazlamaktır.	X		X	X	X	X	X

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						The Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem - T. Wauters, J. Kinable, P. Smet, W. Vancroonenburg, G. V. Berghe, J. Verstichel	Springer - Science + Business Media	2013	Çok modlu kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Projelerin tüm işlerinin tamamlanma süresini, toplam proje gecikmesini enazlamak. Toplam proje gecikmesi asıl amaç iken projelerin tüm işlerinin tamamlanma zamanı eşitlik bozucu durumundadır.	X
Resource Constrained Multi-project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process - A. Singh	ScienceDirect - Procedia Engineering 69 725 – 734	2014	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Projelerin tüm işlerinin tamamlanma süresi ve maliyet sapması performans kriterleri eniyilemek.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Critical Chain and Evidence Reasoning Applied to Multi-project Resource Schedule in Automobile R&D Process - S. Yang, L. Fu	ScienceDirect - International Journal of Project Maagement 32 166-177	2014	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi	Toplam proje zamanını enazlamak.	X	X		X	X		
Multi-project Scheduling With Two-Stage Decomposition - A. Can, G. Ulusoy	Springer Science+Business Media- Ann Oper Res (2014) 217:95-116	2014	Çok modlu kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	İlk evrede, projelerin başlama zamanları ve ilgili nakit akışının net cari değerinin enazlandığı kaynak atamaları belirlenir. İlk evredeki sonuçlara dayalı olarak bireysel projelerin tüm işlerinin bitme süresini enazlamak ikinci evrede yapılır.	X		X	X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
						Multi-mode Resource Constrained Multi-project Scheduling and Resource Portfolio Problem - U. Beşikçi, Ü. Bilge, G. Ulusoy	ScienceDirect - European Journal of Operational Research 240 22-31	2014	Çok modlu kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi.	Projelerin toplam ağırlıklı gecikmesini enazlamaktır.	X
Taking Advantage of Solving the Resource Constrained Multi-project Scheduling Problems Using Multi-modal Genetic Algorithms - E. Pérez, M. Posada, A. Lorenzana	Springer - Soft Comput 10.1007/s00500-015-1610	2015	Kaynak kısıtlı çok projeli çizelgeleme problemi	Tüm işlerin tamamlanma süresi ve ortalama gecikme yüzdesi şeklinde iki tane zaman bazlı amaç fonksiyonu.	X	X		X	X		

Makalenin İsmi ve Yazarı	Yayımlanan Dergi İsmi	Basım Yılı	Problem	Amaç	Belirlilik Altında Çalışma	Mod Kullanımı		Kısıtlı Kaynak	Kaynak Yönetim Politikası		
						Tek	Çok		KP	KT	KTR
Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming - H. Li, N.K. Womer	European Journal of Operations Research, vol.246, s.20-33	2015	Kaynak kısıtlı, faaliyet süreleri belirsiz proje çizelgeleme problemi	Beklenen tüm işleri bitirme süresini enazlamak		X		X	X		