

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatmanur SAĞMEN

**SÜRELİ SABİT KAYNAKLARA SAHİP BİR KAYNAK KISITLI
PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN MODELLEMESİ VE
UYGULAMASI**

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ADANA, 2022

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRELİ SABİT KAYNAKLARA SAHİP BİR KAYNAK KISITLI PROJE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN MODELLEMESİ VE UYGULAMASI

Fatmanur SAĞMEN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Rızvan EROL
Yıl: 2022, Sayfa: 76
Jüri : Prof. Dr. Rızvan EROL
: Doç Dr. Yusuf KUVVETLİ
: Doç. DR. Mustafa GÖKÇE

Bu çalışmada sabit kaynaklı bir kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Öncelikle, proje içinde yer alan faaliyetler, süreleri ve öncüllük ilişkileri belirlenmiştir. Problem karma tam sayılı matematiksel programlama modeli ile modellenmiştir ve çoklu proje kaynakları modele dahil edilmiştir. Bu çalışma ile birlikte sabit kaynak kullanılan ve dönemsel finansal kısıtı bulunan KKPC problemleri için optimizasyon modeli oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmaya ait senaryo analizleri ve bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, çoklu kaynak ve sabit kaynak kullanılan KKPC problemleri için süre - maliyet optimizasyonu yapan bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin gerçek proje uygulaması ve senaryo analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde sabit kaynak kullanılan gerçek proje uygulamalarında, proje süresi ve proje maliyeti optimizasyonu için kullanılabilecek bir model ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi, MIP, Sabit Kaynak, Aylık Finansal Kısıt

ABSTRACT

MASTER THESIS

MODELING AND IMPLEMENTATION OF A RESOURCE LIMITED PROJECT SCHEDULE PROBLEM WITH TIME FIXED RESOURCES

Fatmanur SAĞMEN

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

Supervisor : Prof. Dr. Rızvan EROL
Year: 2022, Page: 76
Jury : Prof. Dr. Rızvan EROL
: Assoc. Prof. Dr. Yusuf KUVVETLİ
: Assoc. Prof. Dr. Mustafa GÖKÇE

In this study, a fixed resource resource constrained project scheduling problem is discussed. First of all, the activities in the project, their duration and predecessor relations were determined. The problem is modeled with a mixed integer mathematical programming model and multiple project resources are included in the model. With this study, it is aimed to create an optimization model for CRPS problems that use fixed resources and have periodic financial constraints. Scenario analyzes of the study and an application were carried out. In this way, a time-cost optimization model has been created for CRPS problems using multiple sources and fixed sources. Real project application and scenario analyzes of the created model were made. As a result of the results obtained, a model that can be used for project duration and project cost optimization in real project applications using fixed resources has been presented.

Key Words: Resource Constrained Project Scheduling Problem, MIP, Fixed Resource, Monthly Financial Constraint

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Günümüz ekonomik koşullarında artan rekabet ve mali kaygılar ile birlikte projelerin yönetimi daha da önem kazanmıştır. Ürünü son kullanıcıya doğru zamanda ve uygun fiyata sunmak rekabet ortamında üstünlük sağlamanın şartı haline gelmiştir. Rekabet ortamında üstünlük sağlamak için yıllardır çalışmalar yapılmakta ve planlama, çizelgeleme ve proje yönetimi gibi kavramlar üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Proje çizelgeleme problemleri yıllardır üzerinde çalışmalar yapılan problemlerin başında gelmektedir. İlk olarak 1950’li yıllarda başlamış ve gelişen teknoloji, artan rekabet ortamı vb. parametrelere bağlı olarak proje büyüklük ölçeğinin de artmasıyla yönetimi daha da zor hale gelmiştir. İlk olarak CPM ve PERT gibi teknikler kullanılmaya başlanmıştır. Yıllar içerisinde kesin yöntemler ve sezgisel yöntemler problemlerin çözümü için kullanılmıştır.

Proje yönetimi, belirsizliklerin devam ettiği günümüzde, halen çalışmalara konu olan ve üzerinde yöntemler geliştirilen alanlardan bir tanesidir. Kullanılan kaynak türleri, proje yönetiminin amacı, proje yönetiminin uygulandığı projeler zaman içerisinde çalışmaları alt başlıklara ayırarak spesifik çalışma alanları oluşturmuştur.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme (KKPÇ), proje yönetimi alanında sıklıkla ele alınan problemlerden bir tanesidir. KKPÇ, “kaynakların kısıtlı olduğu durumlarda, öncüllük ilişkisi içinde, amaç fonksiyonunu optimize etmek” olarak tanımlanabilir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde KKPÇ alanında yapılan çalışmalar, kaynak türleri bakımından çoğunlukla yenilenebilen, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklar üzerinde yapılmıştır. Amaç fonksiyonu bakımından incelendiğinde proje süresini minimize eden, toplam proje maliyetini minimize eden, kaynakları optimize eden ve proje süresi ile toplam proje maliyetini optimize eden çalışmalar sıklıkla görülmektedir. Faaliyet

karakteristikleri açısından projelerin öncüllük ilişkisi içinde veya çok modlu olması da çalışmalarda yer almaktadır.

Kaynakların kısıtlı olması, kaynakların proje boyunca verimli şekilde kullanılmasını gerektirir. Kaynaklar faaliyetlerin gerçekleşmesi için gereken temel materyallerdir. Kaynaklar, zamana göre; yenilenebilen, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklar olarak ele alınabilir. Yenilenebilen kaynaklar belirli bir zaman diliminde kullanımı kısıtlı olmakla birlikte kullanıldıkça tükenmeyen ve bir sonraki faaliyette yeniden kullanılabilen kaynaklardır. İşçilik yenilenebilen kaynak türüne örnek verilebilir.

Belirli bir faaliyette kullanıldıktan sonra tükenen ve yeniden kullanılamayan kaynaklar yenilenemeyen kaynaklar olarak adlandırılır. Kullanım sırasında tükenirler. Proje süresince kullanımı sınırlıdır. Beton, demir, plastik, kumaş vb. hammadde türleri yenilenemez kaynaklara örnek gösterilebilir. Hem zaman içinde hem de proje süresince toplam tüketimi kısıtlı olan kaynak türleri çift kısıtlı kaynak olarak adlandırılır. Para çift kısıtlı kaynaklara örnek gösterilebilir.

Bunlar haricinde, kaynaklar bölünebilirliğine göre de sınıflandırılabilir. Tane olarak ifade edilebilen kaynaklar ayırık kaynak olarak adlandırılır. İş makinaları buna örnek verilebilir. Buna karşın elektrik, su gibi bölünemeyen kaynaklara da sürekli kaynaklar olarak adlandırılır.

Yapılan çalışmalar için geliştirilen farklı çözüm yöntemleri mevcuttur. Çalışmalarda ele alınan problemin büyüklüğüne göre kesin yöntemleri ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. KKPC problemleri *np-hard* olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle kesin çözüm yöntemleri belirli büyüklükteki problemler için kullanılabilir. Kesin çözüm yöntemlerinin ilki olarak ikili tam sayı programlama yöntemleri üzerinde durulmuştur. Birçok çalışmada dal-sınır algoritmaları kullanılmıştır. Kesin çözüm yöntemlerinin yetersiz kaldığı daha büyük projelerde ise sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Sezgisel yöntemlerden elde

edilen sonuçlar, kesin yöntemlerden elde edilen sonuçlara göre alt ve üst sınır vermektedir.

Sezgisel çözüm yöntemlerinden ilki öncelik kuralına dayalı çözüm türeten sezgisel yöntemlerdir. Bu sayede proje çizelgesi oluşturulur. MSLK, LFT, LST öncelik kuralına dayalı çözüm türeten sezgisel yöntemlere örnek verilebilir. Çizelge oluşturulurken iki yöntem mevcuttur, bunlar paralel veya seri çizelgelemedir.

Bir diğer sezgisel yöntem ise meta-sezgisel yöntemlerdir. İlk yapılan çalışmalarda genetik algoritmalar, tavlama benzetimi yöntemi ve tabu arama yöntemi sıklıkla kullanılmıştır. Yıllar içinde yapılan çalışmalarda bu yöntemlere birçok yeni meta-sezgisel yöntem eklenmiştir. Karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, yapay arı kolonisi optimizasyonu ve benzetim tavlama optimizasyonu bunlara örnek verilebilir. Meta-sezgisel yöntemler birbirinden farklı alt yöntemlerden oluşsa da temelinde en iyi çözüm kümesi için doğru sonuç aralığı bulma temeline dayanmaktadır.

KKPÇ problemleri literatürde uzun yıllardır çalışmalar yapılan konulardan bir tanesidir. Bu çalışmada literatürde yer alan kaynaklar ve onlar haricinde yer alan, belirli bir dönemde kullanım gereksinimi duyulan ve gereksinim ortadan kalktığında kullanımına son verilen ve çalışma boyunca “sabit kaynak” olarak adlandırılacak kaynak türleri yöntem geliştirilmiştir. Proje süresi ve toplam proje maliyetini optimize etmek amaçlanmıştır.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca değerli katkıları, desteği ve iyileştirici önerileri ile her daim yol gösterici olan sevgili danışman hocam Prof. Dr. Rızvan Erol'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezime katkılarından ve daha iyi olması için desteğinden dolayı jüri hocam Doç. Dr. Yusuf Kuvvetli'ye ve değerli yorumları için jüri hocam Doç. Dr. Mustafa Göçken'e, teşekkür ederim.

Çalışma sürem boyunca bilgisini, önerilerini ve manevi desteğini benden esirgemeyen Öğretim Görevlisi Adem Erik'e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca beni destekleyen, maddi ve manevi her konuda yanımda olan sevgili anne ve babama sevgi, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Proje Yönetimi.....	1
1.2. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme	2
1.3. Problem Tanımı	4
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	5
1.5. Çalışma Adımları.....	6
1.6. Özgün Katkıları	7
1.7. Tezin Organizasyonu	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Materyal.....	19
3.2. Metot.....	20
3.2.1. Problemin Formülasyonu	20
3.2.1.1. Problem Karakteristikleri	20
3.2.1.2. Varsayımlar	21
3.2.1.3. Değişkenler ve Parametreler	21
3.2.1.4. Performans Değişkenleri	23
3.2.2. Matematik Programlama Modeli	23
3.2.2.1. Notasyon.....	24
3.2.2.2. Matematiksel Model	26

3.2.3. Çözüm Yönteminin Belirlenmesi	29
3.2.4. Senaryoların Tasarım.....	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	31
4.1. Örnek Uygulama.....	31
4.2. Model Karmaşıklığının İncelenmesi.....	34
4.3. Model Çözümlerinin İncelenmesi.....	36
4.4. Vaka Uygulaması	37
4.5. Senaryo Analizleri	47
4.5.1. Sabit Kaynak Kullanımı	48
4.5.2. Aylık Finansal Kısıt	49
4.5.3. Kaynak Türüne Göre Kullanımı.....	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
5.1. Çalışmanın Özeti	55
5.2. Sonuç	56
KAYNAKÇA.....	59
EKLER.....	63
Ek 1: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 1 – 14 Faaliyet 4 Kaynak.....	65
Ek 2: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 2 – 20 Faaliyet 4 Kaynak.....	66
Ek 3: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 3 – 30 Faaliyet 4 Kaynak.....	67
Ek 4: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 4 – 35 Faaliyet 4 Kaynak.....	68
Ek 5: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 5 – 50 Faaliyet 4 Kaynak.....	69
Ek 6: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 6 – 14 Faaliyet 7 Kaynak.....	71
Ek 7: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 7 – 20 Faaliyet 7 Kaynak.....	72
Ek 8: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 8 – 30 Faaliyet 7 Kaynak.....	73
Ek 9: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 9 – 35 Faaliyet 7 Kaynak.....	74
Ek 10: Senaryoların Tasarımı Çizelgesi 10 – 50 Faaliyet 7 Kaynak.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 3.1. Senaryoların Tasarımı Tablosu	29
Çizelge 4.1. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti	31
Çizelge 4.2. Çözüm İncelemesi	35
Çizelge 4.3. Projeyi Oluşturan Faaliyetler , Süreleri ve Öncüllük İlişkileri	38
Çizelge 4.4. Projeyi Oluşturan Faaliyetler ve Kaynak Dağılımı	40
Çizelge 4.5. Birim Maliyetler	41
Çizelge 4.6. Proje Süresi ve Maliyeti.....	42
Çizelge 4.7. Projeye Ait Kritik Yollar	44
Çizelge 4.8. Problemin Çözüm Karşılaştırması	47
Çizelge 4.9. Sabit Kaynak - Alternatif Sabit Kaynak Kullanımı	48
Çizelge 4.10. Sınırsız Alternatif Sabit Kaynak Olması Durumunda Sabit Kaynak ve Alternatif Sabit Kaynak Kullanımı	49
Çizelge 4.11. Aylık Finansal Kısıt Senaryo Analizleri	50
Çizelge 4.12. Yenilenemeyen Kaynaklı KKPC Problemi Sonuçları	51
Çizelge 4.13. Yenilenebilir Kaynaklı KKPC Problemi Sonuçları	53



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 4.1. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti Kaynak Dağılım Grafiği	33
Şekil 4.2. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti Kaynak Dağılım Grafiği	33
Şekil 4.3. Gantt Şeması	43
Şekil 4.4. Toplam Yenilenemeyen Kaynak Kullanımı	45
Şekil 4.5. Toplam Nakit Akışı	45
Şekil 4.6. Toplam Yenilenebilen Kaynak Kullanım Grafiği	46
Şekil 4.7. Yenilenemeyen Kaynak Kullanımı	51
Şekil 4.8. Aylık Nakit Akışı Grafiği	52
Şekil 4.9. Aylık Yenilenebilen Kaynak Kullanımı	53

1. GİRİŞ

Rekabetin küresel boyutlara ulaştığı günümüzde, şirketler dinamiklerin her an değişebileceği bir ortamda faaliyet göstermektedir. Şirketlerin bu ortamda ayakta kalmaları ve kendilerini kanıtlamaları giderek zorlaşmaktadır. Dolayısıyla dinamik ortamlardaki firmaların maliyetlerini düşürmeleri, kalite ve verimliliği artırmaları yeterli olmayacaktır. Aynı zamanda ekonomik dalgalanmalara ve çevresel faktörlere de ayak uydurmak zorundadırlar. Çevresel faktörlerin kaynağı sosyo-politik, pazar, teknolojik ve lojistik yönlerinde olabilir.

Değişen dinamiklerin içinde faaliyetlerini sürdüren işletme türlerinden biri olan proje tipi üretim yapan işletmeler için proje yönetimi konusu önem taşımaktadır. İşletmelerin değişen koşullara nasıl tepki vereceği ve bunun zamanını doğru belirlemesi proje yönetiminin gerekliliğini beraberinde getirmektedir.

1.1. Proje Yönetimi

Proje “Zaman, maliyet ve kaynak kısıtlamaları da dahil olmak üzere belirli gereksinimlere uyan bir hedefe ulaşmak için üstlenilen, başlangıç ve bitiş tarihleri olan bir dizi koordineli ve kontrollü faaliyetten oluşan benzersiz bir süreç.” olarak tanımlanmıştır. Proje yönetim problemleri ele alınırken, genel olarak iş senaryosunun bir parçası olarak tanımlanan ve proje özetinde belirtilen bu hedefler, üç temel kriteri karşılamalıdır:

1. Proje zamanında tamamlanmalıdır;
2. Proje bütçelenen maliyet dahilinde tamamlanmalıdır; ve
3. Proje, öngörülen kalite gereksinimlerini karşılamalıdır. (Lester, 1991)

Bir projede olması gereken başlıca özellikler ise aşağıdaki gibidir (Levine, 2002);

- Belirlenen amaçlara ulaşmak için sınırlı bir süre içinde gerçekleştirilmesi öngörülen bir grup görev bulunur.
- Büyük çoğunlukla tek seferlik bir iştir.
- Belirli bir başlangıç ve bitiş zamanı ile bir yaşam döngüsüne sahiptir.
- Tamamı tanımlanmış ve düzenlenmiş görevlerin bulunduğu bir iştir.
- Belirlenmiş bir bütçesi vardır.
- Birden fazla kaynak kullanımını gerektirmesi olasıdır. Bu kaynakların çoğu kıt olabilir ve başkalarıyla paylaşılması gerekebilir.
- İşe özel bir ekibin kurulmasını veya geleneksel ekiplerin sınırlarının aşılmasını gerektirebilir.

Proje yönetimi, belirli bir amaca ulaşmak üzere bir araya getirilen maddi ve beşeri kaynakların faaliyetlerini planlama, yürütme, düzenleme ve denetleme fonksiyonları topluluğudur. (Halaç, 1983).

Proje yönetimi, projenin gerçekleştirilmesi için lüzumlu planlama, kontrol, süper vizyon, mühendislik, inşaat veya imalat gibi faaliyetleri kapsayan sevk ve yönetim faaliyetidir. Proje yönetimi, projenin zamanında ve belirtilen masraflar dahilinde gerekli performans ve standartlara uygun olarak tamamlanabilmesi için gerekli faaliyetlerden meydana gelir. Yönetimden gaye tespit edilmiş hedeflere mevcut teşkilat vasıtasıyla ulaşmaktır (Barutçugil, 1998).

