

**TAAHHÜTLER ALTINDA PROJE PLANLAMASI İÇİN
DİNAMİK KARAR VERME MODELİ YAKLAŞIMI**

**DYNAMIC DECISION MODEL APPROACH FOR
PROJECT PLANNING UNDER COMMITMENTS**

ÖZGE DEMİR ÖZCAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ BANU YÜKSEL ÖZKAYA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

TAAHHÜTLER ALTINDA PROJE PLANLAMASI İÇİN DİNAMİK KARAR VERME MODELİ YAKLAŞIMI

Özge DEMİR ÖZCAN

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Banu YÜKSEL ÖZKAYA

Mayıs 2022, 85 sayfa

Farklı alanlarda faaliyet gösteren bir çok şirket imzaladıkları sözleşmeler için çeşitli projeler yürütmektedir. Bu sözleşmeler ile firmalar bazı taahhütlerde bulunmakta olup gerçekleştirilememesi durumunda ceza ve yaptırımlar ile karşılaşmaktadır. Bu sebeple, sözleşme doğrultusunda yerine getirilmesi gereken taahhüt için kısıtlı zaman, bütçe ve kaynaklar ile projelerin dinamik bir şekilde planlanmasına ve yönetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında, zaman taahhüdünün dikkate alındığı Markov Karar Süreci modeli ve sezgisel yaklaşım önerilmiştir.

Projede çalışanların bilgileri ve tecrübeleri ile geçmiş verilerden yararlanılarak seri ve paralel bağlı aktivitelerin gerçekleşebileceği minimum ve maksimum iş yükleri gerçeğe yakın olarak belirlenmektedir. Aktivitelerin öncül-ardıl ilişkisi ve hesaplanan maksimum süreleri üzerinden kritik yol yöntemi ile projenin tamamlanacağı en uzun süre hesaplanmaktadır. Model, maksimum iş yükü için gerçekleşecek en uzun süreden geriye doğru minimizasyon problemi olarak çözülerek projenin tamamlanacağı en iyi ortalama süre bulunmaktadır. Özellikle yoğun iş yükünün olduğu büyük kapsamlı projelerin çok sayıda seri-paralel aktivitelerden oluşması, birçok farklı kaynağın süreçte kullanılması, durum değişkeni sayısının ve belirsizlikler dolayısıyla geçiş olasılığı

yelpazesinin büyüklüğü modelin dinamik olarak planlamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, aktivite ilerlemelerinin planlanan aktivite süreleri ile belirli bir algoritma sayesinde karşılaştırıldığı ve alınacak aksiyona karar verilen bir karar kuralı geliştirilmiştir. Oluşturulan karar kuralı ile model farklılaştırılmış ve sezgisel bir model önerilmiştir. Zaman taahhüdü dolayısıyla proje başında sözleşmede taahhüt edilen süre dikkate alınmıştır. Sezgisel model ile başlangıçta taahhüt edilen proje süresine daha yakın gerçekleştirmelerin oluşması sağlanmıştır. Ayrıca, her periyotta alınacak aksiyon belirlendiği için oluşan işlem yükü azalmıştır.

Oluşturulan modeller farklı proje ağları için çözdürülmüştür. Aktivite bağlantılarına ve büyüklüklerine göre projeler için kullanılması uygun olan modellere ve parametrelere değinilmiştir. Markov karar modeli ile sezgisel modelin sonuçları arasındaki kıyaslama sayesinde kısıt değerlerinde ve parametrelerde güncelleme yapılabilmektedir. İşlem yükünü daha da azaltmak için projelerin iş paketlerine ayrılarak planlanması ve yürütülmesi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Markov Karar Süreci, Proje Planlama, Kısıtlı Dinamik Programlama, Kritik Yol Yöntemi, Taahhüt, Sezgisel Yaklaşım

ABSTRACT

DYNAMIC DECISION MODEL APPROACH FOR PROJECT PLANNING UNDER COMMITMENTS

Özge DEMİR ÖZCAN

Master of Science, Department of Industrial Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Banu YÜKSEL ÖZKAYA

May 2022, 85 pages

Many companies operating in different fields carry out various projects for the contracts they. Companies make some commitments with these contracts. If these commitments are not fulfilled, penalties and sanctions occur. In order to fulfill the conditions required by the contract, projects must be dynamically planned and managed with limited time, budget and resources. Time commitment has been considered within the scope of the study and Markov decision process model and heuristic approach are proposed.

The minimum and maximum workloads of the activities are determined close to reality by utilizing the knowledge and experience of the employees in the project and historical data. The longest time that the project can be completed is calculated by the critical path method by using the predecessor and successor relationship and the calculated maximum durations of the activities. The model optimizes the average longest time for the project by using minimization function and finds the average best time through backward formulation. In a project having heavy workloads, the presence of many serial and parallel activities, the use of too many resources, and a wide range of transition probabilities make it difficult to plan the project dynamically. The progress of the activities and their planned durations were compared with a certain algorithm and a

decision rule was developed in which the action to be taken was decided. By using the decision rule, the model is differentiated and a heuristic model is created. Due to the time commitment, the time promised in the contract at the beginning of the project was taken into account. By using the heuristic model, realizations closer to the time promised at the beginning of the project were achieved. In addition, since the action was determined in each period, the computational effort was reduced.

The created models were solved for different project networks. According to the activity links and sizes, suitable models for the projects and the parameters to be used have been determined. By comparing the results of the Markov decision model and the heuristic model, the constraint values and parameters in the models can be updated. In order to reduce the processing load, it has been proposed to divide the projects into work packages.

Keywords: Markov Decision Process, Project Planning, Constrained Dynamic Programming, Critical Path Method, Commitment, Heuristic Approach

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitim süreçlerim ile tez çalışmam boyunca karşılaştığım tüm sorunlarda her daim anlayışlı, sabırlı ve güleryüzlü bir şekilde bana verdiği destek ve değerli katkıları için sevgili danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Banu YÜKSEL ÖZKAYA'ya,

Bu süreçte yardımını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşan, moral veren tüm arkadaşlarıma,

Hayatım boyunca her koşulda yanımda olduklarını hissettiğim, bugünlere gelmemi sağlayan aileme,

Bu süreci benimle beraber yaşayan, attığım her adımda yanımda olup beni destekleyen sevgili eşime,

Sonsuz teşekkür ederim.

Özge DEMİR ÖZCAN

Mayıs 2022, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE METODOLOJİ	4
2.1. Sözleşme Tasarımı.....	4
2.2. Tekli Proje Ortamlarında Proje Planlama.....	6
2.3. Çoklu Proje Ortamlarında Proje Planlama	12
2.4. Tezin Literatüre Katkısı.....	15
2.5. Metodoloji	18
3. PROBLEM TANIMI VE MODEL	21
3.1. Problem Karakteristikleri ve Model Varsayımları	21
3.2. Model Kurgusu.....	26
3.2.1. Karar Noktaları.....	26
3.2.2. Durum Değişkeni ve Durum Değişkenleri Uzayı	26
3.2.3. Aksiyonlar	28
3.2.4. Ödüller.....	29
3.2.5. Geçiş Olasılıkları.....	30
3.2.6. Amaç Fonksiyonu ve Optimalite Denklemi.....	37
3.3. Deterministik Proje Planlama.....	38
3.3.1. Karar Noktaları.....	38
3.3.2. Durum Değişkeni ve Durum Değişkenleri Uzayı	38
3.3.3. Aksiyonlar	38
3.3.4. Ödüller.....	39

3.3.5. Geçiş Olasılıkları	39
3.3.6. Amaç Fonksiyonu ve Optimalite Denklemi	41
3.4. Modelde Uygulanabilecek Özel Durumlar	43
3.4.1. Modelin Sabit Kaynak Durumu	43
3.4.2. Modelin Sınırsız Kaynak Durumu	45
4. SEZGİSEL POLİTİKA VE PERFORMANSI	48
4.1. Sezgisel Model.....	48
4.2. Performans Değerlendirme Çalışması	52
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	58
6. KAYNAKLAR	61
EKLER.....	64
EK 1 – Örnek Projede Kritik Yol Yöntemi Çözümü.....	64
EK 2 – Proje Aktivite Ağ Tabloları	65
EK 3 – 6 Numaralı Proje Ağı Veri Kümesi	67
EK 4 – Performans Tablosu.....	84
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Proje Üçgeni.....	1
Şekil 2.1	Kritik Yol Yönteminde Aktivite Değişkenleri.....	18
Şekil 3.1	Kesikli Zaman Markov Karar Süreci Yapısı.....	22
Şekil 4.1	Süre Grafiği.....	54
Şekil 4.2	Fazla Mesai Aksiyon Sayısı Grafiği	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 2.1 Dinamik Proje Planlama Kapsamında İncelenen Çalışmaların Özeti	16
Tablo 2.2 Proje Aktivite İlişkileri	20

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$a_n(s)$	Proje n. periyot başında ve s durumunda iken alınan aksiyon kümesi
$A(s)$	Proje s durumunda iken alınabilecek aksiyon kümesi
B_i	i. aktivitenin tamamlanması için gereken minimum iş yükü
c	Aynı periyotta devam eden paralel aktivite sayısı
D_n	n. periyot başında devam eden aktivite kümesi
E_k	k aktivitesinin tamamlanması için gereken iş yükü
F_n	n. periyot başına kadar fazla mesai ile yapılan iş yükü
$f_n(s)$	n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek en iyi ortalama süre
$f_n^1(s)$	Sabit kaynak durumunda n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek ortalama süre
$f_n^2(s)$	Sınırsız kaynak durumunda n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek ortalama süre
GF_n	n. periyotta fazla mesai ile tamamlanan iş yükü
G_n	n. periyot başında devam eden aktivitelerde tamamlanan iş yükü kümesi
$g_n(s)$	Sezgisel modelde n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek ortalama süre
$GS_{n,k}$	n. periyot başına kadar k. aktivitede tamamlanan iş yükü
H_i	i. aktivitenin planlanan süresi
I	Projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken aktivite kümesi
i	Projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken aktivite indeksi

k	Devam eden aktiviteleri belirten indeks
kk	Paralel bağılı aktivitelerden kritik olan aktiviteyi belirten indeks
L_i	i. aktivitenin tamamlanması için gereken maksimum iş yükü
m	Projede fazla mesai ile tamamlanmasına izin verilen maksimum iş yükü
N	Projenin tamamlanması için gereken maksimum periyot
n	Projenin her bir karar noktasını temsil eden periyot
$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k))$	n. periyot başında devam eden k aktivitesinde $GS_{n,k}$ kadar iş yükü tamamlanmışken $SA_n(k)$ aksiyonu alındığında $GS_{n+1,k}$ kadar iş yükü tamamlanması olasılığı
$P_{sj}(a)$	Proje s durumunda iken a aksiyonu alındığında j durumuna geçme olasılığı
$r_n(s,a)$	n. periyot başında s durumunda iken a aksiyonu alındığında elde edilecek ödül
$SA_n(k)$	n. periyot başında devam eden k. aktivite için alınacak aksiyon
S_n	n. periyot başında proje durumunu tanımlayan durum değişkeni
t_f	Bir aktivitede birim periyotta fazla mesai ile tamamlanabilecek iş yükü
T_n	n. periyot başında tamamlanmış olan aktivite kümesi
X_i	Parametreleri $[B_i, L_i]$ olan tekdüze dağılıma sahip iş yükü.
x_1	Projede planlanan sürenin ne kadarına ulaştığını belirten parametre
y	Kritik yol üzerindeki tamamlanmış aktiviteleri belirten indeks

Kısaltmalar

AA	Yaklaşık Çözüm
ADP	Yaklaşık Dinamik Programlama

ALP	Yaklaşık Doğrusal Programlama
CPM	Kritik Yol Yöntemi
CPU	Merkezi İşlem Birimi
CTMDP	Sürekli Zamanlı Markov Karar Süreci
DTMDP	Kesikli Zaman Markov Karar Süreci
EF	En Erken Bitiş
ES	En Erken Başlangıç
GSM	Altın Arama Yöntemi
LF	En Geç Bitiş
LP	Doğrusal Programlama
LS	En Geç Başlangıç
MDP	Markov Karar Süreci
MM-RCPSP	Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi
moEDA	Çok Amaçlı Tahmin Dağıtım Algoritması
MSPSP	Çoklu Beceri Proje Çizelgeleme Problemi
NP	Doğrusal Olmayan Programlama
PERT	Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği
rcPSP	Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi
SCOP	Stokastik Sıkıştırma Projesi
S-mrcPSP	Stokastik Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi
SRCPSP-URA	Belirsiz Kaynak Kullanımlı Stokastik Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi
TF	Toplam Bolluk
VNS	Değişken Komşuluk Araması

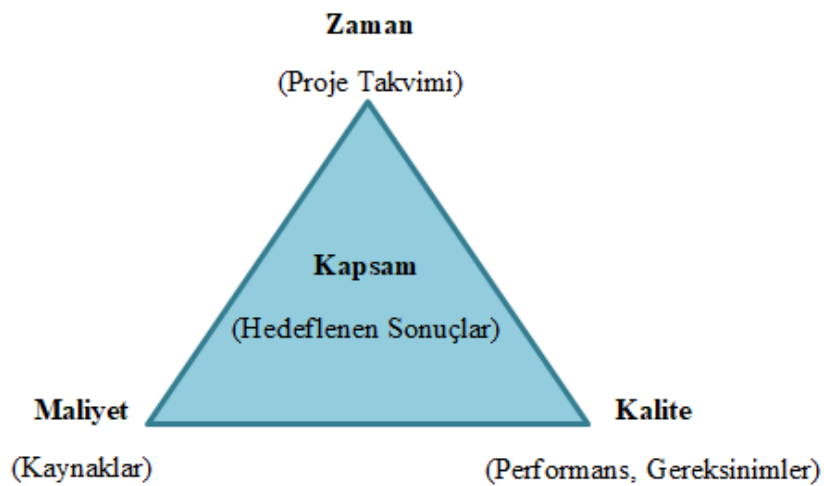
1. GİRİŞ

Günümüzde farklı sektörlerde özellikle iş dünyasında başarıyı elde etmek için planlı ve sistematik bir süreç işletmek önem verilen konulardan bir tanesidir. Geliştirme yaparken, ürün üretirken, hizmet verirken, değişiklikleri veya riskleri yönetirken zamanı ve kaynakları en etkili şekilde kullanmak etkin bir proje yönetimi ile mümkün olabilmektedir. Küçük ya da büyük birçok şirket, her projenin belirli zamanlarda tamamlanması gereken kilometre taşlarının olduğu ve aynı kaynakların ortaklaşa kullanıldığı birçok projeye sahiptir.