1.2. Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme

Proje yönetimi uzun yıllardır çalışmalara konu olan bir alandır. Kaynakların kısıtlı olması belirli parametreler dahilinde sınırlı zaman ve bütçe içerisinde projelerin tamamlanması çalışmalarda büyük yer kaplamaktadır. Zaman içerisinde proje gereksinimlerini karşılamak ve proje yönetimine ait alt problemlere çözüm üretmek için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunların başında kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri gelmektedir.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (KKPÇP), kısıtlı kaynaklar kullanılarak bir projeyi oluşturan faaliyetlerin, öncüllük ilişkilerini ihlal etmeden amaç işlevini eniyileyecek biçimde çizelgelenmesidir. Projenin tamamlanma zamanını minimize etmeye yönelik problemler literatürde en çok çalışılan problemlerdir. Problemin tanımına esas teşkil eden varsayımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Ulusoy, 2000):

- Faaliyet süreleri deterministiktir.
- Faaliyetlerin birim zaman kaynak kullanımı sabittir.
- Bir faaliyete tahsis edilen kaynak faaliyet süresince o faaliyet tarafından kullanılır.
- Faaliyetler arasında öncelik ilişkileri vardır.
- Başlatılan faaliyetler ara verilmeden bitirilmek zorundadır, kesintiye izin yoktur.
- Faaliyetler iptal edilemez. Projenin her faaliyeti gerçekleştirilmek zorundadır.

Literatürde KKPÇP'ye ait proje süresini minimize etmek, toplam proje maliyetlerini minimize etmek, karlılığı maksimize etmek gibi farklı amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Proje süresini minimize eden çalışmalara bakıldığında teoride KKPÇP problemi çözülmüş olsa da proje yönetiminden maliyetleri de minimize etmesi beklenir. Zaman içinde çalışmalar proje maliyetini minimize etme üzerinde yoğunlaşmıştır. Maliyeti minimize eden çalışmalar incelendiğinde proje maliyetini en aza indirme ve proje karını maksimize etme üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Proje yönetimi uygulamalarında ise hem süreyi hem de maliyeti minimize ederek proje net karının en fazla olması hedeflenmektedir.

Proje çizelgeleme problemlerine kaynaklar açısından yaklaşıldığında kaynakların yenilenebilen kaynaklar, yenilenemeyen kaynaklar ve çift yönden

kısıtlı kaynaklar olarak üç grupta incelendiği görülmektedir. Yenilenebilen kaynaklar proje süresi boyunca var olurlar. Yenilenebilir kaynağa işçilik örneği verilebilir. Hammadde, proje bütçesi gibi sınırı olan kaynaklar yenilenemeyen kaynaklara örnek gösterilebilir. Çift kısıtlı kaynaklar ise kısıtların projenin amacı doğrultusunda gerçek hayat problemlerine benzer hale getirilmesi için tanımlanan kaynaklardır. Nakit akışı çift yönden kısıtlı kaynaklara örnek gösterilebilir. Kaynaklar aynı zamanda bölünebilir ve bölünemez olmasına göre de iki gruba ayrılır. Kaynak adet olarak ifade edilebildiği durumlarda bölünebilir (ayrık) kaynak, adet olarak ifade edilemediği durumlarda bölünemeyen (sürekli) kaynak olarak adlandırılmaktadır. Örneğin iki adet iş makinası bölünebilir kaynak iken enerji bölünemeyen kaynak olarak ifade edilir.

1.3. Problem Tanımı

Bu çalışmada ele alınan problem kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi (KKPÇ) problemi başlığında sabit kaynak kullanımında proje süresi ve toplam proje maliyetinin optimize edilmesi problemidir.

Projeler literatürde yer alan kaynak türleri haricinde de kaynaklara gereksinim duyabilirler. Belirli bir zamanda projeye dahil edilen, ihtiyaç kalmadığında kullanımı sona erdirilen sabit kaynaklar bu kaynaklardan bir tanesidir. Örneğin kule vinç, inşaat projeleri için belirli bir dönemde gereksinim duyulan, ardından gereksinimin ortadan kalktığı sabit bir kaynaktır. Yerine farklı maliyetlerde alternatif kaynaklar da kullanılabilir. Görüldüğü üzere kaynak kısıtlı proje çizelgelemesi problemleri projenin amacı, kullanılan kaynakların durumu ve projeyi oluşturan faaliyetlerin gerçekleşme sırası gibi birçok alt problemi de içinde barındırmaktadır. Bu çalışmada sabit kaynak türüne sahip KKPÇ problemleri için proje süresi ve toplam proje maliyetini optimize eden bir model geliştirilmiştir.

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Proje yönetimi yaklaşımlarından istenilen sonuçları elde edebilmek için zaman ve maliyet belirsizliklerinin yönetilmesi ve projeye ait süre ve maliyet hedeflerinin yakalanması gerekmektedir. Bu çalışmada veriler tamamlanan bir projeden alındığı için süre ve maliyet belirsizliği bulunmamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar genellikle yenilenebilir, yenilenemez veya çift kısıtlı kaynaklar üzerinde yoğunlaşmıştır. Fakat projeler farklı kaynak türlerine de ihtiyaç duyabilir. Bir yazılım paketi, kule vinç vb. belirli dönemde ihtiyaç duyulan, sonra ihtiyacı ortadan kalkan sabit kaynakların çizelgelenmesi proje maliyetini etkileyen faktörlerden biridir. Bu çalışmada sabit kaynak, yenilenebilir kaynaklar ve yenilenemeyen kaynaklar kullanılan projeler için toplam proje süresi ve maliyetinin optimize edilmesi için matematiksel modelinin oluşturulması ve matematiksel modele uygun çözüm yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada finansal kısıt da bulunmaktadır. Proje süresini minimize ederken kaynakların fazla kullanılması toplam proje maliyetini artıracaktır. Aynı zamanda firmaların projeler için dönemsel bazda finansal kaynaklarını kısıtlandırmaları gerekebilir. Bu sebeple bu çalışmada aylık finansal kısıta da yer verilmiştir.

Çalışmadaki KKPC problemi karma tam sayılı matematiksel programlama modeli yöntemi ile modellenmiştir. Modelin amaç fonksiyonunda proje süresi ve toplam proje maliyeti optimize edilmektedir. Modelde çoklu kaynak durumu bulunmaktadır. Kaynaklar yenilenemez, yenilenebilir ve sabit kaynaklardır. Modelleme yapılırken enflasyon ortamının birim maliyetleri etkilemediği varsayılmıştır.

Modelin çözümü için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kesin çözüm yöntemleri, sezgiseller ve diğer yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Ele alınan problemin yapısı itibari ile kesin çözüm yöntemi bu problem için yeterli olmuştur. Matematiksel modelin çözümü için GAMS programı kullanılmıştır.

GAMS ile doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tamsayı optimizasyon problemlerinin çözümü yapılabilmektedir.

1.5. Çalışma Adımları

Ele alınan çalışma sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır;

1. Ele alınan problem tanımlanmıştır. Problem endüstri mühendisliğinin çalışma alanlarından birisi olan kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemidir. Bu problem kapsamında sabit ve yenilenemez kaynak kullanılan projelerin çizelgelenmesi ve maliyet minimizasyonu amaçlanmaktadır.
2. Belirlenen problem ile ilgili önceki çalışmalar incelenmiştir. Önceki çalışmalarda çalışmaların ilk olarak 1950’li yıllarda proje yönetimi alanında başladığı görülmüştür. Daha sonra KKPC problemleri içinde zamanı minimize etmeyle devam eden çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda farklı yöntemler kullanılarak maliyet minimizasyonu, süre/maliyet optimizasyonu amaçlayan çalışmalar yoğunluk göstermiştir.
3. Ele alınan problem için materyal toplaması yapılmıştır. Çalışmada kullanılacak materyal PSPBLIP model kütüphanesine ait veri setleri ve bir inşaat projesine ait gerçek verilerdir.
4. Ele alınan probleme ait matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel modelde yenilenemez kaynaklar için kaynak kısıtları, faaliyet sürelerine ait kısıtlar, aylık finansal kısıt, faaliyetler arası öncüllük kısıtları bulunmaktadır. Sabit kaynakların kullanımı da modelde yer almaktadır. Modelde süre ve maliyet optimizasyonu amaçlanmıştır.

5. PSPBLIP kütüphanesinden örnek veri seti ile model performansı test edilmiştir. Örnek veri seti 4 kaynaklı j30 veri setleridir.
6. Performansı test edilen model için belirli büyüklükteki projeler için karmaşıklık incelenmiştir. Karmaşıklığın incelendiği proje verileri bir inşaat projesine ait verilerdir. Bu adımda oluşturulan modelin hangi büyüklükteki projeler için optimal sonuç verdiği sonucu elde edilmek istenmiştir.
7. Farklı senaryolar için analizler yapılmıştır. Senaryo analizlerinde kaynak türlerine, kaynak kapasitesine ve faaliyet süresine göre senaryolar değerlendirilmiştir. Bu adımda toplam proje maliyetini ve proje süresini etkileyen faktörler belirlenmek istenmiştir.
8. 35 faaliyetten oluşan, 8 kaynak kullanılan bir inşaat projesine ait veriler kullanarak proje uygulaması gerçekleştirilmiştir.
9. Son olarak, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir ve gelecek çalışmalar için öneride bulunulmuştur.

1.6. Özgün Katkıları

Ele alınan problem literatürde yer alan “Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgelemesi (KKPÇ) Problemi” olarak tanımlanmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda sıklıkla yenilenebilir, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynaklar kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde belirtilen kaynaklar dışında sabit olarak kullanılan kaynakların var olduğu durumlarda problem çözümüne odaklanılmıştır. Yenilenebilir kaynakların bir zaman birimi içindeki toplam kullanım miktarı kısıtlı olmakla birlikte kullanım ile tüketilmezler. Belirli bir faaliyet çerçevesinde kullanıldıktan sonra faaliyet sona erince tekrar kullanıma hazır duruma gelirler (Ulusoy, 2000). Fakat sabit kaynaklar belirli dönemlerde kullanılan ve ardından ihtiyaç duyulmayan yenilenebilir kaynak türüdür. Bu nedenle farklı bir kaynak türü olarak ele alınmıştır.

Ayrıca dönemsel bazda finansal kısıt olması da problemi literatürdeki çalışmalardan ayırmaktadır. Proje maliyetini minimize etme problemlerinde çalışmalar toplam maliyetler üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat proje yönetimi uygulamalarında toplam proje maliyetini azaltmak için kaynakların hepsini kullanmak mümkün olmayacaktır. Dönemsel bazda koyulan finansal kısıtlar projenin optimum süre ve maliyette gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kaynak türleri ve amaç fonksiyonlu ayrı ayrı çalışmalara konu olurken bu çalışmada tüm kaynak türleri bir arada ele alınmış, amaç fonksiyonunda hem proje süresi hem de proje maliyeti optimize edilmek istenmiştir. Bu da çalışmanın bir diğer özgün yönüdür.

1.7. Tezin Organizasyonu

Yapılan tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. İlk olarak giriş bölümünde tezde ele alınan problem, çalışmanın amacı ve kapsamı bilgilerine yer verilmiştir. Ardından ikinci bölümde literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, üçüncü bölümde yapılan çalışma için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde toplanan materyalden elde edilen bulgular tespit edilmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışmanın sonuçları anlatılmıştır.

Birinci bölümde, yapılan çalışma ve tezin içeriği ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu tez çalışmasında ele alınan problemin tanımlanması, problemin neden ele alındığı, problem hakkında varsayımlar ve tez ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Ele alınan problem sabit, yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklı projelerde süre ve maliyet optimizasyonunun sağlanmasıdır.

İkinci bölümde, literatürde yer alan önceki çalışmalara değinilmiştir. Yapılan literatür taraması proje yönetimi ve kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemlerinin zaman içerisindeki gelişimi ve ele alınan çalışma ile ilgili geçmiş

bilgilere yer vermektedir. Ayrıca bu bölümde yapılan çalışmanın literatürdeki yeri tespit edilmek istenmiştir.

Üçüncü bölümde, ilk olarak materyal kısmında ele alınan problem ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Ardından metot kısmında problemin formülasyonu ve modellenmesi yapılmış, çözüm için kullanılan metotlar ve çözüm ortamları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, yapılan çalışma sonucundan elde edilen bulgular anlatılmıştır. PSPLIB kütüphanesine ait veri seti uygulamasının anlatılmasından sonra, hesaplama karmaşıklığı, senaryo analizlerinden elde edilen sonuçlar ve gerçek proje uygulamasından elde edilen sonuçlar anlatılmıştır.

Son bölümde ise yapılan çalışma özetlenmiş ve elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde endüstri mühendisliği alanında yapılan çalışmalar incelenmiş ve ele alınan problem ile ilgili daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Seri üretim, atölye tipi üretim vb. üretim yöntemleri dışında kalan, tek bir döngüden oluşan proje tiplerinde, bir ürünün elde edilmesi uzun sürede ve yüksek maliyette gerçekleştiği için, verimlilik ihtiyacı proje yönetim kavramını ortaya çıkarmıştır. Proje yönetiminin amacı, kaynak kullanımını optimize ederek hedeflere uygun çıktıların oluşturulması ve bunun sonucunda süre ve maliyet optimizasyonunu sağlamaktır.

Esas olarak 2.dünya savaşıdan sonra ortaya çıkan proje yönetimi kavramı gereksinimler doğrultusunda üzerinde bir çok çalışmaya konu olmuştur. İlk olarak CPM ve PERT gibi ağ teknikleri geliştirilmiştir. Yapılan literatür çalışmasında 1950-1960 yılları arasında proje yönetimi üzerinde bir çok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu yıllardan sonra teknik yaklaşımlar ve konuların çeşitliliği karmaşıklaşmıştır. (Özsü, 1986)

Proje yönetimi ile ilgili ilk bilimsel çalışma 1900'li yılların başında Frederick Taylor (1856-1915) tarafından gerçekleştirilmiştir. İş süreçlerini analiz ederek iş planlamasını daha verimli hale getirmiştir. Henry L. Gantt (1917), CPM ve PERT'in temelini oluşturan Gantt çizelgesi geliştirmiştir. Gantt çizelgesi projelerde süre planlamasını sağlamaya yönelik oluşturulmuş bir diyagramdır. Projelerin tamamlanma zamanlarını dikkate alan CPM 1957 yılında Morgan Walker ve James Kelly tarafından bulunmuştur. PERT 1958 yılında Booz, Allen ve Hamilton tarafından; Polaris denizaltı güdümlü füze araştırma ve geliştirme programı çerçevesinde Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri tarafından geliştirilmiştir. CPM ve PERT karmaşık projelerin en geç tamamlanma zamanlarının hesaplanabilmesi, projenin daha erken zamanda tamamlanması istendiğinde yeni düzenlemelerin yapılmasına imkan vermesi proje

yöneticilerinin, projenin akışı üzerindeki kontrollerinin artmasına yardımcı olmaktadır. CPM’de faaliyet süreleri deterministik iken, PERT’de süreler istatistiksel dağılım göstermektedir. (Karaca, 2011)

Projelerin gerçekleşmesi için kaynak ihtiyacı mevcuttur. Kaynak dağıtımı proje yönetiminin önemli diğer bir noktasıdır. Projenin gerçekleştirilebilmesi için gereksinim duyulan kaynaklar beş ana grupta toplanabilir: insan gücü, malzeme, makine, donanım ve para. Bu kaynakların dağıtımındaki iki ana sorundan ilki eldeki sınırlı miktardaki kaynağın proje işlemlerine en iyi şekilde dağıtılması ile ilgilidir. İkincisi ise kaynak kullanımının zaman içinde düzenli olmasını sağlamak (kaynak dengelemesi) olarak tanımlanabilir (Lester, 1991).

Proje yönetimine ait problemlerin çözümünde ağ bazlı metodlar dışında doğrusal optimizasyon yöntemleri, bulanık uygulamalar ve farklı çözüm algoritmaları (genetik algoritmalar, dal-sınır algoritmaları, sezgisel algoritmalar vb.) mevcuttur. Günümüzde agile, scrum, yalın, kanban gibi proje yönetim metodolojileri de geliştirilmiştir ve aktif olarak kullanılmaktadır.

Projeler ile ilgili olarak süre ve maliyet çıktıları dışında kaynak kullanımı da problemlerin başında gelmektedir. Kaynakların dağıtılması ve kaynaklara ait kısıtlar, projenin süresini ve maliyetini etkileyen faktörlerdendir. Bu da zaman içerisinde çalışmaları kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemler üzerinde yoğunlaştırmıştır.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (KKPÇP), kısıtlı kaynaklar kullanılarak bir projeyi oluşturan faaliyetlerin, öncüllük ilişkilerini ihlal etmeden amaç işlevini eniyileyecek biçimde çizelgelenmesidir. (Ulusoy, 2000)

KKPÇ alanında yapılan ilk çalışmalar incelendiğinde çalışma yoğunluğunun proje sürelerini minimize etme üzerine olduğu görülmüştür. Davis ve Patterson (1975), İçlerinde MINSLK, LST, LFT gibi öncüllük kurallarının da olduğu 8 farklı metot ve 83 problem ile çalışma yapılmıştır. MINSLK kuralı aktivite önceliğini aktivite bolluk süresine dayandıran bir yöntemdir. Çalışmada

MINSLK kuralının proje çizelgelemede çoğunlukla optimum zaman aralığına sahip çizelgeleme oluşturduğu savunulmuştur.

KKPÇ problemleri ile ilgili literatürde yer alan en kapsamlı çalışmalardan bir tanesi Özdamar ve Ulusoy (1995) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada KKPÇ ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalara göre, çalışmayı yapanların çoğu, zamanı minimize etmeyi amaçlarken, maliyeti minimize etmeyi amaçlayan çalışmaların sayısı oldukça düşük sonucu çıkarılmıştır. Çalışmada bunun sebebinin maliyeti minimize etmeyi amaçlayan problemlerin çözümünde karşılaşılan problemler olduğu ifade edilmiştir. Bu konuda maliyeti minimize etmeyi veya karı maksimize etmeyi amaçlayan çalışmaların artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma literatürde bu zamana kadar yapılan en kapsamlı çalışma olmuştur.

Temelini Yang ve arkadaşlarının (1992) attığı erken bitirme primli proje çizelgeleme modeli, Schwindt (2000) tarafından erken ve geç bitirme durumlarında proje çizelgelemesi olarak geliştirilmiştir. Problemden kaynak ihtiyacı ve zaman ile ilgili kısıtlarla uyumlu bir faaliyet çizelgesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda projenin erken-geç bitirme maliyetleri minimize edilmiştir. Bu problem için bir dal – sınır algoritması önerilmiştir.

Palacio (2016), KKPÇP'ini çözmek için iki karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeline dayanan kesin bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşımda proje süresi ile beraber kalite de göz önünde bulundurulmuştur. Yenilenebilir kaynaklar kullanılarak çok amaçlı bir model oluşturmuşlardır. Amaç fonksiyonunun ilk kısmı, süreyi en aza indirmeyi amaçlarken, ikinci kısmı, sağlamlığı maksimize etmeyi amaçlar.

Habibi ve ark. (2018), 1980–2017 yılları arasında yayınlanmış 216 çalışmayı değerlendirmişler, KKPÇP'ni sınıflandırmışlar ve KKPÇP çözümünde kullanılan algoritmalar alanında ortaya çıkan gelişmeleri aktarmışlardır. Yapılan çalışma neticesinde literatürde üzerinde en çok çalışma yapılan alt KKPÇ

problemi, kaynak tipine göre yenilenebilir kaynaklar, faaliyet karakterine göre çok modlu faaliyetler, amaç fonksiyonuna göre zaman bazlı, süreye göre de deterministik olan çalışmalar olduğu görülmüştür.

Önceki çalışmalar incelendiğinde KKPC alanında yapılan çalışmalar kaynak türüne, öncüllük ilişkisine, amaç fonksiyonuna ve projenin tek ya da çok modlu olması durumuna göre sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada sabit, yenilenemez ve yenilenebilir kaynakların kullanıldığı tek modlu bir proje için, süre ve maliyet optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda literatürde yer alan benzer çalışmalar, Zoraghi ve ark.(2017), Zamani (2013), Khalilzadeh ve ark. (2012), Jing-wen ve Hui-fang (2010), Konstantinidis (1998) ve Karshenas ve Haber (1990)’a aittir.

Maliyeti minimize etmeyi amaçlarken yalnızca yenilenebilir kaynak kullanılan çalışmalar, Suwa ve Morita (2016), Yuan ve ark.(2015), Song ve ark. (2015), Choi ve Park (2015), Afshar-Nadjafi (2014b), Montoya-Torres ve ark. (2012), Shadrokh (2010), Liu ve Zheng (2008), Shadrokh ve Kianfar (2007), Zhenyuan ve Hongwei (2006), Nonobe ve Ibaraki (2006), Nübel (2001) ve Ahn ve Erenguc (1998) tarafından yapılmıştır.

Karshenas ve Haber (1990), o zamana kadar çalışmalar zaman tabanlıyken, zaman da dahil olmak üzere bir proje tarafından kullanılan tüm kaynakların maliyetini minimize eden doğrusal bir tamsayı modeli önermişlerdir. Çalışmada toplam proje maliyetini minimize edecek amaç fonksiyonu (1)’deki gibidir.

$$\min z = \sum_k C_k(r_k) + \sum_t U(t) * X_{e,t} \quad (1)$$

i faaliyetinin t zamanında kullandığı kaynak miktarı (2) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$r_k \geq \sum_{i=1}^n \sum_{q=t}^{t+d_i-1} r_{i,k} * X_{i,q} \quad (2)$$

Konstantinidis (1998), çalışmasında kaynakların yenilenemez olması durumunda her bir faaliyetin süresi yalnızca bir değere sahip olduğunu ifade etmiştir. Kesinti sürelerini ve ilgili maliyetleri ortadan kaldırmak için aynı kaynağı kullanan faaliyet gruplarının eşleştirilmesi yoluyla optimum çözümler elde edilir. Kaynakların yenilenebilir olduğu durumda faaliyet süreleri kaynak odaklıdır. Bu çalışmada dengeli kaynak histogramlarının tasarımı yoluyla mevcut kaynakların verimliliğini artırmaya yardımcı olmak için yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada ağ analizi simülasyon tekniği kullanılmıştır.

Jing-wen ve Hui-fang (2010), çoklu kaynak kullanım durumunda süre/maliyet optimizasyonu için genetik algoritma metodunu kullanmışlardır. Çalışmada normalde ayrık zaman/maliyet problemlerinin kaynak türlerine ayrı ayrı odaklanırken bu çalışmada geliştirilen yöntemin aynı anda birden fazla yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar için ayrık zaman/maliyet dengeleme problemine çözüm olduğu savunulmuştur.

Khalilzadeh ve ark. (2012), çok modlu kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemlerinde proje faaliyetleri arasında bitişten başlangıca öncelik ilişkileri dikkate alarak yenilenebilir ve yenilenemez kaynakların kullanıldığı bir problemi ele almışlardır. Bu çalışmada yenilenebilir kaynakların belirli bir zamanda var olduğunu ve tüm proje süresince kullanılmadığı varsayılmaktadır. Çalışmada yenilenebilir kaynakların gerekliliğinden önce kiralanmaması veya satın alınmaması kısıtı mevcuttur. Ayrıca hedeflenen süre dışında kullanımında cezai işlem uygulanmaktadır. Çalışmada bal arısı sürü optimizasyonu (HBSO) önerilmiştir. HBSO algoritması nispeten yeni, evrimsel ve popülasyona dayalı meta-sezgisel bir prosedürdür. Doğal sürülerin sosyal davranışından ilham alan HBSO, yinelemeden yinelemeye güncellenen arama alanı için bir bal arısı sürüsünden yararlanır.

Daha önce yapılan çalışmalar arasında bu tezde ele alınan problemler ile en çok benzerlik gösteren problem Khalilzadeh ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Modele ait amaç fonksiyonu (1), birinci ve ikinci terimlerin sırasıyla yenilenemeyen kaynakların toplam ücretleri ve yenilenebilir kaynakların gecikmesinin toplam ceza ücretleri olduğu proje maliyeti minimizasyonudur.

$$\text{Min } \sum_{k=1}^{NR} c_k e^{-ar} (\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} n_{jmk} \sum_{t=EST_j}^{LST_j} x_{jmt}) + \sum_{k=1}^R P_{k,l_k} \quad (1)$$

Zoraghi ve ark (2017), toplam maliyeti en aza indirmek için proje çizelgeleme ve malzeme siparişinin (siparişin süresi ve miktarı) aynı anda dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır, malzeme sipariş kararlarının proje çizelgeleme aşamasından sonra ayarlanmasının optimal olmayan çözümlere yol açtığını savunmuşlardır. Çalışmada malzeme sipariş problemi ile çok modlu kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemini birlikte modellemişlerdir. Ayrıca erken ve geç bitirme maliyetlerini de modele entegre etmişlerdir.

García-Nieves ve ark. (2019), çalışmalarında çok modlu bir inşaat projesinde yenilenebilir kaynaklar kullanarak proje süresini minimize etmeyi amaçladıkları bir çalışma yapmışlardır. Modellerine faaliyet seviyelendirme, süreklilik, çoklu faaliyet yürütme modları, çoklu ekiplerin çalışması gibi kısıtlar ekleyerek inşaata özgü model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında süre minimizasyonu gerçekleşmiştir.

Hartmann ve Briskorn (2021), literatürde son 10 yıldaki gelişmeleri incelemişler ve yapılan çalışmaları sınıflandırmışlardır. Son yıllarda yapılan çalışmaların öncüllük ilişkileri, kaynakların proje boyunca değişiklik göstermesi, proje tamamlanma süreleri ve çok modlu projeler üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle yenilenebilir kaynaklar sıklıkla kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları zaman bazlı, kalite bazlı, yeniden çizelgeleme, kaynak maliyetleri,

kaynak kiralamaları, kaynak seviyelendirme, maliyet tabanlı, net kar tabanlı ve çok amaçlı çalışmalar olduğu görülmektedir.

KKPÇ problemleri için zaman içinde birçok farklı metotlarla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar ağırlıklı olarak, genetik algoritma, tam sayılı programlama, hibrit algoritmalar, simülasyon, doğrusal programlama ve karma tam sayılı programlama, parçacık sürü optimizasyonu şeklindedir. Haricen literatürde başka metotlar da yer almaktadır.

Bu bölümde bugüne kadar yapılan çalışmalar gözden geçirilmiş ve ele alınan çalışmanın literatürdeki yeri tespit edilmek istenmiştir. Yapılan çalışmalar kaynak türleri bakımından yenilenebilen, yenilenemeyen ve çift kısıtlı kaynak üzerinde yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilen projelerde ise farklı kaynak türleri de kullanılmaktadır. Belirli bir zamanda gerekli olan ve yine belirli bir zamanda gereksinimi ortadan kalkan kule vinç, yazılım paketleri, kiralanan araçlar vb. kaynaklar literatürde yer alan kaynak türleri bakımından tam olarak kapsamamaktadır. Bu nedenle yeni bir kaynak türü olarak değerlendirilmesi proje çizelgelemesi problemleri için doğru değerlendirmeler sunacaktır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında literatürdeki ifadesi ile "Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi (KKPÇP)" yapısına uyan bir sabit, yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklı projenin faaliyetlerin çizelgelenmesinde proje süresi ve toplam proje maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Bu bölümde, ele alınan çizelgeleme problemini oluşturan faaliyetler ve kaynaklar hakkında bilgiler verilmiş, problemin detayları anlatılmıştır. Problemin matematiksel programlama modeli oluşturulmuş, modelin çözümü için kullanılan metot ve kullanılan program anlatılmıştır.

3.1. Materyal

Bu çalışmada 2 grup örnek proje verisi kullanılmıştır. İlk olarak modelin test edilmesi amacı ile PSPLIB model kütüphanesinde yer alan "Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)" başlığında yer alan j30 verileri kullanılmıştır.

Söz konusu verilerde 32 faaliyet bulunmaktadır. Faaliyetler arasında teknik kısıtlar mevcuttur. Faaliyet süreleri deterministiktir. Veri setlerinde çoklu kaynak durumu bulunmaktadır, bu çalışma için 4 kaynaklı veri seti tercih edilmiştir. Projelerin gerçekleştirilmesi için gerekli kaynaklar yenilenemez kaynaktır.

İkinci olarak ise 2021 yılında tamamlanan bir konut projesine ait gerçek proje verileri kullanılmıştır. Bu verilere göre proje 35 faaliyetten oluşmaktadır. Faaliyetler arasında teknik kısıtlar bulunmaktadır. Projede çoklu kaynak durumu mevcuttur, altısı yenilenemez, biri yenilenebilir ve biri sabit kaynak olmak üzere sekiz adet kaynak gereklidir. Bu veriler üzerinde model karmaşıklığı incelenmiş, modelin performansı test edilmiş ve senaryo analizleri yapılmıştır. Gerçek proje uygulaması da yine bu veriler ile gerçekleştirilmiştir.

3.2. Metot

Bu bölümde ilk olarak ele alınan problemin formülasyonu yapılmıştır. Ele alınan probleme özgü genel varsayımlara ve problem karakteristiklerine bu bölümde yer verilmiştir. Ardından problemin çözümü için oluşturulan matematiksel programlama modeli yer almaktadır. Daha sonra problemin yapısına uygun olarak oluşturulan matematiksel model için çözüm yöntemleri önerilmiştir. Son olarak oluşturulan matematiksel modelin performansını test etmek amacı ile senaryoların tasarımı oluşturulmuştur.

3.2.1. Problemin Formülasyonu

Ele alınan problemin formülasyonu için öncelikle problem karakteristiklerine yer verilmiştir. İkinci kısımda ise formülasyonda kullanılan varsayımlar yer almaktadır. Üçüncü kısımda modelde yer alan değişkenler ve parametreler incelenmiştir. Son kısımda ise performans değişkenleri yer almaktadır.

3.2.1.1. Problem Karakteristikleri

Ele alınan probleme özgü özellikler şu şekildedir;

1. Amaç fonksiyonunda proje süresi ve toplam proje maliyetinin optimize edilmesi hedeflenmiştir.
2. Faaliyetlerin gerçekleşmesi için gerekli olan kaynaklar birden fazladır ve kullanım miktarları faaliyetlere göre değişiklik göstermektedir.
3. Faaliyetlerin gerçekleşmesi için gerekli olan kaynaklar yenilenebilir, yenilenemez ve sabit olmak üzere üç çeşittir.
4. Projenin finansal kısıtı bulunmaktadır.

5. Aynı günde iki farklı faaliyet için aynı kaynak kullanılabilir.
6. Projenin toplam maliyeti ve süre kısıtları modelde birlikte ele alınmıştır. Literatürde yer alan KKPC çalışmaları incelendiğinde zamanı minimize eden, maliyeti minimize eden veya hem zaman hem maliyet tabanlı çalışmalar yer almaktadır.

3.2.1.2. Varsayımlar

Ele alınan problem modellenirken kabul edilen varsayımlar;

1. Proje faaliyet süreleri deterministiktir.
2. Birim kaynak maliyetlerinin faaliyetlerden bağımsız olduğu varsayılmaktadır.
3. Kaynaklarda maliyet enflasyonu olmadığı varsayılmaktadır.
4. Kaynakların fire verilmeden doğrudan faaliyetlerde kullanıldığı varsayılmaktadır.
5. Kaynaklar faaliyet süresi boyunca eşit şekilde tüketilmiştir.
6. Başlayan faaliyet kesintiye uğramadan devam eder ve tamamlanır.

Varsayımların geçerliliği incelenmiş ve diğer çalışmalarda kullanılan varsayımlarla uyumluluğu göz önünde tutulmuştur.

3.2.1.3. Değişkenler ve Parametreler

Ele alınan çalışmada dört ana karar değişkeni vardır. Bunlar, faaliyet başlangıç zamanı, sabit kaynak kullanımı, yenilenebilir ve yenilenemez kaynak atamaları ile ilgili karar değişkenleridir. Bunlara ek olarak dört yardımcı karar değişkeni bulunmaktadır. Bunlar faaliyet başlangıç zamanına ait faaliyet devam zamanı, faaliyet bitiş zamanı karar değişkeni ve sabit kaynak kullanımına ait

alternatif sabit kaynak kullanımı karar değişkenleridir. Ayrıca modele ait yedi grup parametre mevcuttur. Bunlar, süre, öncüllük kısıtları, aylık finansal kısıt, toplam kaynak gereksinimi, faaliyetlerin kaynak ihtiyacı, kaynakların hizmet edebileceği faaliyet sınırı ve kaynak kullanım maliyetleridir.

Modelde yer alan faaliyet başlangıç, faaliyet devam zamanı, faaliyet bitiş, sabit kaynak kullanımı ve alternatif sabit kaynak kullanımı karar değişkenleri ikili tamsayı değişkenleri olarak yer almaktadır. Kaynak atama karar değişkeni ise modelde çoklu kaynak durumunda hangi faaliyette kaç birim kullanılacağını belirleyen karar değişkenidir. Tamsayı değişkenleri olarak yer almaktadır.

Çalışmada yer alan parametrelerden ilki faaliyet süresi parametresidir. Faaliyetler başlar, belirli bir süre devam eder ve sonlandırılır. Faaliyet süreleri gerçekleşen proje süresi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir ve deterministiktir.

İkinci olarak kullanılan kaynakların maliyetine ait parametrelerdir. Kullanılan kaynaklar tüm proje boyunca birim maliyetinin sabit olduğu varsayılmıştır.