Proje, tanımlı bir takvim, maliyet ve performans parametreleri dahilinde belirli bir amaca ulaşmak için bir kişi veya kurum tarafından üstlenilen, belirli başlangıç ve bitiş noktalarına sahip benzersiz bir koordineli faaliyetler dizisi olarak tanımlanmaktadır. Genellikle işin bir parçası olarak tanımlanan ve projede belirtilen bu hedefler üç temel kriteri sağlamalıdır (Lester, 2004).

1. Proje, zamanında tamamlanmalıdır.
2. Proje, bütçelenen maliyet dahilinde gerçekleştirilmelidir.
3. Proje, öngörülen kalite gereksinimlerini karşılamalıdır.

Bu kriterler, iyi bilinen proje üçgeni ile Şekil 1.1'de grafiksel olarak temsil edilmektedir.



Şekil 1.1 Proje Üçgeni

Belirli bir amaç doğrultusunda başlangıcı ve bitişi belirli olan aktiviteler kümesinden oluşan projelerde her aktivitenin kendi içerisinde bir amacı, süresi ve ihtiyaç duyduğu işgücü, malzeme veya makine gibi kaynakları vardır. Her aktivite diğer aktivitelere öncül ve ardıl ilişkileri ile bağlanmıştır. Aktiviteler paralel veya seri olarak ilerleyebilmektedir (Jansen, 2019). Bu sebeple proje süresini belirleyen kritik aktivitelerdeki gecikmeler diğer aktivitelerin geç başlamasına ve zamanında aksiyon alınmazsa sonunda projenin gecikmesine neden olabilmektedir. Özellikle büyük ölçekli projelerde benzer aktiviteler iş paketleri altında gruplanarak daha kolay yönetilebilmektedir. Her iş paketi genel olarak ardışık devam eden, benzer kabiliyetlere sahip kişiler tarafından yürütülen aktiviteleri içermektedir ve her iş paketinin bir iş paketi sorumlusu olmaktadır. İş paketi içerisinde yer alan tüm aktiviteler tamamlandığında iş paketi de tamamlanmış olur. Benzer şekilde, projeyi oluşturan tüm iş paketleri tamamlandığında proje tamamlanmış demektir.

Belirli sözleşmeler doğrultusunda yerine getirilmesi gereken bir amaç için kısıtlı zaman, bütçe ve kaynaklar ile projelerin planlanması ve yönetilmesi şirketler açısından karmaşık ve maliyetli bir iştir. Ayrıca, sözleşmeler kapsamında verilmiş olan zaman, teknik gereksinimler, yerlilik gibi taahhütlerin planlanan şekilde yerine getirilememesi durumunda karşılaşılabilecek yaptırımlar ve ceza ödemeleri de şirketlerin kârlılığını azalttığından, proje yönetimi önem verilmesi ve özen gösterilmesi gereken bir konu olmuştur. Özellikle, yüksek teknoloji alanında çalışan ve Ar-Ge faaliyetlerinin yoğun olduğu firmaların yürüttükleri projelerde, tasarım süreçlerinin belirsizliği nedeniyle belirli zamanlarda tamamlanması taahhüt edilen kilometre taşlarının gerçekleştirilmesi oldukça zordur ve disiplinli bir proje yönetimi gerektirmektedir. Bir projede, proje faaliyetlerini ve teslim aşamasını etkileyen ve sonuçlardan etkilenen paydaşlar yer almaktadır. Projenin planlanmasından ve etkili bir şekilde yürütülmesinden bir proje yöneticisi liderliğinde kurulmuş olan proje ekibi sorumludur. Bu ekip, proje süresi boyunca projedeki ilgili işlerin planlanmasında, koordine edilmesinde, kontrolünde ve gerekli kararların alınarak aksiyonların oluşturulmasında rol alan, şirketin farklı bölümlerindeki temsilcilerden oluşmaktadır.

Proje başlamadan hatta teklif aşamasında birçok belirsizlik ve kısıt altında projenin planlanması ve bu plan doğrultusunda bazı taahhütlerin verilmesi dinamik proje planlamanın gerekliliğini ortaya çıkaran etmenlerdendir. Bu planlama, herhangi bir anda

duruma göre projede gerekli aksiyonların alınmasını sağlamaktadır. Literatürde dinamik proje planlama konusunda genellikle sözleşme tasarımı, teklif, üretim planlama, lojistik gibi projenin belirli bir aşamasına odaklanan çalışmalar bulunmaktadır. Bu tez kapsamında ise dinamik proje planlama için proje ömrünü ele alan Markov Karar Süreci oluşturulmuştur. Oluşturulan model çerçevesinde amaç, durumlar, alınabilecek aksiyonlar, durumlar arası geçiş olasılıkları ve ödüller belirlenmiştir. İmzalanan sözleşmeler ile projelerde kilometre taşlarının tamamlanacağı süreler taahhüt edildiğinden, çalışma kapsamında zaman taahhüdü dikkate alınmıştır. Hedeflenen sürenin en uygun şekilde karşılanabilmesi için varsayımlar ve kısıtlar altında belirli durumlarda ilgili aksiyonların alınması için karar modeli oluşturulmuştur. Taahhüt ve kısıtlı kaynaklar doğrultusunda karar kümesi sınırlandırıldığından problem zorlaşmıştır. Projede aynı zamanda gerçekleştirilebilecek aktivite sayısı arttıkça, modelin durum uzayının eleman sayısı artmaktadır. Oluşturulan model kapsamında kısa sürede sonuç verebilecek bir sezgisel politikaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, her karar noktasında proje planı ile projedeki ilerlemeler bir algoritma doğrultusunda karşılaştırılmış ve karar kuralı elde edilmiştir. Bu karar kuralı kullanılarak model farklılaştırılmış ve sezgisel model oluşturulmuştur. Sezgisel modelin ve farklı kısıtlar altında Markov karar modelinin gösterdikleri performanslar değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasının 2. Bölümünde literatürde yer alan ilgili çalışmalara yer verilecektir. 3. Bölümde modelde kullanılan notasyon ve varsayımlara, modelin bileşenlerine, kısıtlar altında modelde uygulanabilecek özel durumlara ve dinamik proje planlama kapsamında deterministik duruma değinilecektir. 4. Bölümde taahhütler altında uygulanabilecek sezgisel politika sunulacak ve 5. Bölümde çalışmaların sonuçlarına ve değerlendirmelere yer verilecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE METODOLOJİ

Dinamik proje planlama kapsamında sözleşmelerde yer alan taahhütler planlamanın hedefini ve çerçevesini gösterirken, projenin yürütüldüğü proje ortamı ise kaynak kullanımını konusundaki kısıtları ve diğer durumları belirlemektedir. Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamında literatürde yer alan sözleşme tasarımı, tekli ve çoklu proje ortamlarında proje planlama konularındaki benzer çalışmalar ve ek olarak kullanılacak metodoloji incelenmiştir. Bu çalışmalar ve tezin literatüre olan katkısı aşağıda başlıklar halinde detaylı sunulmuştur. Ayrıca, incelenen çalışmalar ile bu tez çalışmasının temel kriterleri ve tezin literatürdeki diğer çalışmalardan farkı Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

2.1. Sözleşme Tasarımı

Dawande ve Janakiraman (2019) projelerin gittikçe artan karmaşıklığından ve dış kaynak kullanımındaki artıştan yola çıkarak birden fazla görevden oluşan projeleri yürütmek için firmaların karşılaştığı sözleşme tasarım problemini incelemiştir. Sözleşmeye göre işi yapan şirket, görevleri yerine getirirken sürekli olarak harcama yapmasına rağmen ödülü veya geliri ancak proje tamamlandığında alabilmektedir. Firmanın sözleşme tasarım kararları, beklenen indirimli karı maksimize etme hedefleri ile belirlenmiştir. Bu çerçevede hem paralel projeler hem de ardışık projeler için en uygun sözleşmeler türetilmiştir.

Yang v.d. (2016) tarafından görev tamamlama zamanlarının belirsiz ve bulanık değişkenler ile tanımlandığı, farklı taşeronlar tarafından sırayla gerçekleştirilen birden fazla görevden oluşan bir projeyi yürüten proje yöneticisi için teşvik sözleşmesi tasarım problemi ele alınmıştır. Beklenen bir değer kriteri ve kritik bir değer kriteri temelinde, iki bulanık eş seviyeli programlama modeli sınıfı geliştirilmiştir. Belirsiz görev tamamlama zamanlarının karşılıklı olarak bağımsız olduğu durumlarda, her bir model ilk olarak yapısal özelliklerden faydalanılarak birden çok eşdeğer alt modele ayrıştırılmıştır. Her bir alt model için iki aşamalı bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Belirsiz görev tamamlama zamanlarının bağıntılı olduğu daha genel bir durumda, genellikle net eşdeğerlerine dönüştürülmesi zor olan bulanık parametreleri içeren nesnel işlevleri değerlendirmek için ilk önce yaklaşık çözüm (AA) tekniği uygulanmıştır. Daha sonra, altın arama yöntemi (GSM) ve değişken komşuluk araması (VNS) ile entegre edilmiş AA tabanlı bir hibrit genetik algoritma, önerilen bulanık eşdeğer programlama modellerini çözmek için tasarlanmıştır. Son olarak, modelleme

fikrini ve önerilen yöntemlerin etkinliğini göstermek için bir inşaat projesinin sayısal bir örneği verilmiştir.

Her proje detaylı bir planlama gerektirmeyebilir ve her gecikme bir bildirim ihtiyacı duymayabilir. Bu durumların göz ardı edilmesi bazı maliyetleri azaltabilir. Bu nedenle Hou v.d. (2019) proje katılımcıları arasındaki planlama ve bilgi paylaşımı için uygun seviyenin netleştirilmesi için modeller önermiştir. Özellikle, proje yöneticisi tarafından görev sahibine hangi bilgilerin veya bildirimlerin verileceği ve bu bilgilerin ne zaman verilmesi gerektiği konusunda çalışmaları incelemektedir. Çalışma kapsamında, birkaç bildirim politikası tanımlanmıştır. Problemlerin özel durumları için en uygun politikaları ve genel durumları için doğrulanmış sezgisel politikaları önermişlerdir. Ayrıca, istatistiksel bir analiz ile politika performansını ve sağlamlığını etkileyen kilit faktörler tanımlanmıştır. Bu maliyetlerin ana bileşenleri, proje programının ilerisinde olduğunda üretim süresini azaltmadaki başarısızlığın fırsat maliyetini ve proje programının gerisinde olduğunda boşa kalan kaynakların fırsat maliyetini içerir. Sorunun en genel versiyonu sayısal olarak çözülemez olsa da, basit ve makul ölçüde doğru bir yaklaşım prosedürü sağlayabilmişlerdir. Hesaplama sonuçları, bu prosedürün önemli maliyet tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çok fazla veya çok az bildirim sorumlu olabileceği durumları inceleyerek en uygun maliyetli bildirim sıklığı üzerine fikirler üretmişlerdir. Son olarak, çalışma geleneksel ve çevik proje yönetim metodolojileri arasında seçim yapılmasını sağlamaktadır. Çalışma neticesinde bazı politika önerileri sunulmuştur. Birincisi, temel hat çizelgeleme olmadan tek bir karar noktası kullanmaktır. Özellikle çok öncelik kısıtı bulunan ve yüksek değişkenliğe sahip büyük ölçekli projelerde ortalama diğer politikalarından daha iyi performans göstermektedir. İkinci olarak, bir temel hat çizelgelemenin olduğu ve birden fazla karar noktasının kullanıldığı politikadır. Özellikle çok öncelik kısıtı bulunan, yüksek değişkenliğe sahip büyük ağlar için ve ayrıca rezervasyon maliyetinin önemli olduğu durumlarda önerilir. Üçüncüsü, iş süresi değişkenliğinin düşük olduğu ve nispeten önemli bir rezervasyon maliyetinin olduğu durumlarda, PERT kullanılarak başlangıçta planlanan bir çizelgeleme ile basit ve ekonomik olarak uygulanabilir bir yaklaşımdır. Sonuç olarak, çalışmaları ile proje şirketlerini ilgilendiren konularda gelecekteki araştırmaları teşvik etmişlerdir.