Üçüncü parametre faaliyetlerin kullanabilecekleri maksimum kaynak miktarını belirleyen parametredir. Proje boyunca gereken toplam kaynak miktarı bu sayede belirlenir.

Dördüncü parametre her bir faaliyet için hangi kaynaktan ne kadar kullanılabileceğini belirler. Faaliyetler gerçekleşmek için belirli kaynaklara ihtiyaç duyarlar. Hangi sürede ne kadar kullanılacağı bu parametre ile belirlenir.

Beşinci parametre ise öncüllük kısıtı parametresidir. Proje yönetiminde teknik olarak bazı faaliyetin gerçekleşmesi için bitmesi gereken faaliyetler vardır.

Altıncı parametre, kaynakların hizmet edebileceği maksimum faaliyet sayısı kısıt parametresidir. Kaynaklar aynı anda belirli miktardaki faaliyette kullanılabilirler. Daha fazla faaliyetin olması durumunda kaynak sayısının artırılması gerekmektedir.

Son parametre ise aylık finansal kısıt parametresidir. Gerçekleşen faaliyetler kaynaklar için aylık belirlenen miktarın üzerinde harcama yapılamaz. Böylece aylık finansal akış belirli bir seviyede tutulur ve süreyi minimize etmek için fazladan kaynak kullanımı engellenmiş olur.

3.2.1.4. Performans Değişkenleri

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde ilk çalışmalarda amaç çoğunlukla proje zamanını minimize etme üzerinedir. Daha sonra yapılan çalışmaların maliyet ve süre optimizasyonu üzerinde yapıldığı görülmüştür. Zamanı minimize etmek için fazladan kaynak kullanımı maliyetleri artıracak ve dolayısıyla proje karını azaltacaktır. Bu çalışmada proje süresi ve toplam proje maliyeti optimize edilmek istenmiştir. Maliyet ve süreyi optimize etmek amaçlanırken paranın zaman değeri göz önüne alınmamıştır.

Modelde yer alan amaç fonksiyonu altı kısımdan oluşmaktadır. Toplam proje maliyeti ve proje süresini optimize etmek üzerine olan amaç fonksiyonunda birinci kısım yenilenemez kaynak kullanım maliyetini, ikinci kısım yenilenebilir kaynak kullanım maliyetini, üçüncü kısım sabit kaynak kullanım maliyetini, dördüncü kısım alternatif sabit kaynak kullanım maliyetini, beşinci kısım projeyi erken bitirme primini ve altıncı kısım projeyi geç tamamlama cezasını ifade etmektedir. Kaynak kullanım maliyeti, kullanılan toplam kaynak miktarının birim maliyetleri ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Amaç fonksiyonun beşinci ve altıncı kısımları projenin gerçekleşme süresiyle ilgili maliyetleri ifade etmektedir. Hedeflenen proje süresi belirlenmiş, projenin zamanında bitmediği takdirde gecikme yaşanan her günde bir maliyet artışı ya da erken bitirilen her günde bir erken bitirme primi ile maliyet azalışı olduğu öngörülmüştür.

3.2.2. Matematik Programlama Modeli

Matematiksel model, değişkenler, parametreler ve kısıtlamalar arasındaki ilişkiyi temsil etmek için kullanılan matematiksel formüllerin bütünüdür. Elde

edilen verilerin analiz edilmesi amacı ile matematiksel modeller oluşturulur. Böylece modeller soyut olan verileri somut hale getirerek anlamlı çıktılar elde etmemizi sağlar. Çalışmaya ait matematiksel modele bu bölümde yer verilmiştir.

3.2.2.1. Notasyon

Modele ait notasyon aşağıdaki verilmiştir:

İndisler

<i>i:</i>	faaliyet indisi
<i>j:</i>	yenilenemez kaynak indisi
<i>d:</i>	yenilenebilir kaynak indisi
<i>m:</i>	sabit kaynak indisi
<i>z:</i>	alternatif sabit kaynak indisi
<i>f:</i>	aylık dönem indisi

Ana Karar Değişkenleri

$$B_{it} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde başlıyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde başlamıyorsa} \end{cases}$$

$$F_{imt} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } m \text{ sabit kaynağını kullanıyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } m \text{ sabit kaynağını kullanmıyorsa} \end{cases}$$

$$Y_{idt} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } d \text{ yenilenebilir kaynağını kullanıyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } d \text{ yenilenebilir kaynağını kullanmıyorsa} \end{cases}$$

Q_{ijt} : *i*. faaliyetin *t* gününde kullandığı yenilenemez *j* kaynak miktarı

Yardımcı Karar Değişkenleri

$$T_{it} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde bitiyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde bitmiyorsa} \end{cases}$$

$$D_{it} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde devam ediyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde devam etmiyorsa} \end{cases}$$

$$M_{it} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } z \text{ alternatif sabit kaynağını kullanıyorsa} \\ 0 & i. \text{ faaliyet } t. \text{ günde } z \text{ alternatif sabit kaynağını kullanıyorsa} \end{cases}$$

$$A_t = \begin{cases} 1 & t. \text{ günde sabit kaynak kullanılıyorsa} \\ 0 & t. \text{ günde alternatif sabit kaynak kullanılıyorsa} \end{cases}$$

Parametreler

- S_i : i . faaliyetin süresi [gün]
- c_{ijt}^y : i . faaliyet için yenilenemez j kaynağının t . günde kullanımının birim maliyeti [TL/kaynak birimi]
- k_{ijt}^y : i . faaliyet için gerekli yenilenemez j kaynak miktarı [kaynak birimi]
- r_j^y : yenilenemez j kaynağının toplam miktarı [kaynak birimi]
- c_{idt}^r : i . faaliyet için yenilenebilir d kaynağının t . günde kullanımının birim maliyeti [TL/gün]
- k_{idt}^r : i . faaliyet için gerekli yenilenebilir d kaynak miktarı [kaynak birimi]
- r_d^r : yenilenebilir d kaynağının toplam miktarı [kaynak birimi]
- c_{imt}^s : i . faaliyet için m sabit kaynağının t . günde kullanımının birim maliyeti [TL/gün]
- k_{imt}^s : i . faaliyetinin kullandığı m sabit kaynak miktarı [kaynak birimi]
- r_m^s : sabit m kaynağının toplam miktarı [kaynak birimi]
- β_m : sabit m kaynağının kullanımının başlangıç zamanı [gün]
- γ_m : sabit m kaynağının son kullanım zamanı [gün]
- l_m : Sabit m kaynağının gecikme üst sınırı [gün]

- c_{iz}^a : i . faaliyet için z alternatif sabit kaynağının t . günde kullanımının birim maliyeti [TL/gün]
- k_{iz}^a : i . faaliyetinin kullandığı z alternatif sabit kaynak miktarı [kaynak birimi]
- r_z^a : alternatif sabit z kaynağının toplam miktarı [kaynak birimi]
- T : proje süresi
- R : hedeflenen proje bitiş tarihi [gün]
- E : alternatif sabit kaynağın hizmet verebileceği en fazla faaliyet sayısı [adet]
- δ : projenin t gün erken bitirme primi [TL/Gün]
- b : projenin t gün geç bitirme cezası [TL/Gün]
- cc : aylık finansal kısıt [TL/Ay]
- h : hedeflenen proje bitiş tarihi, $R/30$ [ay]
- $p_{ik} = \begin{cases} 1 & i. \text{ faaliyet } k. \text{ faaliyetten önceyse} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}$

3.2.2.2. Matematiksel Model

Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonunun birinci kısmı i . faaliyet tarafından t zamanında kullanılan yenilenemez j kaynak miktarının (Q_{ijt}), j kaynağının birim maliyeti (c_{ij}^y) ile çarpımlarının toplanmasıyla bulunan kaynak kullanım maliyetidir. Amaç fonksiyonunun ikinci kısmı i . faaliyet tarafından kullanılan yenilenebilir d kaynağının (Y_{idt}), d kaynağının birim maliyeti (c_{id}^r) ile çarpımlarının toplanmasıyla bulunan kaynak kullanım maliyetidir. Amaç fonksiyonunun üçüncü kısmı m sabit kaynağının (F_{imt}) kullanım miktarının, m sabit kaynağının birim maliyeti (c_{im}^s) ile çarpımlarının toplamı ile bulunan kaynak kullanım maliyetidir. Amaç fonksiyonunun dördüncü kısmı z alternatif sabit kaynağının (M_{izt}) kullanım miktarının, z sabit kaynağının birim maliyeti (c_{iz}^a) ile çarpımlarının toplamı ile

bulunan kaynak kullanım maliyetidir. Amaç fonksiyonun son kısmında ise projenin son faaliyetinin bitişi (T_{nt}), hedeflenen proje bitiş zamanından (R) sonraya kalırsa ($t > R$) gecikme cezası olacağını, önce tamamlanırsa ($t < R$) olduğu durumlarda erken bitirme primi olacaktır.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \sum_j \sum_t (c_{ijt}^y Q_{ijt}) + \sum_i \sum_d \sum_t (c_{idt}^r Y_{idt}) + \\ & \sum_i \sum_m \sum_t (c_{imt}^s F_{imt}) + \sum_i \sum_z \sum_t (c_{izt}^a M_{izt}) - \sum_{t=1}^{R-1} \delta(R - \\ & t) T_{nt} + \sum_{t=R+1}^T b(t - R) T_{nt} \quad (1) \end{aligned}$$

Kısıtlar

$$\sum_t \sum_i Q_{ijt} \leq r_j^y \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T Q_{ijt} = k_{ij}^y \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1} k_{id}^r \sum_t Y_{idt} \leq r_d^r \quad \forall d \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{\beta_m-1} F_{imt} = 0 \quad \forall m, i \quad (5)$$

$$t F_{imt} - \gamma_m \leq l_m \quad t = \gamma_m, \gamma_m + 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{i=1} k_{im}^s \sum_t F_{imt} \leq r_m^s \quad \forall m \quad (7)$$

$$\sum_{i=1} k_{iz}^a \sum_t M_{izt} \leq r_z^a \quad \forall z \quad (8)$$

$$\sum_i M_{izt} \leq E \quad \forall t, z \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_i F_{imt} \leq A_t M \quad \forall t \quad (10)$$

$$\sum_z \sum_i M_{izt} \leq (1 - A_t) M \quad \forall t \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t=30f+1}^{30f+30} ((Q_{ijt} \times c_{ijt}^y) + (Y_{idt} \times c_{idt}^r) + (F_{imt} \times \\ c_{imt}^s) + (M_{izt} \times c_{izt}^a)) \leq cc_f \quad \forall f \quad (12) \end{aligned}$$

$$\sum_{u=t+1} B_{ku} \geq p_{ik} \times T_{it} \quad \forall i, k, t \quad (13)$$

$$\sum_t D_{it} = S_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$uD_{iu} \leq tT_{it} \quad \forall t \quad (15)$$

$$uD_{iu} \geq tB_{it} \quad \forall t \quad (16)$$

$$\sum_t B_{it} = 1 \quad \forall i \quad (17)$$

$$\sum_t T_{it} = 1 \quad \forall i \quad (18)$$

$$Q_{ijt}, Y_{idt}, F_{imt}, M_{izt} \leq D_{it} \quad (19)$$

$$B_{it}, T_{it}, D_{it}, Y_{idt}, F_{imt}, M_{izt} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \forall i, t \quad (20)$$

$$B_{it}, T_{it}, D_{it}, Q_{ijt}, Y_{idt}, F_{imt}, M_{izt} \geq 0 \quad (21)$$

Modelde, kısıt (2) her bir faaliyette kullanılan yenilenemez kaynakların toplamının, proje için belirlenen kaynakların toplamından küçük veya eşit olduğunu ifade eder. Kısıt (3), i . faaliyetin tamamlanması için kullanılan yenilenemez j kaynak miktarlarının toplamının, i . faaliyetin gerçekleşmesi için kullanılacak j kaynak miktarına eşit olduğunu ifade etmektedir.

Kısıt (4), yenilenebilir kaynak kullanımını sınırlandırır. Kısıt (5) ve kısıt (6), sabit kaynakların gereksiniminde önce kullanılmasını ve geç kullanımını engeller. Kısıt (7), sabit kaynak kullanımını sınırlandırır. Kısıt (8), sabit kaynaklara alternatif olan kaynakların kullanımını sınırlandırır. Kısıt (9), alternatif kaynakların hizmet verebileceği faaliyet sayısını sınırlandırır. Kısıt (10) ve kısıt (11), sabit kaynak kullanılmadığı durumlarda alternatif sabit kaynak kullanılacağını ifade eder.

Kısıt (12), projeye ait finansal kısıt olduğunu göstermektedir. Aylık periyotlarda faaliyetler belirlenen miktardaki maliyetleri aşmayacak şekilde gerçekleşir. Kısıt (13), faaliyetler arasındaki öncüllük ilişkisini ifade eder. Kısıt (14) faaliyet süre kısıtıdır. Kısıt (17) ve kısıt (18) faaliyet i 'nin başlangıç (B_{it}) ve bitiş (T_{it}) zamanı tek olduğunu ve kısıt (15) ve kısıt (16) bu zamanlarda faaliyetlerin devam ettiğini ifade eder. Kısıt (19), kaynak atama karar değişkenlerinin faaliyet sürelerinden büyük olmaması koşulunu sağlar. Kısıt (20) ve (21) ikili tamsayı ve tamsayı değişkenlerini ifade etmektedir.

3.2.3. Çözüm Yönteminin Belirlenmesi

Belirlenen materyaller veri haline getirilmiştir. PSPLIB model kütüphanesine ait 4 kaynak içeren j30 veri seti ve bir inşaat projesine ait veriler, faaliyet, kaynak ve öncüllük ilişkileri içinde tablolanmıştır. Birim maliyetleri belli olan inşaat proje verilerinde toplam proje maliyeti hesaplanmıştır.

Matematik programlama modeli GAMS programında modellenmiştir. Çözüm yapılan bilgisayar Intel(R) Core(TM) i5 işlemcili, 64 bit işletim sistemi, x64 tabanlı işlemci, 8GB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayardır.

GAMS modelleme ortamında doğrusal, doğrusal olmayan ve karmaşık tamsayı problemleri modellenebilmektedir. Özellikle büyük ve karmaşık problemlerin çözümünde GAMS programı kullanılabilmektedir. GAMS programı farklı çözücülere sahiptir. Bu çalışmada CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. CPLEX çözücüsü karmaşık tamsayı programlaması, karesel programlama ve karesel kısıtlı programlama için matematiksel programlama çözümü sağlar.

Oluşturulan GAMS modelinin performansını ölçmek için senaryoların tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Modelin hangi büyüklükteki problemleri çözebileceği bu sayede belirlenmiştir.

3.2.4. Senaryoların Tasarım

Oluşturulan model için, model performansını ölçmek amacı ile çeşitli büyüklükte faaliyetler ve kaynaklar kombinasyonlanmıştır. Senaryoların tasarımı yöntemi sayesinde modelin performansı ölçülmüştür. Uygulanan yöntemde projeye ait faaliyet ve kaynak sayıları esas alınmıştır. Bu faktörler doğrultusunda hazırlanan tablo çizelge 3.1.'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Senaryoların Tasarımı Tablosu

	Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı
1	14	4
2	20	4

3	30	4
4	35	4
5	50	4
6	100	4
7	14	7
8	20	7
9	30	7
10	35	7
11	50	7
12	100	7

Çizelge 3.1.'de görülen senaryoların tasarımı çalışmasında faaliyet sayıları 14 ile 100 faaliyet arasında olmak üzere, kaynak sayıları 4 ve 7 olmak üzere iki seviye belirlenmiştir. Tüm çalışmalar karmaşık öncüllük ilişkisi içinde ele alınacaktır. Senaryoların tasarımı tablosunda yer alan veriler EKLER kısmında yer almaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Örnek Uygulama

Bu kısımda materyal kısmında bahsedilen, PSPLIB model kütüphanesinde yer alan “Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)” başlığında yer alan 4 kaynaklı j30 veri seti ve senaryoların tasarımı tablosunda yer alan farklı büyüklükteki modellerden oluşan gerçek proje verileri üzerinde örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı modelin çalışma performansını ölçmektir.

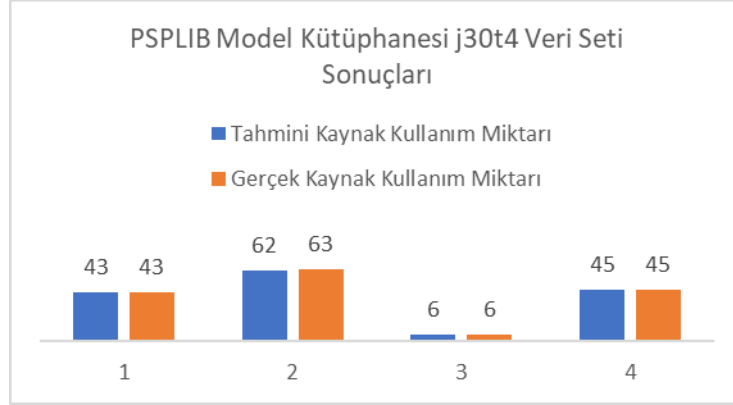
PSPLIB model kütüphanesinden alınan veriler çizelge 4.1.’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti

Faal.No	Süre	Ardıllar	K1	K2	K3	K4
1	0	2,3,4				
2	8	6,11,15	4			
3	4	7,8,13	10			
4	6	5,9,10				3
5	3	20	3			
6	8	30				8
7	5	27	4			
8	9	12,19,27		1		
9	2	14	6			
10	7	16,25				1
11	9	20,26		5		
12	2	14		7		
13	6	17,18	4			
14	3	17		8		
15	9	25	3			

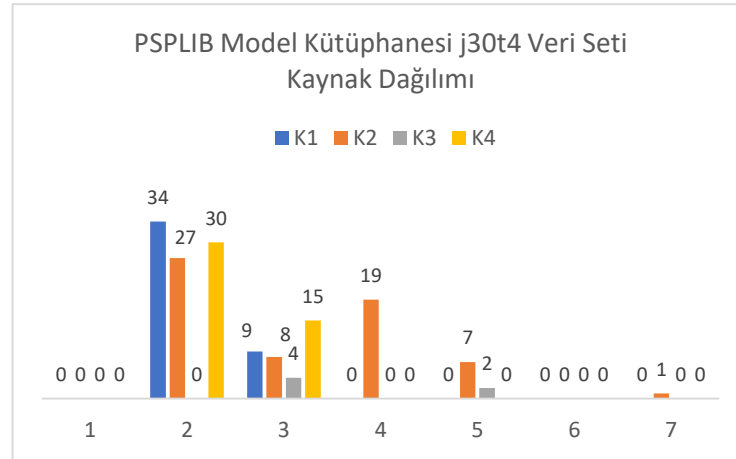
16	10	21,22				5
17	6	22				8
18	5	20,22				7
19	3	24,29		1		
20	7	23,25		10		
21	2	28				6
22	7	23	2			
23	2	24	3			
24	3	30		9		
25	3	30	4			
26	7	31			4	
27	8	28				7
28	3	31		8		
29	7	32		7		
30	2	32		7		
31	2	32			2	
32	0					

Veri setinde yer alan tüm kaynaklar yenilenemez kaynaklardır. İlk ve son faaliyetler kukla faaliyetlerdir. Veri setinde kaynak miktarı sırasıyla 43, 63, 6 ve 45 birim olarak verilmiştir. Toplam proje süresi 158 gündür.



Şekil 4.1. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti Kaynak Dağılım Grafiği

GAMS ortamında hazırlanan model veri seti üzerinde uygulandığında Şekil 4.1.'de yer alan sonuçlar elde edilmiştir. Proje süresi 157 gün, proje için gerekli kaynak sayısı 157 birim olarak hesaplanmıştır. Kaynaklardaki sapmalar sapma olmadığı görülmektedir. Bu sayede hazırlanan modelin 30 faaliyet ve 4 kaynaklı problemlerde optimal sonuç verdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.2. PSPLIB Model Kütüphanesi j30t4 Veri Seti Kaynak Dağılım Grafiği

Kaynakların aylara göre dağılım grafiği şekil 4.2.'de yer almaktadır. Faaliyet çizelgesi ile kaynak dağılımı karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların tutarlılığı teyit edilmiştir.

4.2. Model Karmaşıklığının İncelenmesi

Ele alınan KKPC probleminin çözülmesi için kullanılan matematiksel modelin farklı büyüklüklerdeki problemlerin çözüm incelemesi için yapılan çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir. Modelin incelenmesinde senaryoların tasarımı tablosunda yer alan farklı büyüklükteki modeller kullanılmıştır.

Senaryoların tasarımı tablosunda yer alan farklı büyüklükteki modellerin çözülmesiyle amaç fonksiyonları hesaplanmıştır. Farklı büyüklükteki faaliyet sayısı, kaynak sayısı ve öncüllük ilişkilerine bağlı olarak elde edilen sonuçlar çizelge 4.2.'de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Çözüm İncelemesi

	Faal Sy.	Yenilenemez Kyn Sy.	Yenilenebilir Kyn Sy.	Sabit Kaynak Sy.	Karar Değişkeni Sy.	Çözüm	Çözüm Süresi (sn)	Fonk. Amaç Değ.(TL)
1	14	3	1	1	8	Optimal	13	5.490.770
2	20	3	1	1	8	Optimal	51	4.277.920
3	30	3	1	1	8	Optimal	57	5.153.320
4	35	3	1	1	8	Optimal	209	5.713.220
5	50	3	1	1	8	Yetersiz Hafıza	90357	-
6	100	3	1	1	8	Yetersiz Hafıza	145651	-
7	14	6	1	1	8	Optimal	17	5.490.770
8	20	6	1	1	8	Optimal	57	7.871.920
9	30	6	1	1	8	Optimal	68	13.769.496
10	35	6	1	1	8	Optimal	219	15.596.496
11	50	6	1	1	8	Yetersiz Hafıza	144512	-
12	100	6	1	1	8	Yetersiz Hafıza	324228	-

Çizelge 4.2. incelendiğinde; ele alınan KKPÇ probleminde hesaplama karmaşıklığı gözlenmiştir. Faaliyet sayısı attıkça çözüm uzayı büyüklüğü de artmaktadır. Tüm modellerde öncüllük ilişkileri benzerdir. 14 faaliyetli projelerde 2,19MB-2.54MB büyüklüğündeki çözüm uzayı, 20 faaliyetli projelerde 8,86MB-9,86MB büyüklüğündeki çözüm uzayı, 30 faaliyetli projelerde 19,15MB-19,17MB büyüklüğündeki çözüm uzayı, 35 faaliyetli projelerde 26,14MB-

27,12MB büyüklüğündeki çözüm uzayı elde edilmiştir. Oluşturulan model ile 35 faaliyete kadar olan projeler için optimal sonuçlar elde edilebilirken, 35 faaliyet ve üzerinde bilgisayar hafıza büyüklüğünü aşmaktadır.

Oluşturulan örnek projelerde 35 faaliyete kadar elde edilen tüm sonuçlar optimal olmuştur. Fakat 35 faaliyet üzerinde sonuç elde edilememesi sebebi ile oluşturulan modelin 35 faaliyete kadar olan karmaşık öncüllük ilişkisi içindeki problemlerde optimal sonuç verdiği sonucu elde edilmiştir. Oluşturulan modelde kaynak sayısının sonucun optimal olup olmamasına etkisi olmamıştır. Yapılan literatür çalışması ile birlikte daha büyük projelerde sezgisel yöntemler ile çalışmalar yapıldığı görülmüştür.

4.3. Model Çözümlerinin İncelenmesi

Bu bölümde matematiksel modelden elde edilen çözümler incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde, bu model için faaliyetler arasındaki karmaşık öncüllük ilişkisi içinde model çözümünü etkileyen temel faktör, proje faaliyet sayısı ve kaynak sayısı olmuştur. Yapılan literatür çalışmasında faaliyet sayısı ile beraber öncüllük ilişkisinin karmaşıklığı da model çözümünü etkilediği görülmüştür fakat bu çalışmada tüm model incelemeleri karmaşık öncüllük ilişkisi içinde yapıldığı için model çözümünü etkileyen temel faktör faaliyet sayısı ve kaynak sayısı olmuştur.

Proje büyüklüğü, proje içinde yer alan faaliyet sayısına ve projenin gerçekleşmesi için planlanan toplam proje süresine bağlıdır. Proje süresi için temel olarak 390 gün belirlenmiştir. Faaliyet sayıları da 14 faaliyet ile 100 faaliyet arasında, kaynak sayıları da 5 kaynak ile 8 kaynak arasında değişmektedir. Bu veriler doğrultusunda 35 faaliyete kadar optimal sonuç alınırken daha büyük projelerde programın “yetersiz hafıza” hatası çözüm elde edilememiştir.

4.4. Vaka Uygulaması

Bu çalışmada teorik olarak değerlendirilen matematiksel modelin gerçek bir projede uygulaması gerçekleştirilmiştir. Metodoloji bir konut projesinde uygulanmıştır. Ele alınan proje G4 Nest Konut Projesi'dir. Proje 35 faaliyetten oluşmaktadır ve her bir faaliyetin başlaması için önceki faaliyetin tamamlanması gerekmektedir. Her bir faaliyet başlar, belirli bir zaman devam eder ve sonlanır. Proje Ağustos 2020'de başlamış, Eylül 2021'de tamamlanmıştır.

Faaliyetlerin gerçekleşmesi için gereken kaynak ihtiyacı sayısı sekizdir. Bu kaynakların altısı yenilenemez, biri yenilenebilir ve biri sabit kaynaktır. Projeyi gerçekleştirmek için gerekli kaynaklar beton, demir, vitrifiye, ankastre, seramik, nakit akışı, beyaz yaka çalışan ve kule vinç kaynaklarıdır. Problemi ele alırken kule vinç kaynağı ile beraber alternatif bir kaynak olan mobil vinç kullanımının maliyete etkisi de incelenmiştir.

Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme metodolojisinin inşaat projesine uygulanması amacıyla öncelikle proje kapsamında olan faaliyetler listelenmiş ve numaralanmış ardından faaliyetlerin öncüllük sırasına göre kısıtları belirlenmiştir: Probleme ait faaliyetler, süre ve öncüllük ilişkileri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Projeyi Oluşturan Faaliyetler , Süreleri ve Öncüllük İlişkileri

	Faaliyet	Süre (Gün)	Öncüllük
1	Temel Betonlu	13	-
2	1.Bodrum Kat	27	1
3	Zemin Kat	17	2
4	1.Kat	11	3
5	2.Kat	11	4
6	3.Kat	10	5
7	4.Kat	10	6
8	5.Kat	9	7
9	6.Kat	9	8
10	7.Kat	9	9
11	8.Kat	8	10
12	9.Kat	8	11
13	10.Kat	8	12
14	11.Kat	5	13
15	Duvar İmalatı	60	7
16	Multipor İmalatı	10	10
17	Alçıpan İmalatı	15	25,28
18	Sıva İmalatı	30	17
19	Şap İmalatı	30	18
20	Seramik İmalatı	45	19
21	Pencere Denizlik İmalatı	15	16
22	Boya İmalatı	60	18
23	Parke İmalatı	20	24
24	Doğrama Montajı	15	19,21
25	Elektrik Tesisatı	15	15
26	Bitiş Elemanları Montajı	7	25
27	Asansör Montajı	30	12
28	Mekanik Tesisatı	15	15

29	Vitrifiye Montajı	7	28
30	İç ve Dış Kapı Montajı	30	14
31	Mobilya Montajı	30	22,23,24
32	Ankastre Montajı	7	31
33	Bina Çevresi Peyzaj İmalatı	15	22
34	1. Kat Peyzaj İmalatı	30	33
35	Daire Teslimatı	1	32

Problemi oluşturan faaliyetler, süreleri ve öncüllük ilişkileri çizelge 4.3.'de verilmiştir. Faaliyet sürelerine ait veriler gerçekleşen projeye ait verilerdir. Projenin gerçekleşmesi için 35 faaliyete ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sonraki tabloda faaliyetlerin gerçekleşmesi için gerekli kaynak miktarları gösterilmiştir. Kaynakların altısı yenilenemez, biri yenilenebilir ve biri sabit kaynaktır. Proje kaynakları, sırasıyla, beyaz yaka çalışan, kule vinç, beton, demir, vitrifiye, ankastre, seramik ve nakit akışıdır. Faaliyetlerin tamamlanması için gerekli kaynak miktarları çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Projeyi Oluşturan Faaliyetler ve Kaynak Dağılımı

Faaliyet	Kaynaklar							
	Beyaz Yaka	Kulevinç (Adet)	Beton (M ³)	Demir (Ton)	Vitrifiye (Set)	Ankastre (Set)	Seramik (M ²)	Nakit Akışı (TL)
1	10	1	2064	200				₺140.000,00
2	10	1	907	60				₺290.000,00
3	10	1	562	50				₺180.000,00
4	10	1	295	25				₺115.000,00
5	10	1	273	25				₺115.000,00
6	10	1	267	25				₺105.000,00
7	10	1	259	25				₺105.000,00
8	10	1	260	25				₺95.000,00
9	10	1	255	25				₺95.000,00
10	10	1	243	25				₺95.000,00
11	10	1	234	25				₺85.000,00
12	10	1	227	25				₺85.000,00
13	10	1	218	25				₺85.000,00
14	10	1	154	25				₺71.000,00
15	10	1						₺343.000,00
16	10	1						₺521.000,00
17	10	1						₺270.000,00
18	10	1						₺270.000,00
19	10	1						₺270.000,00
20	10	1					900	₺270.000,00
21	10	1						₺270.000,00
22	10	1						₺270.000,00
23	10	1						₺247.000,00

24	10	1						₺683.000,00
25	10	1						₺430.000,00
26	10	1						₺400.000,00
27	10	1						₺276.000,00
28	10	1						₺1.000.000,00
29	10	1			114			₺850.000,00
30	10	1						₺296.000,00
31	10	1						₺1.100.000,00
32	10	1				98		₺0,00
33	10	0						₺85.000,00
34	10	0						₺85.000,00
35	10	0						₺0,00

Çizelge 4.5.'de kaynaklara ait birim maliyetlere yer verilmiştir.

Çizelge 4.5. Birim Maliyetler

Kaynak	Birim Maliyeti
Kule vinç	450 TL (gün)
Mobil vinç	1000 TL (gün)
Beton	240 TL (m ³)
Demir	3500 TL (ton)
Vitrifiye	2500 TL (set)
Ankastre	2612 TL (set)
Seramik	50TL (m ²)
Beyaz Yaka Çalışan	500 (adam/gün)

Çizelge 4.5.'de yer alan birim maliyetler Ocak 2021 yılı verileridir. Proje verileri düzenlenerek matematiksel modelde kullanılacak hale getirilmiştir.

Ardından GAMS ortamında çözümü gerçekleştirilmiştir. Çözüm yöntemi olarak doğrusal optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Matematiksel model GAMS ortamında CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Problem ele alınırken kule vinç kaynağının bir taşıma kaynağı olması sebebi ile yenilenebilir kaynak dışında tutularak birtakım kısıtlar altında yerine mobil vinç kullanılarak maliyete etkisi de ele alınmıştır.

Bu kısıtlar şu şekildedir;

- i. Kule vinç montaj ve demontaj zamanları dikkate alınmamıştır,
- ii. Mobil vinç kule vincin olmadığı yerde kullanılacaktır,
- iii. Mobil vinç aynı günde en fazla 5 faaliyete kadar hizmet edebilmektedir.
- iv. Kule vinç betonarme imalatlar, duvar ve multipor imalatında kullanılacak, kule vinç veya mobil vinç kullanımına model karar verecektir.

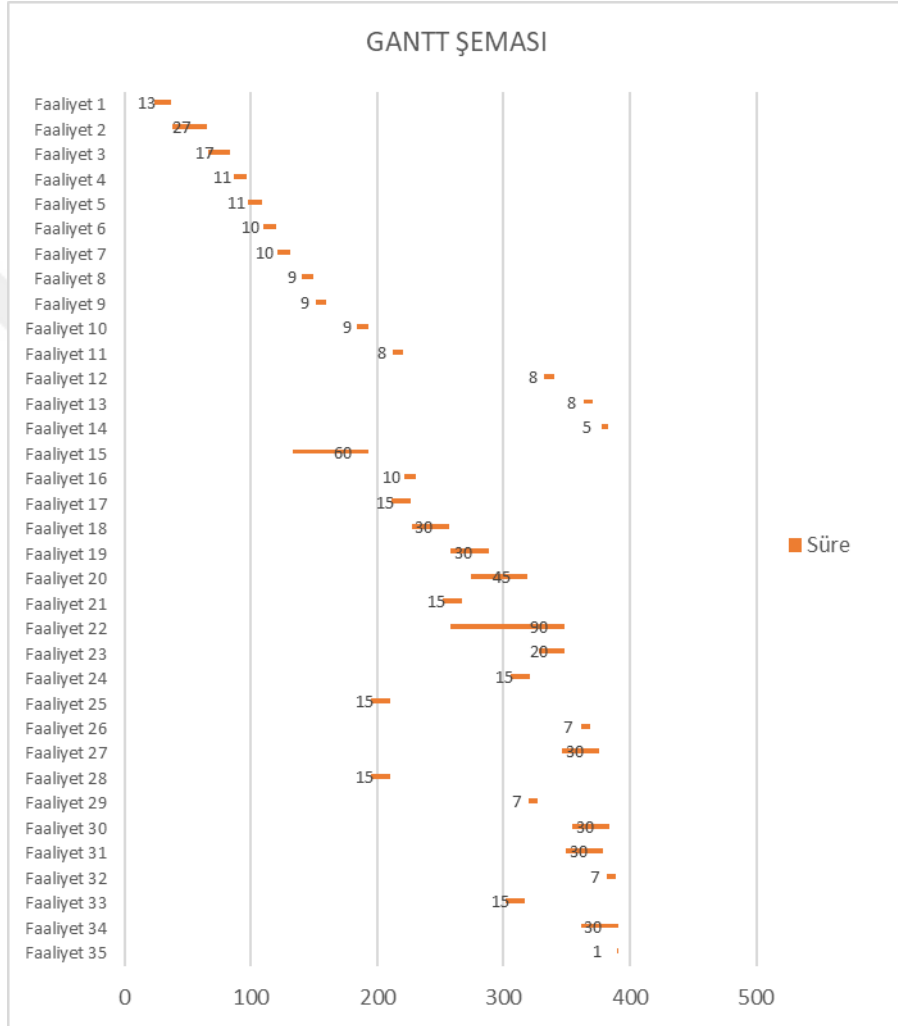
Bu kısıtlar doğrultusunda kule vinç yirmi dördüncü gün kurulmuş, üç yüz sekseninci gün demonte edilmiştir. Kule vinç montaj ve demontaj zamanı dikkate alınmamıştır. Elde edilen model sonucuna göre toplam proje süresi ve proje maliyeti çizelge 4. 6.'deki gibidir.