Wang v.d. (2017) bir proje yöneticisinin iki farklı taşeron tarafından sırayla gerçekleştirilen iki görevden oluşan bir projeyi işlettiği bir proje yönetimi ortamındaki

karar kriterlerinin teşvikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Tamamlanma süresi, taşeronun görevlerinin gözlemlenemeyen çabasına bağlı olan belirsiz bir değişken olarak tanımlanmıştır. Belirsizlik teorisi çerçevesinde, beklenen değer kriteri ve kritik değer kriteri altında dört belirsiz model sınıfı sunulmuştur. Yapısal özelliklere göre, her model iki eşdeğer alt modele ayrılmıştır. Sözleşmeler arasındaki ara bağlantılar tartışılmıştır. Son teslim tarihine dayanan en uygun teşvik sözleşmesinin, kritik değer kriterini benimseyen tarafın (proje yöneticisi veya taşeronun) güven düzeyine bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, taşeronun tutuculuk düzeyi artışı ile teşvik katsayıları artarken, proje yöneticisinin tutuculuk düzeyindeki artış ile teşvik katsayılarının düştüğü belirtilmiştir. Son olarak, bazı özel güven seviyeleri için dört modelin de eşdeğer olduğu bulunmuştur.

Projelerde işbirliği yapan tarafların çabalarını senkronize etmeleri gerekmektedir. Bu nedenle zaman içerisinde daha az değişkenliğe sahip yeniden planlama yapmaları gerekmektedir. Proaktif-reaktif programlama bu tür durumlarda önemlidir. Genel olarak, paylaşılan ortak bir program üzerinde ve sapma cezaları ile senkronizasyona ulaşılmaktadır. Bu durum esneklik getirmediğinden, çözüm yöntemleri temel çizelgeyi hiçbir zaman proaktif olarak güncelleyememektedir. Brcic v.d. (2019) proje işbirliğinin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesinin sağlanması yönünde sapma cezaları için eşik temelli maliyet fonksiyonlarını önermişlerdir. Stokastik süreler için iki meta-sezgisel yaklaşım sunmuşlardır; kullanıma sunma tabanlı ve yinelemeli politika araştırması. Bu yaklaşımların ikisi de mevcut en iyi yöntemle kıyasla önemli maliyet-performans iyileştirmesi elde etmede fırsatları kullanmaktadır.

2.2. Tekli Proje Ortamlarında Proje Planlama

Ürünleri müşteriye sunma sürecinde tasarım ve mühendisliğin büyük bir rol oynadığı şirketler tarafından kabul edilmeye başlanmıştır. Etkili ürün geliştirme konusunda ilerleme kaydedilmiş olsa da birçok firma tarafından geliştirme süreci arzu edilen şekilde ilerlememektedir. Repenning (2000) yaptığı çalışma ile firmaların yaşadığı zorlukları açıklayan bir hipotez üzerinde çalışarak bir model geliştirmiştir. İlk olarak analiz ile makul bir varsayımlar kümesi altında ürün geliştirme sistemlerinin çok sayıda kararlı durum yürütme moduna sahip olduğu gösterilmiştir. İkinci olarak analiz, çoklu dengelerin var olması için pozitif bir dengenin hakim olması gerektiğini vurgulamıştır. Üçüncü olarak analiz, sistemin dinamiklerine duyarlılığının kaynakların kullanılmasıyla belirlendiğini göstermiştir. Dördüncüsü, simülasyon deneyleri test gecikmelerinin de

sistemin dinamiklerini belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Son olarak, yeni geliştirme araçlarının tanıtılması ve performans iyileştirme politikaları tartışılmıştır.

Dinamik programlama, sıralı problemleri çözmek için kullanılan genel tekniklerden birisidir. Konuyla ilgili ilk kapsamlı kitaplar Bellman (1957) ve Howard (1960) tarafından yazılmıştır. Markov Karar Sürecinde (MDP) en uygun politikayı belirlemek için geriye dönük çıkarım, değer iterasyonu, politika iterasyonu ve doğrusal programlama kullanılan en önemli yöntemlerdir. Markov Karar Süreçleri, geçişlerin aynı deterministik sürelerle sahip olduğu belirli bir zamanda olduğu için üstel olarak dağıtılmış geçiş süreleriyle sürekli zamanlı Markov Karar Süreçlerine doğrudan uygulanamaz. Bu durumu aşmak için Lippman (1975) verilen sürekli bir Markov Karar Sürecinin (CTMDP) ayrı bir MDP'ye eşdeğer CTMDP'e dönüştürülmesini içeren biçimleme önermiştir. Bir diğer önemli problem ise durum uzayının çok büyük olmasından kaynaklı dinamik programlama metodolojilerinin bellek gereksiniminin ve hesaplama yükünün zorluğudur. Durum uzayına ek olarak aksiyon kümeleri, geçiş olasılıkları da göz önüne alındığından boyut olarak çok yükselmektedir. Bu durumu önlemek için Yaklaşık Dinamik Programlama (ADP-Approximate Dynamic Programming) düşünülmüştür. Bu model durum değişkenlerine ve değer fonksiyonunun iyi bir yaklaşımının elde edileceği serbest parametrelere bağlıdır. Serbest parametrelerin kullanıldığı bu yaklaşım 2'ye ayrılır; simülasyon bazlı yaklaşım ve simülasyon bazlı olmayan yaklaşım.

Simülasyon temelli yaklaşımlara genel olarak güçlendirici öğrenme ve nöro-dinamik programlama denilmektedir. Temel amaç sistemi simule etmektir. Gözlemler gerçek ancak bilinmeyen değer fonksiyonunun gözlemlerini oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu gözlemler stokastik yaklaşım metodolojileri aracılığıyla değer fonksiyonunun yaklaşımlarını elde etmede kullanılmaktadır. Simülasyon temelli yaklaşımların en büyük avantajlarından biri, geçiş olasılıklarının dağılımını sağlayan bir sistem modeline ihtiyaç duyulmamasıdır. Bunun yanında hesaplama yükü ağır olabilmektedir.

Simülasyona dayanmayan yaklaşımlardan, Yaklaşık Doğrusal Programlama (ALP-Approximate Linear Programming) iyi bilinmektedir. ALP ilk olarak Schweitzer ve Seidman (1985) tarafından önerilmiş ve eşdeğer bir doğrusal program (LP) olarak bir MDP'nin formülasyonuna dayandırılmıştır. Böylece, değer fonksiyonu, karar değişkenlerinin sayısını azaltacak şekilde doğrusal bir yaklaşım mimarisi ile

değiştirilmektedir. Bununla birlikte, kısıtların sayısı büyüktür. Bu durum kısıt azaltma, kısıt örnekleme veya LP'nin primal veya duali üzerinde sütun oluşturma ile çözülebilmektedir. Simülasyona dayanmayan başka bir yaklaşım ise Bellman hatasının minimize edilmesidir.

Proje çizelgeleme kısmında ise literatürü proje varışları ve proje verileri hakkındaki bilgiye göre 2 kriterde sınıflandırmışlardır. Projenin gelmesiyle ilgili olarak, tüm projelerin mevcut olduğu ve başlangıcında başlatılabilenleri statik durum; projelerin zaman içinde ulaştıklarını dinamik durum olarak almışlardır. Varış zamanları, süreler ve kaynak talepleri gibi tüm proje verilerinin belirleyici olduğu deterministik durum ile proje verilerinin stokastik olduğu stokastik durum arasında ayırım yapılmaktadır. Bu ayrımlar doğrultusunda 4 alt başlık oluşturmuşlardır. Bunlar; 1. Statik-deterministik proje çizelgeleme, 2. Dinamik-deterministik proje çizelgeleme, 3. Statik-stokastik proje çizelgeleme ve 4. Dinamik-stokastik proje çizelgelemedir.

Proje çizelgeleme, optimizasyon gerektiren pek çok kaynak türünü ve etkinliğini içeren karmaşık bir süreçtir. Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi (rcPSP), proje süresini en aza indirmek için bir projenin faaliyetlerinin planlanmasını gerektiren NP zor problemlerden biridir. Bu çalışma ile Hao v.d. (2014) tarafından sürelerin belirsizliği ile stokastik çok modlu kaynak kısıtlı proje planlama problemi (S-mrcPSP) sunulmuştur. S-mrcPSP'yi çözmek için çok amaçlı tahmin dağıtım algoritması (moEDA) önerilmiştir. Önerilen moEDA ile karar değişkenleri arasındaki etkilerin yönlendirilmemiş bir grafik modeli olarak temsil edildiği Markov ağ modelleme aktivite ataması kullanılmıştır. Ayrıca, daha iyi performans elde etmek için gevşeklik tabanlı sezgisel yöntem benimsenirken sağlamlığı ölçmek için gevşeklik tabanlı metrik tabanlı değerlendirme algoritması kullanılmıştır.

Mitchell ve Klastorin (2007) görev sürelerinin rastgele olduğu durumdaki karmaşık bir proje planlama problemi üzerinde çalışmıştır. Özellikle, doğrudan, dolaylı ve teşvik edici maliyetlerin toplamının beklenen toplam maliyetini minimize etmek için görev sürelerinin sıkıştırılma miktarı karar verme problemini ele almıştır. Problem, görev sürelerinin negatif bir üstel dağılım ile modellenebileceği varsayımı ile başlamış ancak daha sonra varsayım gevşetilmiş ve metodolojinin herhangi bir genel dağılıma uygulanabileceği gösterilmiştir. Bu problem için Stokastik Sıkıştırma Projesi (SCOP) algoritması olarak adlandırılan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Sayısal testler ile bu algoritmanın daha önce bildirilen sezgisel yaklaşımlardan daha iyi performans

gösterdiği ve kullanımının basit olduğu açıklanmıştır. Sonuç olarak, klasik PERT modeli gibi deterministik yaklaşımın çözümü tarafı sonuçlar verdiği ve kaçınılması gerektiği gösterilmiştir.

Klastorin ve Mitchell (2013) tarafından yapılmış olan çalışma kapsamında proje süresinde yıkıcı bir olayın meydana gelmesi durumunda karmaşık bir proje planlama problemi ele alınmıştır. Böyle bir aksaklık durumunda, tüm faaliyetler bir süre boyunca durmasına rağmen genel giderler ve dolaylı maliyetler olası ceza masraflarının yanı sıra tahakkuk etmeye devam etmektedir. Böyle bir olayın olasılığı hakkında bilgi verildiğinde riskten bağımsız bir proje yöneticisinin projenin beklenen maliyetini en aza indirmek için alacağı kararlar ve aksiyonlar üzerinde çalışılmıştır. Problem stokastik bir dinamik programlama problemi olarak formüle edilmiştir. Sayısal bir örnek ile algoritma ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Felberbauer v.d. (2019) stokastik proje zamanları ve personel sayılarındaki belirsizlik varsayımıyla personel problemi için iki çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Projede her iş paketi için stokastik bir iş gücü gerekmektedir. Tüm projelerin belirli bir periyotta tamamlanması gerekir. Birbirlerinden bağımsızdırlar fakat aynı kaynakları kullanırlar. İş paketi ihtiyacı, mevcut insan kaynağı ile karşılanamazsa dış kaynaklara ödeme yapılarak karşılanmaktadır. Amaç dış kaynaklara yapılan ödemeyi minimize etmektir. İlk olarak sezgisel bir çözüm yaklaşımı ile problem, proje zamanlama ve personel alt problemlerine ayrılmıştır. Proje zamanlama alt problemine yerel sezgisel yaklaşım uygulanırken personel alt problemi için Frank-Wolfe algoritması kullanılmıştır. İkinci çözüm yaklaşımı olan örnek ortalama yaklaşımında ise CPLEX tarafından çözülebilen karışık tamsayı programlama formülasyonu oluşturulmuştur. Sonuç olarak, küçük ve orta ölçekli test örnekleri için sezgisel yaklaşım daha iyi iken orta ve üstü ölçekli test örneklerinde örnek ortalama yaklaşımının daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Model risksizdir, birkaç küçük veya orta ölçekli proje ve uzun vadeli bir bakış açısıyla çoklu proje yönetimi durumuna iyi uyum sağlamaktadır, ancak çok büyük sorunların belirli risklere neden olduğu bir durum için artık uygun olmayabilir. Bu tür durumlar için, riske karşı optimizasyon yaklaşımlarına yapılan uzantılar incelenmelidir.

Keller ve Bayraksan (2009) tarafından belirsiz işlem süreleri, teslim tarihleri, kaynak tüketimi ve kullanılabilirlik durumları altında birden fazla kaynak gerektiren işlerde en uygun programı belirlemek için iki aşamalı stokastik tam sayı programlama modeli formüle edilmiştir. Bu modelin potansiyel uygulamaları arasında mühendislik

danışmanlığı ve ameliyathane planlaması gibi hizmet endüstrilerinde ortaya çıkan takım planlama problemleri bulunmaktadır. Orta dereceli senaryolardaki problemler için Benders ayrışmasına dayanan tam bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Çözüm metodolojileri bir dizi test problemiyle karşılaştırılmıştır. Verimliliği artırmak için çeşitli algoritmik geliştirmeler eklenmiştir.

Proaktif planlama, projenin yürütülmesi sırasında meydana gelebilecek aksaklıklara karşı mümkün olduğunca korunan sağlam temel programların oluşturulmasını amaçlamaktadır. Lambrechts v.d. (2008) stokastik kaynak kullanımının neden olduğu aksaklıklara odaklanarak kararlı temel çizelgeler oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bir çizelgenin kararlılığı, proje yürütülürken planlanan ve fiilen gerçekleştirilen aktivite başlama zamanları arasındaki ağırlıklı sapma ile ölçülmektedir. Bu kapsamda, serbest bolluk bazlı amaç fonksiyonuna sahip bir tabu arama prosedürü sunmuşlardır. Algoritmanın etkinliğini rastgele oluşturulmuş bir dizi test örneğinden elde edilen kapsamlı hesaplama sonuçlarıyla göstermişlerdir.

Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT), 1950'lerin sonlarında geliştirilen bir stokastik ağ tekniğidir. Orijinal model, aktivite süreleri için PERT-beta dağılımını varsaymaktadır. Bu durum birçok araştırmacı tarafından eleştirilmiş ve gerçek aktivite süresi dağılımlarına daha uygun ve matematiksel açıdan daha kolay ele alınabildiğine inanılan yeni dağılımlar tanıtılmıştır. Hajdu ve Bokor (2016) çalışmalarında çeşitli aktivite süresi dağılım türlerinin (PERT-beta, tekdüze, üçgen, lognormal) proje süresi üzerindeki etkisini ve ayrıca PERT üç nokta tahmini gerçekleştirirken aktivite süreleri tahminindeki yanlışlığın etkisini araştırmışlardır. Çalışmadaki temel varsayım, farklı aktivite süresi dağılımlarının kullanılmasının neden olduğu farklılıkların, üç noktalı tahminlerin yanlışlığından kaynaklanan farklılıklara kıyasla daha önemsiz olduğudur. Bu varsayım, çeşitli varsayımsal projeler ve vaka çalışmaları üzerinde test edilmiştir. Projelerin olasılık dağılımlarını oluşturmak için Monte Carlo analizi kullanılmıştır. Tüm örnek projeler, temel varsayımın doğru olduğunu kanıtlamıştır. Sonuç olarak, seçilen aktivite süresi dağılımının önemsiz olduğu ve zaman alıcı, maliyetli uygun faaliyet süresi dağılımı seçmek yerine planlamacıların faaliyet sürelerini yeterince belirlemek için daha fazla çaba harcamaları gerektiği vurgulanmıştır.

Xie v.d. (2021) belirsiz kaynak kullanılabilirliği ile stokastik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemini (SRCPS-URA) incelemişler ve sıralı karar problemi olarak

modellemişlerdir. SRCPSP-URA için yeni bir Markov Karar Süreci (MDP) modeli geliştirilmiştir. Bir noktada sadece hangi faaliyetin başlayacağını değil, aynı zamanda yeterli kaynak kapasitesi olmadığında hangi aktivitenin kesintiye uğratılacağını ve erteleneceğini dinamik ve uyarlamalı olarak belirlemişlerdir. Kesin çözüm yaklaşımlarının boyut sorununun üstesinden gelmek için teorik sıralı iyileştirme özelliğinin kanıtlandığı, temel politika olarak öncelik kuralına sahip, yaklaşık dinamik programlama (ADP-Approximate Dynamic Programming) algoritması tasarlamış ve uygulamışlardır. Sonuç olarak, orta derecede daha fazla hesaplama süresi ile ADP algoritmasınının 120 aktiviteye kadar olan test örneklerinde öncelik kuralı sezgisellerine göre önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini ispatlamışlardır.

Brahimi v.d. (2015) üretim planlama kararlarını sipariş kabul kararları ile entegre ederken, iş yükü ve teslimat süreleri arasındaki bağımlılığı da göz önünde bulunduran taktiksel bir planlama problemi düşünmüşlerdir. Önerilen model, hangi siparişlerin kabul edileceğini, kabul edilebilir esnek vade tarihlerinde müşteriye teslim edilebilmesi için hangi dönemde üretilmesi gerektiğini belirler. Kabul edilen siparişlerin sayısı arttığında, iş yükü ve üretim sağlama süresi de artar ve bu durum müşteri teslim tarihlerinde gecikme olması olasılığına neden olabilir. Bu problem, iki gevşet ve düzelt sezgisel çözüm yönteminin önerildiği bir karma tamsayılı doğrusal program olarak formüle edilmiştir. Birincisi problemi zaman dilimlerine göre ayrıştırırken, ikincisi siparişlere göre çözer. Bu buluşsal yöntemlerin performansları, son teknoloji ürünü bir ticari çözücünün performansı ile karşılaştırılır. Sonuçlar, zamana dayalı gevşet ve düzelt buluşsal yönteminin, çok daha az CPU çabası için daha iyi entegrasyon boşlukları sağladığından, sıra tabanlı gevşet ve düzelt buluşsal yönteminden ve çözücü çözümünden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

Kritik Yol Yöntemi (CPM-Critical Path Method), proje yönetimi için ağ tabanlı bir yaklaşımdır. Bu yöntem, tüm projenin tamamlanma süresinin kısaltılması için kısaltılması gereken kritik yolu bulmamızı sağlayan en uzun yolu tanımlar (Takakura v.d., 2019). CPM, 1930'lardan itibaren her sektörde ve her proje türünde kullanılan geleneksel bir proje yönetimi yöntemi halini almıştır. Tüm proje yönetimi yöntemleri için bir temel oluşturur. Konsept sezgiseldir; bir aktivitenin diğerini beslediği tarif gibi bir plan oluşturur. Her aktivitenin bir sahibi vardır. Her aktivite sorumlusu görevini zamanında bitirirse, proje zamanında biter. Projelerde geliştirme boyunca bazı aktiviteler eş zamanlı olarak aktif olabilmektedir ancak herhangi bir zamanda sadece bir

aktivite kritik olmaktadır. Kritik aktivite, bir gün geciktirilirse, projeyi bir gün geciktirecek aktivitedir. Tüm kritik aktivitelerin toplamı kritik yolu oluşturur. CPM'e göre proje yöneticileri kritik yolu belirlemeli ve ona odaklanmalıdır (Ellis, 2015).

2.3. Çoklu Proje Ortamlarında Proje Planlama

Melchior (2015) çalışmasında stokastik-dinamik çoklu proje ortamlarına atıfta bulunmuştur. Birçok projenin aynı zamanda aynı kaynakları kullanarak ilerlemesi, faaliyet zamanlarının ve faaliyetler arası ilişkilerin stokastik olması, yeni projelerin stokastik geliş zamanları ile sürekli gelmesinden dolayı dinamik olması gibi sebeplerden kaynaklı proje planlamanın önemli görevler arasında olduğuna değinmiştir. Kontrollü parametrelere sahip problem örnekleri oluşturmak için yeni bir prosedür önermiştir. Belirli varsayımlar altında sürekli zamanlı Markov Karar Süreçleriyle (CTMDP) iki yeni model oluşturmuştur. Her iki model için de, standart çözüm metodolojileri kullanılarak en uygun politikalar elde edilmiştir. Optimal politikaların önemli özelliklerine dikkat çekmek için sayısal bir örnek verilmiştir. Düzenli olmayan kapasitenin kullanımına ilişkin planlama, sipariş kabul ve kapasite planlama kararlarını içeren ortak bir optimizasyon modeli oluşturulmuş ve kararların verimli bir şekilde belirlenebileceği CTMDP'ye dayanan yeni bir taktiksel model sunulmuştur. Modelin ve ilgili planlama probleminin basitleştirilebileceği şekilde ihmal edilebilecek koşullar belirlenmiştir. Bu çalışma, dinamik proje planlama için bir kılavuz niteliğindedir.

Kaynak kısıtlı çoklu proje planlama kapsamında çok projeli ortamlar bağımlılık ve değişkenliğe göre gruplanmıştır. Bağımlılık, bir projenin dış etkenlere bağlı olduğu derecesini ifade etmektedir. (Kurum içi faktörler ya da ortak kaynaklarda olabilir) Düşük bağımlılığa sahip projeler tek bir proje gibi düşünülebilmektedir. Bağımlılığı yüksek olan projeler ise eş zamanlı olarak ele alınması gerektiğinden bu durum çoklu proje planlama problemlerine yol açmaktadır. Değişkenlik, çalışma ortamı değişkenliğini, faaliyet sürelerini, etkileşimler arası süreleri veya öncelikli ilişkileri ifade etmektedir. Düşük değişkenliğe sahip çoklu projeler için tampon (buffer) kullanılarak değişkenlikten korunulabileceği belirtilmiştir. Yüksek değişkenliğe sahip çoklu projeler için ise proaktif başlangıç çizelgelerinin kullanılabilmesi değerlendirilmiştir. Değişkenlik durumunda bu çizelgeler revize edilebilmekte ve zamanlama politikaları kullanılarak kararlar alınabilmektedir. Zamanlama Politikaları, geçmiş ve olasılık dağılımları hakkındaki muhtemel bilgiye dayanarak stokastik karar zamanlarında dinamik şekilde planlama kararlarını almaktadırlar. Bu nedenle temel bir zamanlamaya

ihtiyaç duyulmadığı belirtilmiştir. Bu çerçeveye göre, dinamik-stokastik çoklu projeler yüksek bağımlılığa ve yüksek değişkenliğe sahiptir. Eş zamanlı programlamanın yanında değişkenlikte dikkate alınacağı için karmaşık bir planlama gerektirmektedir. Ayrıca, sistemde devam eden projeleri yürütürken yeni projeleri de hesaba katacak iyi bir planlamanın yapılması gerekmektedir. Bu durum uygun planlama politikalarının yararlarını azaltmaktadır.

Model kapsamındaki varsayımlarda Adler v.d. (1995) önerisi rehber olarak alınmıştır. Böyle bir model 3 nedenden dolayı faydalıdır. Birincisi, projelerde önemli gecikmelere ve darboğazlara yol açan hususlar ele alınmıştır. İkincisi, sabit dağılım varsayımları ile kararların uzun vadeli analizine olanak sağlanmıştır. Son olarak, modelin varsayımları gerçekçi dinamik-stokastik çoklu proje ortamlarını tahmin edebilecek gerçeklikte belirlenmiştir.