Çizelge 4.6. Proje Süresi ve Maliyeti

	Sonuç
Toplam Maliyet	15.596.496 TL
Toplam Proje Süresi	366 Gün

Proje faaliyet çizelgesi Şekil 4.6.'da yer almaktadır. Gantt şeması zaman planlaması için proje yönetimi alanında ilk kullanılan metodlardan biridir. Projeyi

oluşturan faaliyetlerin başlangıç - bitiş zamanlarını ve faaliyet sürelerini göstermektedir. Ayrıca kritik yol bilgisi de gantt şeması ile elde edilebilir.



Şekil 4.3. Gantt Şeması

Model sonucunda elde edilen gantt şeması incelendiğinde; gerçek proje uygulamasında 181. gün tamamlanan 14.faaaliyetin modelde 383. gün tamamlandığı görülmektedir. Gerçek proje uygulamasında 7-14 faaliyetler

arasında gerçekleşen faaliyetler birbirini takip eden ve tamamlanan faaliyetler iken, model bunların başlangıç ve bitiş zamanı öteleyip diğer faaliyetleri başlatarak zaman ve maliyet optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Bu proje çizelgelemesi gerçek proje uygulamalarında uygulanabilecek bir çizelgelemedir.

Şekil 4.3. incelendiğinde projeye ait 2 kritik yol belirlenmiştir. Kritik yollar ve kritik yol süreleri çizelge 4.7’da gösterilmiştir. Kritik yol süreleri hesaplandığında proje süresi 347 gün olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. Projeye Ait Kritik Yollar

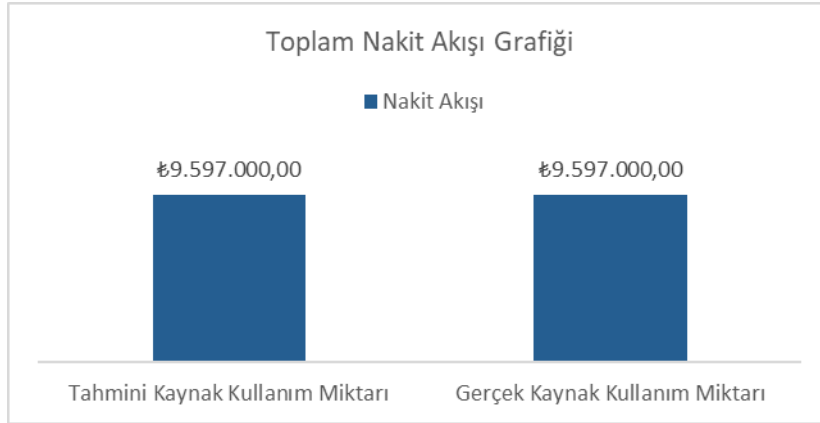
No	Kritik Yol	Süre
1	1-2-3-4-5-6-7-15-25-17-18-22-31-32-35	347 Gün
2	1-2-3-4-5-6-7-15-28-17-18-22-31-32-35	347 Gün

Proje için gerekli olan kaynaklar yenilenemeyen, yenilenebilen ve sabit kaynaklardır. Her dönemde sınırlı olarak ve yeniden kullanılabilen kaynak olan kule vinç modelde sabit kaynak olarak yer almıştır. Kullanımı faaliyetlerde kısıtlı olan ayrıca proje süresince toplam kullanımı kısıtlı olan kaynaklar yenilenemeyen kaynak olarak modelde yer almıştır.



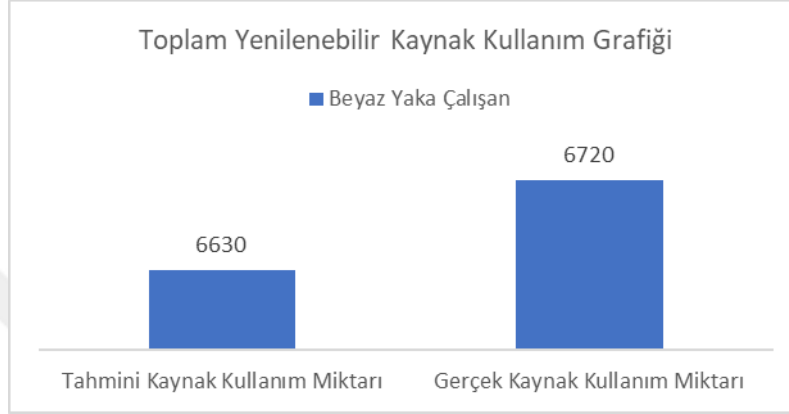
Şekil 4.4. Toplam Yenilenemeyen Kaynak Kullanımı

Yenilenemeyen kaynakların kullanımı ile ilgili Şekil 4.4.'de yer alan model sonuçları ve gerçek sonuçlar karşılaştırıldığında, sapmalar; beton ve demir kaynakları için ihmal edilebilir boyutta olmaları ile birlikte, tüm yenilenemez kaynaklarda sapma sıfır olmuştur. Yapılan çalışma yenilenemeyen kaynak kullanım miktarlarında güvenilir sonuç vermektedir.



Şekil 4.5. Toplam Nakit Akışı

Şekil 4.5.'de yer alan toplam nakit akışı grafiği incelendiğinde model sonucu ile gerçek nakit akışı arasında ihmal edilebilir boyutta sapma görülmemektedir.



Şekil 4.6. Toplam Yenilenebilir Kaynak Kullanım Grafiği

Şekil 4.6.'da yer alan toplam yenilenebilir kaynak kullanım grafiği incelendiğinde ise model sonuçları ile gerçek sonuçlar arasında sapma oranının %1 olduğu görülmektedir. Bu da yenilenebilir kaynakların güvenli bir şekilde modelden elde edilebileceğini göstermektedir.

Sonraki aşamada matematiksel model kullanılarak elde edilen sonuçların proje sonuçlarıyla karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşen projede yalnızca kule vinç kullanılmıştır ve tüm proje süresince varlığı mevcuttur. GAMS modelinde ise belirli bir zamandan sonra demonte edilerek mobil vinç kullanılmıştır. Bu veriler doğrultusunda toplam proje süresi ve toplam proje maliyeti tahminleri ve gerçekleştirmeleri çizelge 4.8'de yer almaktadır:

Çizelge 4.8. Problemin Çözüm Karşılaştırması

Program	Faaliyet Sayısı	Kaynak Sayısı	Süre	Maliyet
Gerçekleşen Proje	35	8	390 Gün	17.258.220 TL
GAMS	35	8	366 Gün	15.596.496 TL

Ele alınan inşaat projesi 390 günde tamamlanmıştır. Proje için gerekli kaynak maliyeti 17.258.220 TL'dir. Matematiksel model kullanılarak elde edilen sonuçlara göre toplam proje süresi tahmini 368 gün, toplam proje maliyeti tahmini ise 15.100.996 TL oluşmuştur. Oluşturulan model ile toplam proje süresi % 6,1; toplam proje maliyeti tahmini % 9,6 oranında daha iyi sonuç vermiştir.

Yapılan çalışma değerlendirildiğine, matematiksel model kullanılarak elde edilen toplam proje süresi, toplam proje maliyeti ve proje faaliyeti çizelgesi ile gerçekleşen proje verileri arasındaki sapmaların küçük olduğu ve model tahminlerinin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

4.5. Senaryo Analizleri

Ele alınan süreli sabit kaynak kullanılan KKPC problemlerinin çözümü için kullanılan matematiksel modelin farklı senaryolarda değerlendirilmesi bu bölümde yer almaktadır. Modelin incelenmesinde 3 grup senaryo analizi kullanılmıştır. Bunlardan ilki projenin yürütülmesinde kullanılan süreli sabit kaynak kullanım senaryo analizidir. İkinci grup senaryo analizi ise aylık finansal kısıt ile ilgili senaryo analizidir. Üçüncü grup senaryo analizinde ise kullanılan kaynakların türlerine göre analiz yapılmıştır.

4.5.1. Sabit Kaynak Kullanımı

Sabit kaynaklar projenin belirli bir zamanında gereksinim duyulan, proje gereksinimi ortadan kalktığı anda ise kullanımına son verilen kaynak türleridir. Ele alınan projede kule vinç sabit kaynağı kullanılmaktadır. Alternatif olarak mobil vinç kaynağı da bulunmaktadır. Mobil vinç kule vincin olmadığı durumlarda kullanılabilir. Farklı birim fiyatlarda kule vinç ve mobil vinç kullanımının proje süresi ve toplam proje maliyetine etkisi çizelge 4.9.'da yer almaktadır.

Çizelge 4.9. Sabit Kaynak - Alternatif Sabit Kaynak Kullanımı

Senaryo No	Kulevinç Br. Maliyeti (TL/gün)	Mobilvinç Br. Maliyeti (TL/gün)	Proje Süresi (gün)	Toplam Proje Maliyeti (TL)
1	450	1000	366	15.596.496
2	450	450	366	15.596.496
3	450	200	365	15.521.996
4	450	100	365	15.459.820

Yapılan senaryo analizinde kule vincin birim maliyeti sabit tutularak mobil vincin birim maliyetinin toplam proje maliyeti ve proje süresine etkisi gözlenmiştir. 1 ve 2 numaralı senaryolarda tüm faaliyetlerde yalnızca kule vinç kaynağı kullanılırken, 3 numaralı senaryoda 1,2,3,4,35 numaralı faaliyetlerde mobil vinç, kalan faaliyetlerde kule vinç kullanılmıştır. Son olarak 4 numaralı senaryoda yalnızca mobil vinç kullanılmıştır.

Modelde alternatif sabit kaynakların hizmet verebileceği maksimum faaliyet sayısını belirleyen kısıt da bulunmaktadır. Bu kısıtın kule vinç ve mobil vinç seçimine etkisini incelemek için kısıtı modelden kaldırdığımızda elde edilen sonuçlar çizelge 4.10.'da yer almaktadır.

Çizelge 4.10. Sınırsız Alternatif Sabit Kaynak Olması Durumunda Sabit Kaynak ve Alternatif Sabit Kaynak Kullanımı

Senaryo No	Kule vinç Br. Maliyeti (TL/gün)	Mobil vinç Br. Maliyeti (TL/gün)	Proje Süresi (gün)	Toplam Proje Maliyeti (TL)
1	450	1000	366	15.596.496
2	450	450	366	15.596.496
3	450	200	366	15.498.996
4	450	100	366	15.459.820

Çizelge 4.10. incelendiğinde, mobil vinçin hizmet verdiği faaliyet sayısı ile ilgili kısıtlama olmadığında, mobil vincin birim maliyeti düştükçe toplam proje maliyeti de azalmaktadır. Fakat proje süresinde etkisi olmamaktadır. 1 ve 2 numaralı senaryolarda yalnızca kule vinç kullanılırken, 3 ve 4 numaralı senaryolarda yalnızca mobil vinç kullanılmıştır.

Yapılan senaryo analizi neticesinde oluşturulan modelde kule vinç ve mobil vinç ile ilgili seçim konusunda temel faktör birim maliyetler olduğu kadar mobil vincin hizmet verebileceği faaliyet sayısı da olduğu görülmüştür.

4.5.2. Aylık Finansal Kısıt

Projelerin belirli bir nakit akışına sahip olması amacı ile koyulan aylık finansal kısıtın toplam proje süresine, toplam proje maliyetine etkileri ve aylık finansal kısıt tolerans aralı bu senaryoda incelenmiştir. Senaryo analizleri ve sonuçları çizelge 4.13.'de yer almaktadır. Modelde aylık finansal kısıt 2.000.000 TL olarak alınmıştır. Senaryo analizlerinde altında ve üstünde kalan değerler için sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 4.11. Aylık Finansal Kısıt Senaryo Analizleri

Senaryo No.	Aylık Finansal Kısıt(TL)	Toplam Proje Süresi (gün)	Toplam Proje Maliyeti (TL)
1	1.400.000	392	15.652.496
2	1.500.000	366	15.596.496
4	1.700.000	366	15.596.496
6	1.900.000	366	15.596.496
7	2.100.000	366	15.596.496
8	2.300.000	366	15.596.496
9	2.500.000	366	15.596.496
10	2.600.000	324	16.058.996

Aylık finansal kısıtlar ile ilgili yapılan senaryo analizleri neticesinde modele etki eden aylık finansal kısıt sınırı 1.400.000 TL olmuştur. Bu noktada proje süresi %6, toplam proje maliyeti ise %0,3 artmıştır. Projenin 390 günde tamamlanması için belirlenen minimum aylık finansal kısıt 1.500.000 TL olmuştur. Aylık finansal kısıtların artırıldığı senaryolarda ise proje süresi %11 kısalmış ve toplam proje maliyeti %2 artmıştır.

4.5.3. Kaynak Türüne Göre Kullanımı

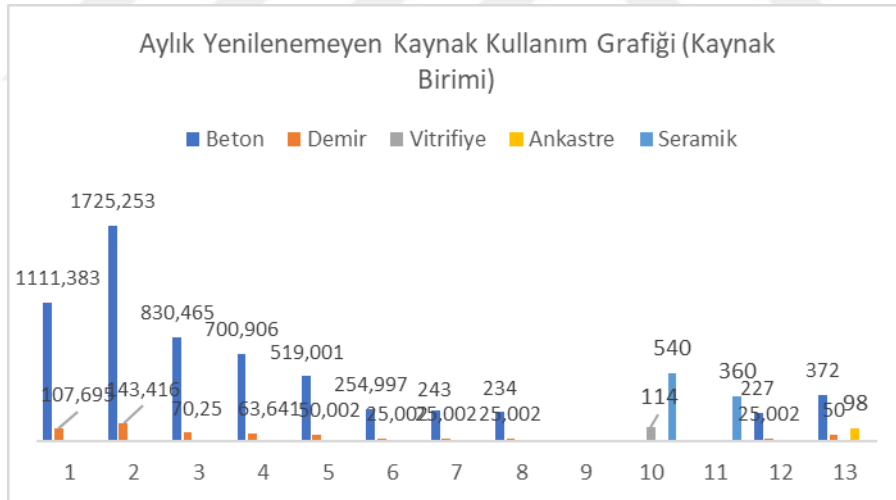
Ele alınan projede yenilenemez, yenilenebilir ve sabit kaynaklar kullanılmıştır. Bu senaryo analizinde ise yenilenemez ve yenilenebilir kaynaklar için analizi yapılmıştır.

Matematiksel modelde yer alan kaynakların tamamının yenilenemeyen kaynaklar olduğu durumu ele alındığında karmaşık öncüllük ilişkisi içinde faaliyet sayısına bağlı olarak amaç fonksiyonunun değişimi çizelge 4.12.'de yer almaktadır.

Çizelge 4.12. Yenilenemeyen Kaynaklı KKPC Problemi Sonuçları

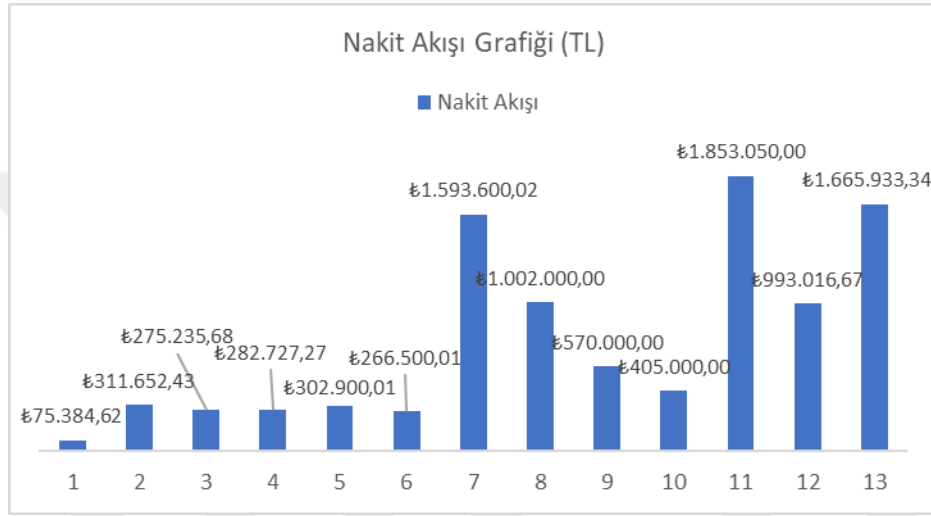
	Faal. Sayısı	Yenilenemez Kaynak Sayısı	Amaç Fonksiyonu (TL)
1	14	6	5.200.820
2	20	6	7.188.020
3	30	6	12.450.996
4	35	6	13.720.996
5	50	6	-
6	100	6	-

Yenilenemeyen kaynakların, 14 ile 100 faaliyet arasında, 6 kaynak için, karmaşık öncüllük ilişkisi içinde model sonuçları elde edilmiştir. Yenilenemeyen kaynaklar faaliyet boyunca kullanılıp tükenen kaynaklardır. Proje boyunca belirli bir miktarda mevcuttur, ve kullanıldıkça tükenir.