Geleneksel kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemi için (Artigues v.d. 2008) iki uzantı sunulmuştur. Çok Modlu Kaynak Kısıtlı Proje Çizelgeleme Problemi(MM-RCPSP) ve Çoklu Beceri Proje Çizelgeleme Problemi (MSPSP) olarak adlandırılan bu iki problem ile ilgili özel olan şey, kaynakların farklı yollara göre tahsis edilebilmesi ve sonuçta faaliyetlerin işleme süresinin etkilenmesidir. İlk problem için, faaliyetler çeşitli yollara göre işlenebilir, bu da gereken farklı miktarlarda kaynak ve buna karşılık gelen işlem süresi anlamına gelir. İkinci problem için, kaynaklar farklı türdeki kaynak gereksinimlerine tahsis edilebilir. Kaynak esnekliği olarak adlandırılabilen geleneksel rcPSP ile bu büyük fark, uygulanabilir çözümlerin sayısında önemli bir artışa yol açar. Bir çözüm oluşturmak için (1) faaliyetlerin işleme şekli ve (2) faaliyetlerin başlangıç zamanları belirlenmelidir. İkinci sorun daha sonra geleneksel bir rcPSP örneğini çözmeye eşdeğerdir. Kaynak kısıtlı proje çizelgeleme sorununda faaliyetleri işlemek için gereken kaynaklar ve bu kaynakların miktarları bilinmektedir. Bu iki uzantıda, faaliyetler için alternatif kaynak gereksinimleri vardır. Temel fark, hangi kaynağın kullanılacağına ve bu kaynağın ne kadarının gerekli olduğuna karar vermenin, çözüm sürecinde düzeltilmesi gereken karar değişkenleri olduğu gerçeğinde yatmaktadır. Bu nedenle çözümlene yöntemleri, özellikle kesin yöntemler çok daha karmaşıktır. Bu iki modelin pratikte çözülmesi geleneksel rcPSP'den çok daha zor olsa da, pratik ilgileri açıktır. Proje tanımını ve kaynak esnekliğini süreç etkinliğine karıştıran bu uzantılar, gerçek hayattaki uygulamaları çözmek için en umut verici araştırma yönlerinden biridir. Bu nedenle, literatürde bu problemlere yönelik sezgisel taramalara adanmış büyük

miktardaki çalışma, iyi çözümler elde etmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, alt sınırlar, zamana bağlı ayarlamalar ve aynı zamanda kesin yöntemler, örneğin geniş yakınlık araması kullanarak sezgisel olarak büyük boyutlu örnekleri çözmek için kullanılabilir.

Ayrıca, gerçek hayat projeleri tipik olarak önemli ölçüde belirsizliğe tabidir. Belirsizlik faaliyetlerin süresi veya yenilenebilir kaynakların mevcudiyeti ile ilgili olduğunda uygulanabilecek proaktif / reaktif proje planlama prosedürlerine değinilmiştir. Proaktif prosedürler, proje yürütme sırasında meydana gelebilecek bozulmalara karşı uygun şekilde korunan sağlam bir temel çizelge oluşturmak için açıklanmıştır. Bu bağlamda "sağlamlık" terimi, çözüm sağlamlığı veya kararlılığı anlamına gelir. Amaç, belirli bir kararlılık maliyet fonksiyonunu en aza indiren proaktif öncelik ve kaynak uygulanabilir temel zaman çizelgeleri oluşturmaktır, yani proje yürütme sırasında fiilen gerçekleştirilen faaliyet başlangıç zamanları ile temeldeki planlanan etkinlik başlangıç zamanları arasındaki beklenen sapmanın ağırlıklı toplamıdır. Projenin yürütülmesi sırasındaki bozulmalar, temel zamanlamasının uygulanamaz hale gelmesine neden olduğunda, programı onarmak için reaktif bir politikanın başlatılması gerekir; ek olarak bu reaktif konuya ilişkin içgörüler de sağlamıştır. Değişken aktivite süreleri için, altta yatan ağırlıklı erken-geçlik problemini çözmek için (optimal veya sezgisel olarak) etkili reaktif politikalarla birleştirilebilen kesin ve sezgisel proaktif zaman tampon ekleme stratejileri geliştirilmiştir. Bu araştırma çabaları, ilginç ve güven verici sonuçlar çıkarılmasına izin vermiştir.

Melchior v.d. (2018) dinamik olarak gelen projelerde, sipariş kabul ve kapasite planlamasının çok projeli ortamlara entegrasyonu konusunda çalışmıştır. Proje kazancı, maliyeti ve sipariş geliş zamanı gibi bir çok parametre altında optimal politikaların yapısı karakterize edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında kurulum maliyetinin ve düzenli olmayan kapasite kullanımının etkileri araştırılmıştır. Vaka çalışması olarak otomotiv parçaları üreten bir firmanın mühendislik departmanı ile işbirliği yapılmıştır. Sonuç olarak sürekli zamanlı bir Markov Karar Sürecine dayanan yeni bir model önerilmiştir. Kıyaslama problemleri üzerine yapılan ampirik test, yaklaşımın geleneksel kesin algoritmaya veya minimum modifikasyonlar altında bazı meta-sezgisel yaklaşımlara göre belirgin şekilde iyileştirilmiş sonuçlar verdiğini göstermiştir. Yerel dallanma için genetik algoritma veya başka herhangi bir gelişmiş meta sezgisel yöntem kullanmak, hesaplamaların ilk aşamalarında iyi uygulanabilir çözümler elde etmek için

gelecekteki önemli bir çalışma olabilir. Nispeten uzun üretim sürelerine sahip projeler veya bitiş zaman aralıkları büyük olan faaliyetler için, daha verimli çözüm yöntemlerine ihtiyaç vardır. Dahası, burada aktivite süresinin statik davrandığı varsayılmasına rağmen gerçek hayatta her seferinde gerçekleşmeyebilir.

2.4. Tezin Literatüre Katkısı

Günümüzde proje yönetimi birçok alanda kullanılması dolayısıyla önem arz etmektedir. Başarılı proje yönetimi için etkin proje planlama öne çıkmaktadır. Proje planlama; projenin dinamikleri, kaynaklar, kısıtlar, sözleşme içeriği ve bu kapsamda verilen taahhütler dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu doğrultuda, literatürde sözleşme tasarımı, tekli ve çoklu proje ortamlarındaki proje planlama üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Sözleşme tasarımı kapsamında beklenen kârı maksimize etme çalışmaları ile taşeronlar ve proje ekibi karar yöntemlerine değinilmiştir. Tekli proje planlama kapsamında proje çizelgeleme, kaynak kullanımı ve çoklu kısıt problemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Dinamik-stokastik çoklu proje ortamlarındaki planlama kapsamında ise ortak kaynak kullanımı, proje önceliklendirme ve proje çizelgeleme ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, projeyi oluşturan aktivite sürelerinin stokastik özellik göstermesi dolayısıyla fazla iş yükü gerektirmektedir. Bazı çalışmalar fazla olan iş yükü dolayısıyla, projenin belirli bir aşaması için özelleştirilerek işlem yükü azaltılmıştır. Bu tez çalışmasında, aktivite iş yüklerinin ve sürelerinin stokastik yapıda olduğu, Markov Karar Süreci ile geliştirilen bir sezgisel yaklaşım önerilmektedir. Stokastik problemlerin modellenmesi ve çözülmesi deterministik problemlere göre daha fazla iş yükü gerektirmektedir. Önerilen yaklaşım ile stokastik problemlere göre daha az iş yükü gerektiren, uygulaması daha kolay ve projenin tüm aşamaları için kullanılabilir bir çalışma oluşturulmuştur. Ek olarak, proje yöneticisinin ve aktivite sorumlularının tecrübelerinin dikkate alınması, yaklaşımın gerçek hayata daha yakın olmasını sağlamaktadır.

Tablo 2.1 Dinamik Proje Planlama Kapsamında İncelenen Çalışmaların Özeti

Çalışmalar	Deterministik(D)		Ayrık(A)		Süre/İş Yüğü Dağılımı	Algoritma ya da Prosedür
	vs. Stokastik(S)		vs. Sürekli(S)			
	D	S	A	S		
Yang v.d., 2016		x		x	Üçgen	Hibrit Genetik Algoritma
Hou v.d.,2019		x	x		Negatif Binom Dağılımı	Sezgisel Yaklaşım
Brcic v.d., 2019		x	x		Beta	Meta-Sezgisel Yaklaşım
Klastorin ve Mitchell, 2013		x		x	Üstel	Çok Aşamalı Stokastik Dinamik Programlama
Felberbauer v.d.,2019		x	x		Üçgen	Matheuristic Yaklaşım (Frank-Wolfe Algoritması) Örnek Ortalama Yaklaşımı (Karışık Tamsayılı Programlama)
Repenning, 2000		x		x		Dinamik Model
Keller ve Bayraksan, 2009		x	x		Tekdüze	Stokastik Tam Sayılı Programlama

Lambrechts v.d., 2008	x		x		Tekdüze	Tabu Arama Prosedürü
Mitchell ve Klastorin, 2007		x		x	Üstel	Sezgisel Yaklaşım (Stokastik Sıkıştırma Projesi Algoritması)
Hao v.d., 2014		x	x		Tekdüze	Sezgisel Yaklaşım
Melchiors, 2015		x		x	Üstel	Taktiksel Dinamik Model
Lippman, 1975	x			x	Geometrik	Yaklaşık Dinamik Programlama
Xie v.d., 2021		x	x	x	Tekdüze, Üstel, Beta	Yaklaşık Dinamik Programlama
Brahimi v.d., 2015		x	x		Tekdüze	Sezgisel (Gevşet ve Düzelt Buluşsal Yöntemi)
Tez Çalışması		x	x		Tekdüze	Sezgisel Yaklaşım ve Markov Karar Süreci Modeli

2.5. Metodoloji

Kritik yol yöntemi, tüm projenin tamamlanması için izlenmesi gereken kritik yolu bulmamızı sağlar ve en uzun yolu belirler. Yöntem kapsamında tüm aktiviteler birbirine öncül ve ardıl ilişkileri ile bağlanırlar. Her aktivitenin tamamlanması gereken bir süresi vardır. Projenin başından sonuna kadar tüm sıralı aktiviteler için aktivitenin en erken başlayabileceği, en geç başlayabileceği, en erken bitebileceği ve en geç bitebileceği zamanlar hesaplanmaktadır. En erken ve en geç başlayabileceği zamanlar ya da en erken ve en geç bitebileceği zamanlar arasındaki fark o aktivitenin bolluğunu göstermektedir. Aktivite süresi, proje süresini etkilemeden var olan bolluk süresi kadar uzatılabilmektedir. Bolluğu sıfır olan bir aktivitedeki herhangi bir gecikme proje süresini etkileyeceğinden kritik aktivitedir.

CPM çalışması kapsamında her aktivite için aktivitenin tamamlanmasının öngörüldüğü bir süre belirlenmektedir. Aktivitelerin bu süreleri ve öncül-ardıl ilişkileri doğrultusunda projenin kritik yolu bulunmaktadır. Projenin başlangıcında belirlenen bu kritik yol, proje yürütülürken aktivite sürelerinin beklenenden farklı gerçekleşmesi durumunda değişebilmektedir. Aktivite tamamlanacağı süreye henüz ulaşmadıysa yalnızca bulunduğu sürenin bir fazlasına geçiş yapmaktadır. Eğer bulunduğu karar dönemi içerisinde aktivitenin tamamlanması bekleniyorsa bir olasılıkla ardıl aktiviteye ya da aktivitelere geçiş yapmaktadır. Örneğin; tamamlanma süresi 3 hafta olarak belirlenmiş bir aktivitede 2 hafta geçirildiyse önümüzdeki periyot içerisinde aktivite tamamlanacağından 1 olasılık ile sonraki aktivitelere geçiş yapmaktadır. Benzer şekilde, aynı aktiviteye henüz yeni başlandıysa veya aktivitede 1 hafta geçirildiyse 1 olasılıkla geçirilen sürenin bir fazlasına geçiş yapılmaktadır.

Kritik yol yönteminde her aktivite için Şekil 2.1’de yer alan değişkenler hesaplanmaktadır.

ES	Süre	EF
Aktivite		
LS	TF	LF

Şekil 2.1 Kritik Yol Yönteminde Aktivite Değişkenleri

En Erken Başlangıç (ES – Early Start) : Aktivitenin bütün öncülleri tamamlandıktan sonra başlayabileceği en erken tarihtir.

En Erken Bitiş (EF – Early Finish) : Aktivitenin erken başlangıç tarihinde başladığında tamamlanabileceği en erken tarihtir.

Süre : Aktivitenin tamamlanmasının beklendiği süredir.

En Geç Başlangıç (LS – Late Start) : Aktivitenin projenin bitiş tarihini geciktirmeden başlayabileceği en geç tarihtir.

En Geç Bitiş (LF – Late Finish) : Aktivitenin projenin bitiş tarihini geciktirmeden tamamlanması gereken en geç tarihtir.

Toplam Bolluk (TF – Total Float) : Aktivitenin projenin bitiş süresini değiştirmeden ne kadar süre geciktirilebileceğini göstermektedir.

ES ve EF değişkenlerinin hesaplanması için başlangıç aktivitesinden başlanarak ileriye doğru gidilmektedir.

- $ES = \text{Max} \{ \text{Öncül aktivitelerin EF değerleri} \}$

Bir aktivitenin başlayabilmesi için öncülü olan tüm aktivitelerin tamamlanmış olması gerekmektedir. Eğer aktivite tek bir öncüle sahipse, ES değeri önceki aktivitenin EF değerine eşit olmaktadır.

Başlangıç aktivitesinin ES değeri sıfır kabul edilmektedir.

- $EF = ES + \text{aktivite süresi}$

LS ve LF değişkenlerinin hesaplanması için ise en son aktiviteden başlanarak geriye doğru gidilmektedir.

- $LS = LF - \text{aktivite süresi}$
- $LF = \text{Min} \{ \text{Öncül aktivitelerin LS değerleri} \}$

Bir aktivite tek bir ardıla sahipse, o aktivitenin LF değeri ardılının LS değerine eşit olmaktadır.

Bir aktivitenin EF, LF yada ES, LS değerleri hesaplandıktan sonra toplam bolluğu hesaplanabilmektedir.

$$TF = LF - EF \text{ ya da } TF = LS - ES$$

Toplam bolluğu sıfır olan aktivitelerin birleştirilmesi ile kritik yol elde edilmektedir. Ayrıca, kritik yol üzerinde yer alan aktivitelerin süreleri toplamı proje süresini vermektedir.

Tablo 2.2 Proje Aktivite İlişkileri

Aktivite	Öncül	Süre (Hafta)
A	-	5
B	A	4
C	A	6
D	B,C	2
E	D	4
F	D	1
G	F	2
H	E,G	1

Tablo 2.2’de örnek olarak bir projenin bazı aktivitelerinin süreleri ve öncül bilgisi verilmektedir. Bu ilişkiler kullanılarak örnek proje için Ek 1’de yer alan proje ağ diyagramı çizilmiştir. Her aktivite için değişkenler hesaplanarak toplam bolluğu sıfır olan aktiviteler birleştirilmiş olup projenin kritik yolu ve tamamlanma süresi bulunmuştur. İlgili örnekte A-C-D-E ve H aktiviteleri kritik yol üzerinde yer aldığından, bu aktivitelerde meydana gelebilecek herhangi bir gecikme 18 hafta olarak hesaplanan sürenin uzamasına neden olmaktadır.

Projeyi oluşturan aktiviteler öncül ve ardıl ilişkileri ile birbirine bağlandıktan sonra her aktivite için geçmiş verilerden ve tecrübelerden yararlanılarak işlerin tamamlanması için gerekli olan en düşük ve en yüksek eforlar belirlenmektedir. Bu eforlar kaynak planlaması, işin yapısı vb. sebepler çerçevesinde zamana çevrilerek aktivitelerin tamamlanabileceği minimum ve maksimum süreler bulunmaktadır.

Her aktivite için bulunan minimum ve maksimum sürelerin ortalaması alınarak ilgili aktivitenin teorik süresi hesaplanmaktadır. Bu süreler ve öncül-ardıl ilişkisi doğrultusunda kritik yol yöntemi ile projenin tamamlanması beklenen teorik süresi ortaya çıkmaktadır. Bu süre genel olarak proje başında hesaplanan ve üzerinden bazı taahhütler verilen proje süresi olmaktadır. İşin doğası gereği proje başladıktan sonra meydana gelebilecek bir takım aksaklıklar yada tahmin edilemez durumlardan dolayı aktivitelerin gerçekleşen süreleri hesaplanan teorik süreleri ile aynı olmamaktadır.

3. PROBLEM TANIMI VE MODEL

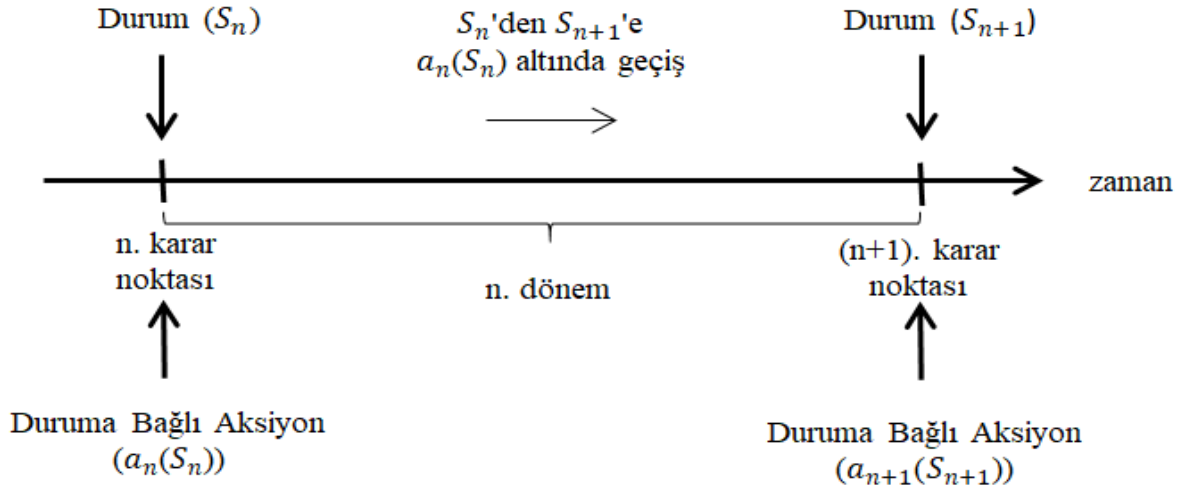
Bu tez çalışması kapsamında belirsizlikler ve kısıtlar altında, belirli bir amaca sahip projelerin dinamik planlama ile optimal sürede tamamlanması amaçlanmıştır. Bu bölümde; modelde kullanılan varsayımlar, kullanılan notasyon, model bileşenleri ve modelin özel durumları ile dinamik proje planlama kapsamında deterministik durum anlatılmıştır.

3.1. Problem Karakteristikleri ve Model Varsayımları

Firmaların sözleşmeli olarak yürüttüğü projelerde, sözleşme doğrultusunda firma, ürünleri zamanında teslim etme, müşteri isteklerini yerine getirme gibi bazı taahhütlerde bulunmaktadır. Firma tarafından gerçekleştirilemeyen bu yükümlülükler bazı sözleşmelerde cezai durumlar ile sonuçlanabilmektedir. Bu tez kapsamında, dinamik proje yönetimi ile verilen taahhütler altında projenin en etkili şekilde tamamlanması hedeflenmektedir.

Yürütülen her proje stratejik amaçlar doğrultusunda farklı kritik hususlara da sahip olabilmektedir. Bu durum projede bazı noktaları daha ön plana çıkarırken, bazı temel hususların ikinci planda kalmasına neden olabilmektedir. Örneğin, standart bir projede öne çıkan husus proje kârının maksimum olması iken gelecekte firmaya yeni fırsatlar kazandıracak, sektörde saygın bir proje için müşteri isteklerini dikkate alan, zamanında ve kaliteli bir ürün üretmek, proje kârından daha önemli bir etmen olabilir. Benzer şekilde, askeri alanda kritik göreve sahip son kullanıcısı olan bir proje için projeyi zamanında teslim etmek birçok husustan daha önemlidir. Projelerin bu özel durumları, proje planlamada kurgulanan modellerde farklı amaç fonksiyonlarının oluşmasını sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında firmaların en temel amaçlarından olan projeyi zamanında teslim etme motivasyonu düşünülerek zaman taahhütü dikkate alınmıştır.

Kontrol ve karar noktalarının belirli zamanlarda bulunması dolayısıyla proje, kesikli zaman ekseninde ilerlemektedir. Bu doğrultuda, en iyi ortalama proje süresini elde etmeye yönelik olarak problem, kesikli zaman Markov Karar Süreci (DTMDP) olarak modellenmektedir. Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi kesikli zaman Markov Karar Süreci, sadece karar zamanlarında sistemin dikkate alındığı sıralı bir karar sürecidir.



Şekil 3.1 Kesikli Zaman Markov Karar Süreci Yapısı

n . karar noktasında S_n durumunda olan bir projede duruma bağlı olan $a_n(S_n)$ aksiyonu alındığında, proje $(n+1)$. karar noktasında S_{n+1} durumuna olasılıksal olarak geçiş yapmaktadır.

Projelerdeki bu kritik etmenler farklı amaç fonksiyonlarını ortaya çıkardığı gibi proje süresince alınan kararları da etkilemektedir. Dolayısıyla, farklı taahhütlere ve amaç fonksiyonlarına sahip projelerde farklı karar kümeleri kullanılabilir. Ek olarak, bu taahhütler alınacak aksiyon kümesini sınırlandırdığından problemi zorlaştırmaktadır.

Bir aktivitenin süresini belirleyen en önemli unsur o aktivite kapsamında yapılacak olan işler için harcanacak olan iş yüküdür. İlgili aktivitenin iş yükü, oluşabilecek tahmin edilemez durumlar dolayısıyla projenin başında yapılan planlamaya göre farklılık gösterebilmektedir fakat bu durum aslında aktivite süresini direkt olarak belirleyen bir unsur değildir. Çünkü aktivite süresi, tamamlanması gereken iş yükünün kullanılabilir kaynağa oranlanması ile elde edilmektedir. Örneğin, birden fazla kaynak ile yürütülmeye uygun 300 saatlik iş yüküne sahip bir aktivite günlük 3 saatlik çalışma ile 100 günde tamamlanabilirken, kaynak sayısı artırılarak günlük 50 saatlik çalışma ile 6 günde tamamlanabilmektedir. Bu sebeple, belirli bir iş yükü kaynak kullanımı artırılarak daha kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir.

Teslim süresinin dikkate alındığı bir proje için proje süresine etki edebilecek kararlar, aktivitenin planlanan şekilde ilerlediği durumda akışa müdahale etmemek ya da aktivite süresinin uzadığı durumlarda proje teslim süresini yakalamak için sürenin kısaltılması yönünde aksiyon almaktır. Aktivite süresinin kısaltılması aksiyonu işin daha kısa sürede

tamamlanmasını sağlar. Bu durum insana bağılı işler için, işi gerçekleştiren personelin fazla mesai yapması veya işin daha fazla personel atanarak gerçekleştirilmesi; makine ile yürütülen işlerde makine sayısının arttırılması ya da çalışma süresinin uzatılması gibi kaynak kullanımını arttırmaya yönelik aksiyonlar olabilmektedir. Ek olarak, bazı aktivitelerin firma dışında başka bir kuruma verilmesi de proje süresinin kısaltılmasına yönelik bir aksiyon olabilmektedir fakat bu durum kararlardaki esnekliğı azaltacağından dinamik proje planlamayı zorlaştıran bir aksiyon olmaktadır. Firmanın stratejik planlarına engel teşkil edecek bir iş değilse, iş paketi olarak işin firma dışına verilmesi daha uygun olabilmektedir. Karar zamanlarında ek kaynak istihdam etmenin kısa zamanda elverişsiz olması ve uzun vadede daha fazla maliyet yaratması düşüncesi doğrultusunda var olan kaynağın çalışma süresini arttırma ya da farklı işlerdeki kaynağı kaydırma aksiyonları model kapsamında fazla mesai aksiyonu altında birleştirilmiştir.

Taahhüt edilen proje süresinin gerçekleşmesine yönelik olarak firmalar kaynak kullanımını arttırmaya yönelmek istemektedir. Bilindiğı üzere bir firmada var olan kaynaklar elbette sınırsız değildir. Belirli sayıda kaynağına sahip olmanın yanı sıra yasalar ile personelin çalışabilecekleri saatler sınırlandırılmıştır. Bu doğrultuda, modelde fazla mesai aksiyonunu sınırlandırmak için kısıt konulmuştur.

Projede karar noktalarının kesikli olarak belirlenmesi dolayısıyla projeyi oluşturan aktivitelerin tam sayılı iş yüküne sahip olduğu ve birim zamanda tam sayılı iş yükünün tamamlanabileceğı dikkate alınmıştır. İş yükünün reel sayı olduğu durumda, sayı üst tam sayıya yuvarlanarak dikkate alınabilmektedir. Birim zamanda fazla mesai aksiyonu ile tamamlanabilecek ekstra iş yükünün de tam sayı olmasına dikkat edilerek, fazla mesai aksiyonunu belirten parametre tam sayı olarak belirlenmiştir.