Şekil 4.7. Yenilenemeyen Kaynak Kullanımı

Şekil 4.7.'de 35 faaliyet için, nakit akışı dışında kalan yenilenemeyen kaynakların aylık olarak kullanım grafiği yer almaktadır. Nakit akışı dışında kalan, yenilenemeyen kaynak kullanımı ile ilgili dönemsel kısıt bulunmamaktadır, bu nedenle kaynak kullanımında dönemsel farklılıklar görülmektedir.



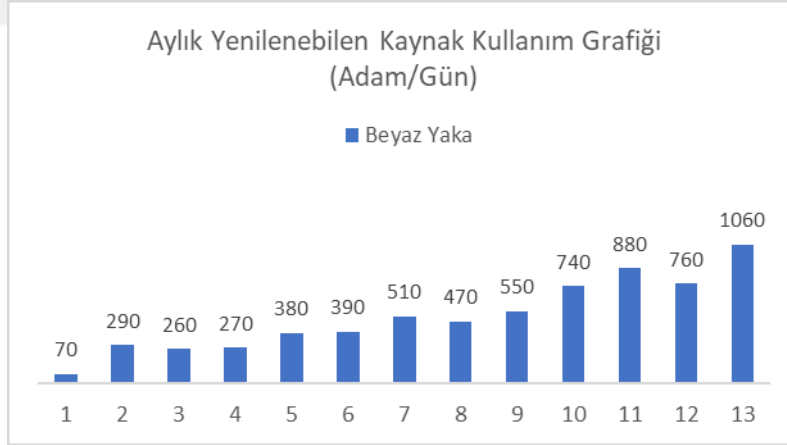
Şekil 4.8. Aylık Nakit Akışı Grafiği

Şekil 4.8.'de yer alan nakit akışı, yenilenemez bir kaynak türü olarak ele alınmıştır. Modellenirken aylık finansal kısıt koyulan nakit akışı, belirli bir miktarın üzerine çıkmayarak finansal denge sağlanmak istenmiştir. Finansal kısıt koyulmasındaki bir diğer amaç ise sınırsız nakit akışı sağlanmasının kaynakları bir anda kullanmaya iterek süre minimizasyonu sağlarken toplam proje maliyetinin artmasına sebep olabilmesidir.

Çizelge 4.13. Yenilenebilir Kaynaklı KKPC Problemi Sonuçları

	Faal. Sayısı	Yenilenebilir Kaynak Sayısı	Amaç Fonk. (TL)
1	14	1	596.000
2	20	1	1.546.000
3	30	1	2.766.000
4	35	1	3.395.000
5	50	1	-
6	100	1	-

Çizelge 4.13’de yer alan problemlerde bir adet yenilenebilir proje kaynağı kullanılan senaryoda faaliyet sayıları 14 ile 100 arasında ve karmaşık öncüllük ilişkisi içinde model sonuçları elde edilmiştir. Yenilenebilir proje kaynaklarının proje süresince kullanımını gösteren grafik Şekil 4.9’da yer almaktadır. Yenilenebilir kaynaklar kullanıldığı faaliyetlerde sabittir.



Şekil 4.9. Aylık Yenilenebilir Kaynak Kullanımı



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Çalışmanın Özeti

Proje yönetim kavramı, rekabet ortamında üstünlük sağlamak amacı ile ortaya çıkmış ve yıllardır üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Artan rekabet ile birlikte projenin zamanında bitmesi gereklilik haline gelmişken, kaynakların giderek kısıtlı hale gelmesi ile birlikte kısıtlı kaynak altında maliyetin azaltılması, karlılığın artırılması da proje yönetiminin olmazsa olmazları haline gelmiştir. Bu amaçla literatürde birçok çalışma yer almaktadır.

Bu çalışmada bir inşaat projesinin kısıtlı kaynaklar altında maliyet optimizasyonu problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemin çözümlenmesinde proje verileri 2021 yılında tamamlanan bir konut projesinden alınmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında matematiksel programlama modeli oluşturulmuştur. Model oluşturulurken hem zaman hem maliyet optimizasyonu hedeflenmiştir. Modelde proje maliyetini minimize ederken aynı zamanda optimum sürede bitmesi amaçlanmıştır. Modelde çoklu kaynak durumu mevcuttur. Kaynak kullanım maliyetlerinin faaliyetler arasında değişkenlik göstermediği varsayılmıştır, kaynak kullanım maliyeti zamandan bağımsızdır.

Çalışmanın ikinci aşamasında oluşturulan modelin doğruluğunu test etmek amacı ile PSPLIB model kütüphanesindeki veriler test edilmiştir. Modelin optimum sonuç verdiği görüldükten sonra üçüncü aşamaya geçilmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında senaryoların tasarımı tablosunda yer alan farklı büyüklükteki modeller üzerinde proje karmaşıklığı incelenmiştir. Modelin hangi büyüklükteki projeleri ne kadar sürede çözebildiği belirlenmiş ve bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında model gerçek proje verilerine uygulanmıştır. Model sonuçları gerçek proje verileri ile karşılaştırılmıştır. Modelin gerçek bir projede uygulanması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında senaryo analizleri yapılarak model performansı test edilmiştir. Sabit kaynak kullanımı ve alternatif sabit kaynak kullanımının, aylık finansal kısıtın ve kaynak türlerinin modele etkisi gözlenmiştir.

5.2. Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar iki başlıkta değerlendirilmektedir. Birinci başlık senaryo analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar, ikinci başlık ise gerçek proje uygulamasına ait sonuçlardır.

Tez çalışmasında yer alan KKPC probleminin çözümü için doğrusal optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Problem optimizasyon yöntemi ile optimal sürede çözülmüştür. Faaliyet sayısının 14-35 arasında faaliyet sayısının 4-8 arasında olduğu projeler için optimal sonuçlar elde edilmiştir. Daha büyük projelerde çözüm yönteminin yetersiz kaldığı görülmüştür.

Senaryo analizleri sonuçlarına göre, çözüm süresi ve optimal çözüme etki eden temel faktör proje büyüklüğü olmuştur. Faaliyet sayısı arttıkça çözüm süresi artmış ve 35 faaliyet üzeri için optimal sonuç alınamamıştır. Kaynak sayısı da çözüm süresini artıran bir etkidir.

Birinci grup senaryo analizi neticesinde sabit kaynak ve alternatif sabit kaynak kullanımına etki eden temel faktörler kaynakların birim maliyetleri ve alternatif sabit kaynağın hizmet edebileceği maksimum faaliyet sayısı olmuştur. Alternatif sabit kaynağın hizmet verebileceği maksimum faaliyet sayısı kısıtı koyulduğunda model sabit kaynak kullanmaya yönlendirirken, bu kısıt ortadan kaldırıldığında temel faktör birim maliyet olmuştur.

İkinci grup senaryo analizinde aylık finansal kısıtın proje süresi ve maliyetine etkisi gözlenmiştir. Yapılan senaryo analizlerinde proje süresi sabit tutulurken aylık finansal kısıtta yapılan değişiklikler sayesinde minimum aylık finansal akış tespit edilmiştir.

Son olarak literatürde yer alan farklı kaynak türlerine göre senaryo analizleri gerçekleştirilmiş, bu kaynak türlerinin proje üzerindeki etkisi görülmüştür.

Gerçek proje uygulamasında ise; modelden elde edilen sonuçlar ve gerçek proje verileri karşılaştırılmıştır. Böylelikle gerçek hayat problemlerinde uygulanması incelenmiştir. Projeye ait kaynak, öncüllük gibi faaliyetlerin gerçekleşmesi için gereken kısıtlar belirlenmiştir. Faaliyetler için gerekli olan kaynaklar sabit, yenilenebilen ve yenilenemeyen kaynaklar olmak üzere toplamda sekiz tanedir.

Problem çözümü için oluşturulan model çözülerek toplam proje maliyeti ve proje süresi elde edilmiştir. Model sonucuna göre proje çizelgesi, projeye ait kritik yollar ve kullanılan kaynak miktarları hesaplanmıştır.

Bu çalışmada yer verilen proje 390 günde, 17.258.220 TL maliyet ile gerçekleşmiştir. Model neticesinde tahmini proje süresi 366 gün, tahmini proje maliyeti ise 15.596.496 TL olmuştur. Matematiksel model sonucuna göre toplam proje süresi %6,1; toplam proje maliyeti %9,6 azalmıştır.

Projede 6218 m³ beton, 585 ton demir, 114 adet vitrifiye, 98 adet ankastre, 900 m² seramik, 6270 adam/gün işçilik ve 1 adet kule vinç kullanılmıştır. Model neticesinde ise 6218 m³ beton, 585 ton demir, 114 adet vitrifiye, 98 adet ankastre, 900 m² seramik, 6630 adam/gün işçilik kullanılmıştır. Matematiksel model kullanılarak yapılan tahminlemede yenilenemez kaynaklar sapma göstermemektedir. Yenilenebilir kaynaklar ise %1 oranında daha iyi sonuç vermiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde oluşturulan matematiksel modelin 35 faaliyete kadar proje çizelgelemesini doğru şekilde yapabileceği, proje maliyeti ve proje süresini doğru şekilde tahmin edebileceği sonucu çıkarılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma ile 35 faaliyete kadar olan alternatif sabit kaynaklar kullanılan proje çizelgeleme problemleri için yöntem geliştirilmiştir.

Daha büyük problemler için sezgisel yöntemler kullanılarak çözümler elde edilebilir.



KAYNAKÇA

- Afshar-Nadjafi, B., (2014b). Resource Constrained Project Scheduling Subject to Due Dates: Preemption Permitted with Penalty. *Advances in Operations Research*”, 2014.
- Ahn, T., & Erenguc, S. S., (1998). The Resource Constrained Project Scheduling Problem With Multiple Crashable Modes: a Heuristic Procedure. *European Journal of Operational Research*, 107(2), 250- 259.
- BARUTÇUGİL, İ., 1998, Üretim Sistemi Ve Yönetim Teknikleri, Uludağ Üniversitesi Yayınları, Bursa, 56.
- Choi, B. C., & Park, M. J., (2015). A Continuous Time–Cost Tradeoff Problem With Multiple Milestones And Completely Ordered Jobs”, *European Journal of Operational Research*. 244(3), 748-752.
- Davis, E. W., Patterson, j. H., (1975). A Comparison of Heuristic and Optimum Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling. *Management Science*, 21(8), 944-955.
- García-Nieves, J. D., Ponz-Tienda. J. L., Ospina-Alvarado. A., Bonilla-Palacios M., (2019). Multipurpose Linear Programming Optimization Model for Repetitive Activities Scheduling in Construction Projects. *Automation in Construction*, 105(2019) 102799
- Habibi, F., Barzinpour, F., Sadjadi, S. J., (2017). Resource-constrained Project Scheduling Problem: Review of Past and Recent Developments. *Journal of Project Management*, 3 (2018) 55–88
- HALAÇ, O., 1983, Kantitatif Karar Verme Teknikleri, Cilt 1. İ.Ü No: 3078.
- Hartmann, S., Briskorn, D., (2021). An Updated Survey of Variants and Extensions of the Resource-constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*,

- Jing-wen, Z., & Hui-fang, S. (2010). Multi-Resource Constrained Discrete Time/Cost Tradeoff Problem And Its Improved Genetic Algorithm. In Management Science and Engineering (ICMSE), 2010 International Conference on (pp. 123-128). IEEE.
- Khalilzadeh, M., Kianfar, F., Shirzadeh Chaleshtari, A., Shadrokh, S., & Ranjbar, M. (2012). A Modified PSO Algorithm For Minimizing the Total Costs of Resources in MRCPSP. Mathematical Problems in Engineering, 2012.
- Karshenas, S., & Haber, D., (1990). Economic Optimization Of Construction Project Scheduling. Construction Management and Economics, 8(2), 135-146.
- Karaca, T., (2011). Proje Yönetiminde Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerini Kullanarak Kritik Yolun Belirlenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Konstantinidis, P. D. (1998). A Model to Optimize Project Resource Allocation By Construction Of A Balanced Histogram. European journal of operational research, 104(3), 559-57
- Lester A., 1991. Project Planning and Control. Butterworth-Heinmann
- Levine, H. A. (2002). Practical Project Management Tips, Tactics, and Tools. John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, Z., & Zheng, Y. (2008, July). Resource-Constrained Multiple Projects Scheduling With The Objective Of Minimizing Activities Cost. In 2008 Chinese Control and Decision Conference (pp. 1027-1032). IEEE.
- Montoya-Torres, J. R., Solano-Charris, E. L., & Duran-Cantor, C. (2012). Memetic Algorithm to Minimize Costs Of Activities in RcpSP. Dyna, 79(174), 86-95.
- Nonobe, K., & Ibaraki, T. (2006). A Metaheuristic Approach to the Resource Constrained Project Scheduling With Variable Activity Durations and

- Convex Cost Functions. In *Perspectives in Modern Project Scheduling* (pp. 225-248). Springer US.
- Nübel, H. (2001). The Resource Renting Problem Subject to Temporal Constraints. *OR-Spektrum*, 23(3), 359-381.
- Özdamar, L., Ulusoy, G., (1995). A Survey on the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *IIE Transactions*, 27: 574-586.
- Özsu, M.T., 1986. *Proje Planlama ve Denetim Teknikleri*. Türkiye Bilişim Derneği Yayınları.
- Palacio, J. D., & Larrea, O. L., (2016). A Lexicographic Approach to the Robust Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *International Transactions in Operational Research*.
- Schwindt, C., (2000). Minimizing Earliness-Tardiness Costs of Resource-Constrained Projects. In: Inderfurth K., Schwödiauer G., Domschke W., Juhnke F., Kleinschmidt P., Wäscher G. (eds) *Operations Research Proceedings 1999. Operations Research Proceedings 1999 (Selected Papers of the Symposium on Operations Research (SOR '99) Magdeburg, September 1–3, 1999)*, vol 1999. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Shadrokh, S. (2010). The Preemptive Resource-Constrained Project Scheduling Problem Subject to Due Dates and Preemption Penalties: An Integer Programming Approach. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 35-39
- Shadrokh, S., & Kianfar, F. (2007). A Genetic Algorithm for Resource Investment Project Scheduling Problem, Tardiness Permitted With Penalty. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 86- 101.
- Song, Y., Liu, J., Wimmers, M. O., & Jiang, Z. (2015, May). A Differential Evolution Algorithm with Local Search For Resource Investment Project Scheduling Problems. In *2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1725-1731). IEEE.

- Suwa, H. & Morita, D. (2016). Reactive Project Scheduling Method to Enhance Project Progress Under Uncertainty. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10(3), JAMDSM0051-JAMDSM0051.
- Ulusoy, G., (2000). Proje Planlamada Kaynak Kısıtlı Çizelgeleme. Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, Orhanlı, Tuzla, 81474 İstanbul
- Yang, K.K., Talbot, F.B., Patterson, J.H., 1992. Scheduling a Project to Maximize its Net Present Value: An Integer Programming Approach. *European Journal of Operational Research*, 64, 188-198
- Yuan, X., Liu, J., & Wimmers, M. O. (2015, May). A Multi-Agent Genetic Algorithm with Variable Neighborhood Search for Resource Investment Project Scheduling Problems. In 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) (pp. 23-30). IEEE.
- Zamani, R. (2013). An Evolutionary Search Procedure for Optimizing Time–Cost Performance of Projects under Multiple Renewable Resource Constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 451- 460.
- Zhenyuan, L., & Hongwei, W. (2006). Heuristic Algorithm for RCPSP with The Objective Of Minimizing Activities' Cost. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 17(1), 96-102.
- Zoraghi, N., Shahsavar, A., Abbasi, B., & Van Peteghem, V. (2017). Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Material Ordering under Bonus–Penalty Policies. *Top*, 25(1), 49-79.



EKLER



EK 1: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 1 – 14 FAALİYET 4**KAYNAK**

Faal. No.	Süre (Gün)	Öncüllük	Kaynaklar					
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	140000	10	1	0
2	27	1	907	60	290000	10	1	0
3	17	2	562	50	180000	10	1	0
4	11	3	295	25	115000	10	1	0
5	11	4	273	25	115000	10	1	0
6	10	5	267	25	105000	10	1	0
7	10	6	259	25	105000	10	1	0
8	9	7	260	25	95000	10	1	0
9	9	8	255	25	95000	10	0	1
10	9	9	243	25	95000	10	0	1
11	8	10	234	25	85000	10	0	1
12	8	11	227	25	85000	10	0	1
13	8	12	218	25	85000	10	0	1
14	5	13	154	25	71000	10	0	1

EK 2: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 2 – 20 FAALİYET 4**KAYNAK**

Faal. No.	Süre (Gün)	Öncüllük	Kaynaklar					
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	10	1	0
2	27	1	907	60	0	10	1	0
3	17	2	562	50	0	10	1	0
4	11	3	295	25	0	10	1	0
5	11	4	273	25	0	10	1	0
6	10	5	267	25	0	10	1	0
7	10	6	259	25	0	10	1	0
8	9	7	260	25	0	10	1	0
9	9	8	255	25	0	10	1	0
10	9	9	243	25	0	10	1	0
11	8	10	234	25	0	10	1	0
12	8	11	227	25	0	10	1	0
13	8	12	218	25	0	10	1	0
14	5	13	154	25	0	10	1	0
15	60	7	0	0	0	10	1	0
16	10	10	0	0	0	10	1	0
17	15	25,28	0	0	0	10	0	1
18	30	17	0	0	0	10	0	1
19	30	18	0	0	0	10	0	1
20	45	19	0	0	900	10	0	1

EK 3: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 3 – 30 FAALİYET 4**KAYNAK**

Faal. No.	Süre (Gün)	Öncüllük	Kaynaklar					
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	10	1	0
2	27	1	907	60	0	10	1	0
3	17	2	562	50	0	10	1	0
4	11	3	295	25	0	10	1	0
5	11	4	273	25	0	10	1	0
6	10	5	267	25	0	10	1	0
7	10	6	259	25	0	10	1	0
8	9	7	260	25	0	10	1	0
9	9	8	255	25	0	10	1	0
10	9	9	243	25	0	10	1	0
11	8	10	234	25	0	10	1	0
12	8	11	227	25	0	10	1	0
13	8	12	218	25	0	10	1	0
14	5	13	154	25	0	10	1	0
15	60	7	0	0	0	10	1	0
16	10	10	0	0	0	10	1	0
17	15	25,28	0	0	0	10	0	1
18	30	17	0	0	0	10	0	1
19	30	18	0	0	0	10	0	1
20	45	19	0	0	0	10	0	1
21	15	16	0	0	0	10	0	1
22	90	18	0	0	0	10	0	1
23	20	24	0	0	0	10	0	1
24	15	19,21	0	0	0	10	0	1
25	15	15	0	0	0	10	0	1
26	7	25	0	0	0	10	0	1
27	30	12	0	0	0	10	0	1
28	15	15	0	0	0	10	0	1
29	7	28	0	0	114	10	0	1
30	30	14	0	0	0	10	0	1

EK 4: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 4 – 35 FAALİYET 4**KAYNAK**

Faal. No.	Süre (Gün)	Öncüllük	Kaynaklar					
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	10	1	0
2	27	1	907	60	0	10	1	0
3	17	2	562	50	0	10	1	0
4	11	3	295	25	0	10	1	0
5	11	4	273	25	0	10	1	0
6	10	5	267	25	0	10	1	0
7	10	6	259	25	0	10	1	0
8	9	7	260	25	0	10	1	0
9	9	8	255	25	0	10	1	0
10	9	9	243	25	0	10	1	0
11	8	10	234	25	0	10	1	0
12	8	11	227	25	0	10	1	0
13	8	12	218	25	0	10	1	0
14	5	13	154	25	0	10	1	0
15	60	7	0	0	0	10	1	0
16	10	10	0	0	0	10	1	0
17	15	25,28	0	0	0	10	0	1
18	30	17	0	0	0	10	0	1
19	30	18	0	0	0	10	0	1
20	45	19	0	0	0	10	0	1
21	15	16	0	0	0	10	0	1
22	90	18	0	0	0	10	0	1
23	20	24	0	0	0	10	0	1
24	15	19,21	0	0	0	10	0	1
25	15	15	0	0	0	10	0	1
26	7	25	0	0	0	10	0	1
27	30	12	0	0	0	10	0	1
28	15	15	0	0	0	10	0	1
29	7	28	0	0	114	10	0	1
30	30	14	0	0	0	10	0	1
31	30	22,23,24	0	0	0	10	0	1
32	7	31	0	0	0	10	0	1
33	15	22	0	0	0	10	0	1
34	30	33	0	0	0	10	0	1
35	1	26,29	0	0	0	10	0	1

EK 5: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 5 – 50 FAALİYET 4**KAYNAK**

Faal. No.	Süre (Gün)	Öncüllük	Kaynaklar					
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	10	1	0
2	27	1	907	60	0	10	1	0
3	17	2	562	50	0	10	1	0
4	11	3	295	25	0	10	1	0
5	11	4	273	25	0	10	1	0
6	10	5	267	25	0	10	1	0
7	10	6	259	25	0	10	1	0
8	9	7	260	25	0	10	1	0
9	9	8	255	25	0	10	1	0
10	9	9	243	25	0	10	1	0
11	8	10	234	25	0	10	1	0
12	8	11	227	25	0	10	1	0
13	8	12	218	25	0	10	1	0
14	5	13	154	25	0	10	1	0
15	60	7	0	0	0	10	1	0
16	10	10	0	0	0	10	1	0
17	15	25,28	0	0	0	10	0	1
18	30	17	0	0	0	10	0	1
19	30	18	0	0	0	10	0	1
20	45	19	0	0	0	10	0	1
21	15	15	0	0	0	10	0	1
22	90	18	0	0	0	10	0	1
23	20	24	0	0	0	10	0	1
24	15	19,21	0	0	0	10	0	1
25	15	15	0	0	0	10	0	1
26	7	25	0	0	0	10	0	1
27	30	12	0	0	0	10	0	1
28	15	15	0	0	0	10	0	1
29	7	28	0	0	114	10	0	1
30	30	14	0	0	0	10	0	1
31	30	22,23,24	0	0	0	10	0	1

32	7	31	0	0	0	10	0	1
33	15	22	0	0	0	10	0	1
34	30	33	0	0	0	10	0	1
35	1	26,29	0	0	0	10	0	1
36	7	30	0	0	0	10	1	0
37	1	17	0	0	0	10	1	0
38	30	37	0	0	0	10	1	0
39	15	19	0	0	0	10	1	0
40	7	30	0	0	0	10	1	0
41	5	17	0	0	0	10	1	0
42	30	41	0	0	0	10	1	0
43	5	25	0	0	0	10	1	0
44	30	30	0	0	0	10	1	0
45	7	34	0	0	0	10	1	0
46	15	32	0	0	0	10	1	0
47	30	31	0	0	0	10	1	0
48	15	46	0	0	0	10	1	0
49	15	17	0	0	0	10	1	0
50	1	17	0	0	0	10	1	0

EK 6: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 6 – 14 FAALİYET 7**KAYNAK**

Faal No.	Süre (Gün)	Öncüllü k	Kaynaklar								
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenemez K4	Yenilenemez K5	Yenilenemez K6	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	0	0	140000	10	1	0
2	27	1	907	60	0	0	0	290000	10	1	0
3	17	2	562	50	0	0	0	180000	10	1	0
4	11	3	295	25	0	0	0	115000	10	1	0
5	11	4	273	25	0	0	0	115000	10	1	0
6	10	5	267	25	0	0	0	105000	10	1	0
7	10	6	259	25	0	0	0	105000	10	1	0
8	9	7	260	25	0	0	0	95000	10	1	0
9	9	8	255	25	0	0	0	95000	10	0	1
10	9	9	243	25	0	0	0	95000	10	0	1
11	8	10	234	25	0	0	0	85000	10	0	1
12	8	11	227	25	0	0	0	85000	10	0	1
13	8	12	218	25	0	0	0	85000	10	0	1
14	5	13	154	25	0	0	0	71000	10	0	1

EK 7: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 7 – 20 FAALİYET 7**KAYNAK**

Faal No.	Süre (Gün)	Öncüllü k	Kaynaklar								
			YenilenemezK1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenemez K4	Yenilenemez K5	Yenilenemez K6	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	0	0	140000	10	1	0
2	27	1	907	60	0	0	0	290000	10	1	0
3	17	2	562	50	0	0	0	180000	10	1	0
4	11	3	295	25	0	0	0	115000	10	1	0
5	11	4	273	25	0	0	0	115000	10	1	0
6	10	5	267	25	0	0	0	105000	10	1	0
7	10	6	259	25	0	0	0	105000	10	1	0
8	9	7	260	25	0	0	0	95000	10	1	0
9	9	8	255	25	0	0	0	95000	10	0	1
10	9	9	243	25	0	0	0	95000	10	0	1
11	8	10	234	25	0	0	0	85000	10	0	1
12	8	11	227	25	0	0	0	85000	10	0	1
13	8	12	218	25	0	0	0	85000	10	0	1
14	5	13	154	25	0	0	0	71000	10	0	1
15	60	7	0	0	0	0	0	343000	10	0	1
16	10	10	0	0	0	0	0	521000	10	0	1
17	15	25,28	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
18	30	17	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
19	30	18	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
20	45	19	0	0	0	0	900	270000	10	0	1

EK 8: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 8 – 30 FAALİYET 7**KAYNAK**

Faal · No.	Süre (Gün)	Öncüllü k	Kaynaklar								
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenemez K4	Yenilenemez K5	Yenilenemez K6	Yenilenemez K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	0	0	140000	10	1	0
2	27	1	907	60	0	0	0	290000	10	1	0
3	17	2	562	50	0	0	0	180000	10	1	0
4	11	3	295	25	0	0	0	115000	10	1	0
5	11	4	273	25	0	0	0	115000	10	1	0
6	10	5	267	25	0	0	0	105000	10	1	0
7	10	6	259	25	0	0	0	105000	10	1	0
8	9	7	260	25	0	0	0	95000	10	1	0
9	9	8	255	25	0	0	0	95000	10	0	1
10	9	9	243	25	0	0	0	95000	10	0	1
11	8	10	234	25	0	0	0	85000	10	0	1
12	8	11	227	25	0	0	0	85000	10	0	1
13	8	12	218	25	0	0	0	85000	10	0	1
14	5	13	154	25	0	0	0	71000	10	0	1
15	60	7	0	0	0	0	0	343000	10	0	1
16	10	10	0	0	0	0	0	521000	10	0	1
17	15	25,28	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
18	30	17	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
19	30	18	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
20	45	19	0	0	0	0	900	270000	10	0	1
21	15	16	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
22	90	18	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
23	20	24	0	0	0	0	0	247000	10	0	1
24	15	19,21	0	0	0	0	0	683000	10	0	1
25	15	15	0	0	0	0	0	430000	10	0	1
26	7	25	0	0	0	0	0	400000	10	0	1
27	30	12	0	0	0	0	0	276000	10	0	1
28	15	15	0	0	0	0	0	1000000	10	0	1
29	7	28	0	0	114	0	0	850000	10	0	1
30	30	14	0	0	0	0	0	296000	10	0	1

EK 9: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 9 – 35 FAALİYET 7**KAYNAK**

Faal · No.	Süre (Gün)	Öncüllü k	Kaynaklar								
			YenilenemezK1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenemez K4	Yenilenemez K5	Yenilenemez K6	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	0	0	140000	10	1	0
2	27	1	907	60	0	0	0	290000	10	1	0
3	17	2	562	50	0	0	0	180000	10	1	0
4	11	3	295	25	0	0	0	115000	10	1	0
5	11	4	273	25	0	0	0	115000	10	1	0
6	10	5	267	25	0	0	0	105000	10	1	0
7	10	6	259	25	0	0	0	105000	10	1	0
8	9	7	260	25	0	0	0	95000	10	1	0
9	9	8	255	25	0	0	0	95000	10	0	1
10	9	9	243	25	0	0	0	95000	10	0	1
11	8	10	234	25	0	0	0	85000	10	0	1
12	8	11	227	25	0	0	0	85000	10	0	1
13	8	12	218	25	0	0	0	85000	10	0	1
14	5	13	154	25	0	0	0	71000	10	0	1
15	60	7	0	0	0	0	0	343000	10	0	1
16	10	10	0	0	0	0	0	521000	10	0	1
17	15	25,28	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
18	30	17	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
19	30	18	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
20	45	19	0	0	0	0	900	270000	10	0	1
21	15	16	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
22	90	18	0	0	0	0	0	270000	10	0	1
23	20	24	0	0	0	0	0	247000	10	0	1
24	15	19,21	0	0	0	0	0	683000	10	0	1
25	15	15	0	0	0	0	0	430000	10	0	1
26	7	25	0	0	0	0	0	400000	10	0	1
27	30	12	0	0	0	0	0	276000	10	0	1
28	15	15	0	0	0	0	0	1000000	10	0	1
29	7	28	0	0	114	0	0	850000	10	0	1
30	30	14	0	0	0	0	0	296000	10	0	1
31	30	22,23,24	0	0	0	0	0	1100000	10	0	1
32	7	31	0	0	0	98	0	0	10	0	1
33	15	22	0	0	0	0	0	85000	10	0	1
34	30	33	0	0	0	0	0	85000	10	0	1
35	1	32	0	0	0	0	0	0	10	0	1

EK 10: SENARYOLARIN TASARIMI ÇİZELGESİ 10 – 50 FAALİYET 7**KAYNAK**

Faal No.	Süre (Gün)	Öncüllü k	Kaynaklar								
			Yenilenemez K1	Yenilenemez K2	Yenilenemez K3	Yenilenemez K4	Yenilenemez K5	Yenilenemez K6	Yenilenebilir K4	Sabit Kynk	Alt. Sbt. Kynk
1	13	-	2064	200	0	0	0	140000	1	0	1
2	27	1	907	60	0	0	0	290000	1	0	1
3	17	2	562	50	0	0	0	180000	1	0	1
4	11	3	295	25	0	0	0	115000	1	0	1
5	11	4	273	25	0	0	0	115000	1	0	1
6	10	5	267	25	0	0	0	105000	1	0	1
7	10	6	259	25	0	0	0	105000	1	0	1
8	9	7	260	25	0	0	0	95000	1	0	1
9	9	8	255	25	0	0	0	95000	1	0	1
10	9	9	243	25	0	0	0	95000	1	0	1
11	8	10	234	25	0	0	0	85000	1	0	1
12	8	11	227	25	0	0	0	85000	1	0	1
13	8	12	218	25	0	0	0	85000	1	0	1
14	5	13	154	25	0	0	0	71000	1	0	1
15	60	7	0	0	0	0	0	343000	1	0	1
16	10	10	0	0	0	0	0	521000	1	0	1
17	15	25,28	0	0	0	0	0	270000	0	1	0
18	30	17	0	0	0	0	0	270000	0	1	0
19	30	18	0	0	0	0	0	270000	0	1	0
20	45	19	0	0	0	0	900	270000	0	1	0
21	15	16	0	0	0	0	0	270000	0	1	0
22	90	18	0	0	0	0	0	270000	0	1	0
23	20	24	0	0	0	0	0	247000	0	1	0
24	15	19,21	0	0	0	0	0	683000	0	1	0
25	15	15	0	0	0	0	0	430000	0	1	0
26	7	25	0	0	0	0	0	400000	0	1	0
27	30	12	0	0	0	0	0	276000	0	1	0
28	15	15	0	0	0	0	0	1000000	0	1	0
29	7	28	0	0	114	0	0	850000	0	1	0

30	30	14	0	0	0	0	0	296000	0	1	0
31	30	22,23,24	0	0	0	0	0	1100000	0	1	0
32	7	31	0	0	0	98	0	0	0	1	0
33	15	22	0	0	0	0	0	85000	0	1	0
34	30	33	0	0	0	0	0	85000	0	1	0
35	1	26,29	0	0	0	0	0	0	0	1	0
36	7	30	0	0	0	0	0	56000	1	0	1
37	1	17	0	0	0	0	0	25000	1	0	1
38	30	37	0	0	0	0	0	42000	1	0	1
39	15	19	0	0	0	0	0	58000	1	0	1
40	7	30	0	0	0	0	0	62000	1	0	1
41	5	17	0	0	0	0	0	75000	1	0	1
42	30	41	0	0	0	0	0	63000	1	0	1
43	5	25	0	0	0	0	0	29000	1	0	1
44	30	30	0	0	0	0	0	41000	1	0	1
45	7	34	0	0	0	0	0	23000	1	0	1
46	15	32	0	0	0	0	0	75000	1	0	1
47	30	31	0	0	0	0	0	95000	1	0	1
48	15	46	0	0	0	0	0	0	1	0	1
49	15	17	0	0	0	0	0	0	1	0	1
50	1	17	0	0	0	0	0	0	1	0	1