Proje başlamadan hatta sözleşme imzalanmadan önce projeyi oluşturan her aktivitenin tamamlanması için gereken iş yükü, tecrübeler ve geçmiş veriler doğrultusunda sabit değerler olarak tahmin edilerek proje takvimi ve ürün teslim süreleri oluşturulmaktadır. Ancak, proje yürütülürken meydana gelen sorunlar ya da beklenmeyen durumlar neticesinde öngörülen eforlarda dolayısıyla aktivite sürelerinde sapmalar meydana gelmektedir. Özellikle, tasarım işlerinin yoğun olduğu projelerde tasarımda öngörülemeyen durumların yol açtığı değişiklikler ekstra efor harcanmasına ve aktivite sürelerinde uzamalara neden olmaktadır. Benzer şekilde, malzeme tedarik süreçlerinde meydana gelen aksaklıklar, ambargolar ya da ortak kullanılan kaynaklardaki yanlış planlamalar da tahmin edilen sürelerden daha uzun gerçekleşme sürelerinin oluşmasına

neden olmaktadır. Rakip firmalara karşı avantaj sağlamak veya müşterinin ürünlere en kısa sürede ulaşmak istemesi gibi nedenlerden dolayı sözleşmede mümkün olabilecek en kısa süre taahhüt edildiğinden genel olarak daha uzun olan gerçekleşme sürelerine karşın proje zamanında teslim edilmeye çalışılmaktadır fakat aksi durumlar da meydana gelebilmektedir. Beklenmeyen durumlara karşı gecikme yaşamamak için planlanan süreler fazla pay eklenmesi, altyüklenicinin belirttiği süreden erken teslimat yapması veya öngörülme yen gelişmeler neticesinde üretim planında ürünün erken planlanması vb. gelişmeler projenin beklenenden daha erken tamamlanmasına örnek olarak verilebilmektedir. Finansal konular veya sözleşme maddeleri doğrultusunda müşteri ürünleri taahhüt edilen zamandan daha erken teslim almak istemeyebilir. Bu durum ekstra stok tutma maliyeti yaratmasının yanı sıra, ürünlerin korunmasının zorluğu, içerdikleri alt parçaların garanti sürelerinin başlaması vb. gibi nedenlerle şirketler açısından olumsuzluk teşkil etmektedir. Bu sebeple, aktivite iş yüklerinin kesin değerler olarak öngörülmesi ve proje süresinin bu değerler doğrultusunda planlanması teslim sürelerinde sapmanın beklenenden daha fazla oluşmasına neden olmaktadır. Yukarıda açıklanan durumlar göz önüne alındığında aktivite iş yüklerinin ve aktivite sürelerinin kesin değerler yerine stokastik olarak belirlenmesi gerçeğe daha yakın planlama yapılmasını sağlamaktadır.

Bu kapsamda rassal değişkenlerin uyabileceği dağılımlar incelenmiştir. Proje yönetiminde, aktivite süresi gibi belirsiz değişkenler için kesikli zamanda geometrik dağılımın kullanımı yaygındır (Gutjahr v.d., 2000). Stokastik kaynak kısıtlı proje çizelgeleme ise tipik tek kaynak sınıfı ile sınırlı ve üstel dağılıma sahip aktivite sürelerini varsaymaktadır (Leus ve Herroelen, 2004). Geometrik rassal değişkenlerin sonsuz aralıkta tanımlanması, belleksiz olma özelliği ve ortalama ile varyansın eş zamanlı kontrol edilememesi bu dağılımın kurgulanan model için uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Proje sürdürülürken proje yöneticisinin ve idari yöneticilerin geçmiş tecrübeleri, alternatif çözümler ve sözleşme değişiklikleri dikkate alındığında aktivitelerin en kısa ve en uzun tamamlanabileceği süreler ulaşılabilen fakat bu aralıkta aktivitenin ne kadar sürede tamamlanabileceği bilinmemektedir. Bu sebeple, aktivite sürelerinin gerçek hayattaki süreler göre en yakın şekilde ifade edilmesi ayrık tekdüze dağılım kullanılarak sağlanabilmektedir. Geçmiş verilere ve tecrübeler dayanarak her aktivitenin tamamlanabileceği minimum ve maksimum eforlar ve süreler

hesaplanarak bu parametreler doğrultusunda ayrık tekdüze dağılıma sahip aktivite tamamlanma iş yükleri ve süreleri oluşturulmaktadır.

Modelde, zaman taahhüdü dikkate alındığından bir dönemde elde edilecek olan ödül bir dönemlik proje süresi olmaktadır.

Motivasyon ve proje ortamı dikkate alındığında model varsayımları aşağıda verilmektedir.

- Kararların belirli dönemlerde verilmesi dolayısıyla kesikli zaman karar noktaları kullanılmıştır.
- Zaman taahhüdü dikkate alınarak proje başında belirlenen teslim süresinin yakalanması için modelde en iyi ortalama proje süresinin elde edilmesi amaçlanmıştır.
- Ek kaynak kullanımının olmadığı normal şartlar altında her dönem bir birimlik iş yükü tamamlanmaktadır.
- Projeyi oluşturan aktivitelerin tamamlanması için gerekli iş yüklerinin tam sayı olduğu düşünülmüştür.
- Aktivitelerin tamamlanabileceği minimum ve maksimum iş yüklerinin bilindiği varsayılmıştır.
- Projeyi oluşturan aktivite iş yüklerinin ve sürelerinin kesikli tekdüze dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır.
- Modelde elde edilecek ödülün zaman olmasından kaynaklı her karar noktasında bir dönemlik süre elde edilmesi planlanmıştır.
- Kaynak kullanımını arttırma aksiyonları tek bir fazla mesai aksiyonu altında birleştirilmiştir.
- Sınırsız kaynak kullanımı mümkün olmadığı için proje tamamlanıncaya kadar kullanılabilir fazla mesai aksiyonu sayısı için kısıt bulunmaktadır.
- Fazla mesai aksiyonu ile arttırılan çalışma hızı parametresi, birim zamanda tamamlanabilen iş yükünü ifade etmektedir. Bu parametre tam sayı olarak belirlenmiştir.

- Dönemsel gerçekleştirmeler ve değişiklikler sonrası proje planının tekrar değerlendirilebileceği dikkate alınmıştır.

3.2. Model Kurgusu

Model, kesikli zaman Markov Karar Modeli (Discrete-Time Markov Decision Model) olarak kurgulanmıştır. Model kapsamında notasyon, belirlenen karar noktaları, durumlar, aksiyonlar, ödüller ve geçiş olasılıkları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. Karar Noktaları

Ayrık zamanlı olarak kurgulanan modelde her $n \in \{1,2,3, \dots\}$ noktası bir karar noktasını ifade etmektedir. Proje başında, kaynağın normal mesai çalışması ile aktivitelerin belirlenen maksimum iş yükü dikkate alınarak her aktivitenin tamamlanabileceği en uzun süre hesaplanmakta ve projenin gerçekleştirilebileceği maksimum periyot olan N değeri bulunmaktadır. Bu değer, daha sonraki bölümlerde detaylı açıklanacak olan her bir aktivitenin tamamlanması gereken maksimum iş yükünü veren parametreler ile hesaplanabilmektedir.

n , projenin her bir periyodunun başlangıcını ifade eden karar noktası ve N , projenin tamamlanması için gereken maksimum periyodu olsun. Bu durumda, $n \in \{1,2,3, \dots, N\}$ sağlanmış olur. Ayrıca, dinamik planlama dönemi en fazla N periyot devam ettiği için proje en fazla N değeri ile taahhüt edilen proje süresi arasındaki fark kadar gecikebilmektedir.

3.2.2. Durum Değişkeni ve Durum Değişkenleri Uzayı

Olasılıksal dinamik programlama modellerinde ve Markov Karar Süreçlerinde durum değişkenleri sistemi karakterize eden ve alınacak aksiyonları/kararları etkileyen sistemle ilgili bilgilerdir. Proje planlama kapsamında, bu bilgi aktivitelerin durumları tarafından oluşturulmaktadır.

S_n , n . periyot başında projenin durumunu tanımlayan durum değişkeni olsun. Herhangi bir n periyodunda proje S_n durumundayken hangi aktivitelerin tamamlanmış olduğu, hangi aktivitelerin devam ettiği, devam eden aktivitelerde ne kadarlık iş yükünün tamamlandığı ve tamamlanan toplam iş yükünün ne kadarının ekstra kaynak kullanılarak tamamlandığı bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu kapsamda,

S_n durum değişkeni notasyonu ve detayları aşağıda verilen 4 boyuttan oluşan (G_n , F_n , T_n , D_n) ile tanımlanabilmektedir.

I kümesi projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken aktivite kümesi olarak tanımlansın. Projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken aktivite indeksi ise i ile gösterilsin ($i \in I$).

- T_n , n . periyot başında tamamlanmış olan aktivite kümesidir. T_n değişkeninin tanımlanması, projede öncül-ardıl ilişkileri dolayısıyla başlanabilecek aktivitelerin belirlenmesi için gerekmektedir.
- D_n , n . periyot başında devam eden aktivite kümesidir. Devam eden aktiviteleri belirten indeks k ise $k \in D_n$ olarak yazılabilir. Durum değişkeninde aynı anda devam eden birden çok aktivite olabilmektedir. Bu durumda, $D_n = \{ k_1, k_2, k_3, \dots, k_{|D_n|} \}$ kümesi olarak tanımlanabilmektedir. Hangi aktiviteler için aksiyon alınacağı ise D_n değişkeni ile belirlenmektedir.

Bu tanımlar doğrultusunda, $T_n \subset I$, $D_n \subset I$, $D_n \cup T_n \subset I$ koşulları sağlanmakla beraber uygun bir $n \in \{1,2,3, \dots, N\}$ değerinde $T_n = I$ olduğu zaman tüm aktiviteler tamamlanmış olduğu için proje tamamlanmış demektir ve $D_n = \emptyset$ gerçekleşir.

- G_n , n . periyot başında devam eden aktivitelerde tamamlanan iş yükü miktarını belirten kümedir. Aktivite sürelerinin tekdüze dağılıma sahip olmasından ve bu nedenle hafızasızlık özelliğinin bulunmamasından dolayı devam eden her bir aktivite için tamamlanmış iş yükü miktarının G_n kümesi ile tutulması gerekmektedir. G_n kümesi tamamlanan iş yükü değerini devam eden her aktivite için tuttuğundan eleman sayısı D_n kümesinin eleman sayısına eşitir. ($|G_n| = |D_n|$).

n . periyot başında devam eden her bir aktivitedeki tamamlanmış iş yükü miktarını belirten G_n kümesi, n . periyot başına kadar k . aktivitede tamamlanan iş yükü miktarını gösteren ve D_n kümesindeki sıra ile tanımlı $GS_{n,k}$ değerlerinden oluşan bir küme tarafından ifade edilmektedir. Bu durumda, $G_n = \{ GS_{n,k_1}, GS_{n,k_2}, GS_{n,k_3}, \dots, GS_{n,k_{|D_n|}} \}$ olarak tanımlanabilmektedir.

Eğer bir aktivite tamamlandıysa ya da devam etmiyorsa bu değişken kullanılamaz. Başka bir ifadeyle, $k \notin D_n$ ise $GS_{n,k} = \emptyset$ olarak varsayılmaktadır.

- F_n , n. periyot başına kadar fazla mesai ile yapılan iş yüküdür. Proje boyunca sınırlı sayıda fazla mesai yapılabildiğinden ya da ekstra kaynak kullanılabildiğinden uygulanabilecek aksiyonların belirlenmesi için F_n değişkeni tanımlanmıştır.

GF_n , n. periyotta fazla mesai ile tamamlanan iş yükünü gösterebilir. Bu durumda, $F_{n+1} = \sum_{t=1}^n GF_t$

t_f , bir aktivitede birim periyotta fazla mesai ile tamamlanabilecek iş yükü miktarını ve m projede fazla mesai ile tamamlanmasına izin verilen maksimum iş yükü miktarını gösterebilir. Bu durumda, F_n değişkeni için 2 tane kısıt bulunmaktadır. Bu kısıtlardan birincisi birim periyot bazında uygulanırken, diğer kısıt ise proje bazında uygulanmaktadır.

1. kısıt: $0 \leq F_{n+1} - F_n \leq t_f \mid D_n \mid \quad n=0,1,2,\dots,N-1$

Devam eden her bir aktivitede fazla mesai ile t_f kadar ekstra iş yükü tamamlanabilmektedir. Bu durumda, herhangi bir n periyodunda devam eden aktivite sayısı ve t_f çarpımı kadar ekstra iş yükü gerçekleştirilebilmektedir.

2. kısıt: $0 \leq F_n \leq m \quad n=1,2,\dots,N$

Projede en fazla m kadarlık iş yükü fazla mesai ile tamamlanabilmektedir.

3.2.3. Aksiyonlar

n. karar noktasında, devam eden herhangi bir $k \in D_n$ aktivitesi için sürece müdahale edilmeyeceği anlamına gelen $a=0$ aksiyonu ya da kaynak kullanımının artırılmasını ve t_f kadar ekstra iş yükünün tamamlanacağını ifade eden $a=1$ fazla mesai aksiyonu alınmaktadır. $a_n(s)$, proje n. periyot başında ve s durumunda iken alınan aksiyonu ve $A(s)$ ise proje s durumunda iken alınabilecek aksiyon kümesini gösterebilir. Bu durumda, $a_n(s) \in A(s)$ olur.

$SA_n(k)$, n. periyot başında devam eden k. aktivitesi için alınacak olan aksiyonu gösteriyorsa $k \in D_n$ olmak üzere $SA_n(k)$ ifadesinin alabileceği değerler aşağıda gösterilmektedir:

- $F_n < m$ ise $SA_n(k) \in \{0,1\}$
- $F_n = m$ ise $SA_n(k) \in \{0\}$

n. periyot başında devam eden tüm aktivitelerde aksiyon alınması gerektiği için $|a_n(s)| = |D_n|$ eşitliği sağlanır ve

$a_n(s) = \{ SA_n(k) : k \in D_n \} = \{ (SA_n(k_1), SA_n(k_2), \dots, SA_n(k_{|D_n|})) : k_1, k_2, \dots, k_{|D_n|} \in D_n \}$ olarak sıralı şekilde tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamada, periyot ve proje bazında olmak üzere 2 koşulun sağlanması gerekmektedir.

1. koşul: $SA_n(k_1) + SA_n(k_2) + \dots + SA_n(k_{|D_n|}) \leq |D_n|$

Herhangi bir n periyodunda sadece devam eden k aktiviteleri için aksiyon alınabildiğinden alınabilecek aksiyonların toplamı en fazla devam eden aktivite sayısı kadardır.

2. koşul: $F_n + t_f [SA_n(k_1) + SA_n(k_2) + \dots + SA_n(k_{|D_n|})] \leq m$

Projede n. periyot başına kadar fazla mesai ile tamamlanan iş yükü ve n. periyotta fazla mesai ile tamamlanacak iş yükünün toplamı, projede izin verilen maksimum fazla mesai iş yüküne eşit ya da az olmalıdır.

3.2.4. Ödüller

Bu çalışma kapsamında zaman taahhüdü dikkate alındığı için ödül süre olarak tanımlanmaktadır. Projenin devam ettiği her dönem için bir birimlik ödül elde edilmektedir. $r_n(s,a)$, n. periyot başında proje s durumunda iken a aksiyonu alındığında elde edilecek ödülü göstermek üzere $r_n(s,a)$ 'nın alabileceği değerler aşağıda belirtilmektedir:

- $n = N+1$ için $r_{N+1}(s,a) = 0 \quad \forall (s,a)$

Projenin maksimum süresine ulaşıldığı zaman projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır olur.

- $n \leq N$ için $r_n(s,a) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } s = (\emptyset, F_n, I, \emptyset) \\ 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases}$

Projede tüm aktiviteler tamamlandığı zaman proje tamamlanmış olacağı için aksiyon alınmamakla beraber sıfır dönemlik süre elde edilirken diğer durumlarda alınabilecek tüm aksiyonlar için bir sonraki (n+1). periyoda geçişte bir dönemlik ödül elde edilmektedir.

3.2.5. Geçiş Olasılıkları

Herhangi bir periyot başında bir aksiyon alındığında aktivitelerin tamamlanması için gerekli iş yükleri rassal olduğu için proje bulunduğu durumdan başka bir duruma belirli bir olasılık ile geçiş yapmaktadır. $P_{sj}(a)$, proje s durumunda iken a aksiyonu alındığında projede j durumuna geçme olasılığını göstermektedir. Bu bölümün amacı, $P_{sj}(a)$ değerini hesaplanması olmakla beraber proje s durumunda iken devam eden birbirinden farklı birden fazla aktivite olabileceği için öncelikli olarak aktivite bazında geçiş olasılığının hesaplanması gerekmektedir.

Bu amaçla, n. periyot başında devam eden ve $GS_{n,k}$ işyükü tamamlanmış olan $k \in D_n$ aktivitesi için $SA_n(k)$ aksiyonu altında (n+1). periyoda $GS_{n+1,k}$ işyükü tamamlanmış olarak geçme olasılığı $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k))$ olsun.

Bu olasılık hesaplanırken, aşağıda detaylı anlatılacağı üzere, durum değişkenindeki diğer boyutların da dikkate alınması gerekmektedir. Proje N+1. periyotta tamamlandığında devam eden aktivite kalmayacağı için D_n değişkeni gibi G_n değişkeni de boş küme durumuna geçiş yapmaktadır. Benzer şekilde $k \in D_n$ aktivitesi n. periyot sonunda tamamlanırsa $k \notin D_{n+1}$ olacağı için $GS_{n+1,k} = \emptyset$ durumunun dikkat alınması gereklidir.

Projeyi oluşturan her aktivitenin tamamlanması için gereken minimum (B_k) ve maksimum (L_k) iş yükü değerleri geçiş olasılıklarının hesaplanmasında önem arz etmektedir. Eğer bir aktivitede minimum iş yüküne henüz ulaşılmamışsa aktivitenin tamamlanma durumu yoktur ve bir sonraki periyotta o aktivite mutlaka devam etmektedir. Benzer mantıkla, eğer bir aktivite maksimum iş yüküne ulaşmışsa tamamlanmış durumdadır ve sonraki periyotta devam etmemektedir. Geçiş olasılıklarının hesaplanmasında projeyi oluşturan her k aktivitesinin tamamlanması için gereken ve parametreleri $[B_k, L_k]$ olan tekdüze dağılımına sahip iş yükü X_k ile gösterilmektedir.

Bir aktivite için hesaplanan olasılık değeri, tamamlanan iş yüküne ek olarak $SA_n(k)$ aksiyonuna da bağlı olduğundan ve $SA_n(k)$ kümesi 2 farklı değer alabildiğinden geçiş olasılıkları alınacak aksiyon bazlı özelleşmektedir. Formül içerisinde ifade edilen ilk 4 durum ilgili aktivite özelinde fazla kaynak kullanımının olmadığı, başka bir ifadeyle $SA_n(k)=0$ aksiyonu için tanımlanmaktadır.

1. durum: $(GS_{n,k} < B_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1)$ ve $(SA_n(k) = 0)$

n. periyot başında devam eden k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükünün, ilgili aktivitenin minimum iş yükünün 1 eksiğinden daha küçük olması durumunda, k aktivitesi bir sonraki periyodun başında mutlaka devam etmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanmış iş yükü 1 artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1$). Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılabilmektedir.

2. durum: $(B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = \emptyset)$ ve $(SA_n(k) = 0)$

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı B_k-1 değerine eşit veya büyük ve L_k-1 değerinden küçük bir değer alıyorsa aktivite bir sonraki dönemde tamamlanabilmekte ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$) ve devam eden aktivite kümesinden silinebilmektedir. Bu nedenle $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmaktadır. k aktivitesi n. periyodun başında devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesinin n. periyotta tamamlanması için ise aktivite iş yükünün $GS_{n,k}+1$ değerine sahip olması gerekir. Bu durumda, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned} P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) &= P(X_k = GS_{n,k}+1 \mid X_k > GS_{n,k}) \\ &= P(X_k = GS_{n,k}+1) / P(X_k > GS_{n,k}) = \frac{1/(L_k - B_{k+1})}{(L_k - GS_{n,k}) / (L_k - B_{k+1})} = \frac{1}{(L_k - GS_{n,k})} \end{aligned}$$

Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \frac{1}{(L_k - GS_{n,k})}$ olarak ifade edilebilmektedir.

3. durum: $(B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1)$ ve $(SA_n(k) = 0)$

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı B_{k-1} değerine eşit veya büyük ve L_{k-1} değerinden küçük bir değer alıyorsa aktivite bir sonraki dönemde devam edebilmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanan iş yükü miktarı 1 artabilmektedir ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1$). k aktivitesi n. periyodun başında devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesi n. periyotta tamamlanmayıp bir sonraki periyotta devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}+1$ 'den daha büyük bir değere sahip olması gerekir. Bu nedenle, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = P(X_k > GS_{n,k}+1 | X_k > GS_{n,k})$$

$$= \frac{P(X_k > GS_{n,k}+1)}{P(X_k > GS_{n,k})} = \frac{\frac{(L_k - GS_{n,k} - 1)}{(L_k - B_{k+1})}}{\frac{(L_k - GS_{n,k})}{(L_k - B_{k+1})}} = \frac{(L_k - GS_{n,k} - 1)}{(L_k - GS_{n,k})}$$

Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1 - \frac{1}{(L_k - GS_{n,k})}$ olarak yazılabilmektedir.

4. durum: ($GS_{n,k} = L_k - 1$) ve ($GS_{n+1,k} = \emptyset$) ve ($SA_n(k) = 0$)

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarının olası maksimum iş yükünden bir az olması durumunda, k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında tamamlanmakta ve devam eden aktivite kümesinden silinmektedir ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$). Bu nedenle, $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmakta ve $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılabilmektedir.

Geçiş olasılıkları için geriye kalan 6 durum ise ilgili aktivite özelinde fazla kaynak kullanımının gerçekleştiği durum yani tamamlanan iş yükü miktarının t_f+1 kadar artacağını belirten $SA_n(k)=1$ aksiyonu dikkate alınarak tanımlanmaktadır.

5. durum: ($GS_{n,k} < B_k - t_f - 1$) ve ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1$) ve ($SA_n(k) = 1$)

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükünün olası minimum iş yükü ile (t_f+1) farkından daha küçük olması durumunda ve fazla mesai aksiyonu altında, k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında devam etmekte ($k \in D_{n+1}$) ve

tamamlanan iş yükü miktarı t_f+1 kadar artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f+1$). Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılmaktadır.

6. durum: ($B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1$) ve ($GS_{n+1,k} = \emptyset$) ve ($SA_n(k) = 1$)

n. periyot başında, k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı B_k-1 değerine eşit veya büyük ve L_k-t_f-1 değerinden küçük ise ve fazla mesai aksiyonu altında, aktivite bir sonraki dönemde tamamlanabilmekte ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$) ve devam eden aktivite kümesinden silinebilmektedir. Bu durumda, $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmaktadır.

k aktivitesi n. periyodun başında devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesinin n. periyotta tamamlanması için ise aktivite iş yükünün $GS_{n,k}+t_f+1$ değerine eşit veya daha küçük bir değere sahip olması gerekir. Bu bilgi ile, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = P(X_k \leq GS_{n,k}+t_f+1 \mid X_k > GS_{n,k})$$

$$= P(GS_{n,k} < X_k \leq GS_{n,k}+t_f+1) / P(X_k > GS_{n,k}) = \frac{\binom{t_f+1}{L_k-B_k+1}}{\binom{t_f+1}{L_k-GS_{n,k}}} = \frac{\binom{t_f+1}{L_k-B_k+1}}{\binom{t_f+1}{L_k-GS_{n,k}}}$$

Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \frac{\binom{t_f+1}{L_k-B_k+1}}{\binom{t_f+1}{L_k-GS_{n,k}}}$ olarak yazılabilmektedir.

7. durum: ($B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1$) ve ($GS_{n+1,k} = \emptyset$) ve ($SA_n(k) = 1$)

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı B_k-t_f-1 değerine eşit veya büyük ve B_k-1 değerinden küçük ise ve fazla mesai aksiyonu altında, aktivite bir sonraki dönemde tamamlanabilmekte ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$) ve devam eden aktivite kümesinden silinmektedir. Bu durumda, $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmaktadır.

k aktivitesi n. periyodun başında devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesinin n. periyotta tamamlanması için ise aktivite iş yükünün $GS_{n,k}+t_f+1$ değerine eşit veya daha küçük bir değere sahip olması gerekir. Bu bilgi ile, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = P(X_k \leq GS_{n,k}+t_f+1 \mid X_k > GS_{n,k})$$

$$= P(GS_{n,k} < X_k \leq GS_{n,k+t_f+1}) / P(X_k > GS_{n,k}) = P(B_k \leq X_k \leq GS_{n,k+t_f+1}) / P(X_k > GS_{n,k})$$

$$= \frac{(GS_{n,k+t_f-B_k+1+1}) / (L_k - B_k + 1)}{1} = \frac{(GS_{n,k+t_f-B_k+2})}{(L_k - B_k + 1)}$$

Bu sonuçla, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \frac{(GS_{n,k+t_f-B_k+2})}{(L_k - B_k + 1)}$ olarak ifade edilebilmektedir.

8. durum: $(B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1)$ ve $(SA_n(k) = 1)$

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı $B_k - 1$ değerine eşit veya büyük ve $L_k - t_f - 1$ değerinden küçük ise ve fazla mesai aksiyonu altında, aktivite bir sonraki dönemde devam edebilmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanan iş yükü miktarı $t_f + 1$ kadar artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1$).

k aktivitesi n. periyodun başında devam ediyorsa aktivite iş yükünün $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesi n. periyotta tamamlanmayıp (n+1). periyotta devam ediyorsa ise aktivite iş yükünün $GS_{n,k+t_f+1}$ 'den daha büyük bir değere sahip olması gerekir. Bu durumda, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = P(X_k > GS_{n,k+t_f+1} | X_k > GS_{n,k})$$

$$= P(X_k > GS_{n,k+t_f+1}) / P(X_k > GS_{n,k}) = \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1) / (L_k - B_k + 1)}{(L_k - GS_{n,k}) / (L_k - B_k + 1)} = \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - GS_{n,k})}$$

Bu sonuçla, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1 - \frac{(t_f + 1)}{(L_k - GS_{n,k})}$ olarak ifade edilebilmektedir.

9. durum: $(B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1)$ ve $(SA_n(k) = 1)$

n. periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarı $B_k - t_f - 1$ değerine eşit veya büyük ve $B_k - 1$ değerinden küçük ise ve fazla mesai aksiyonu altında,

aktivite bir sonraki dönemde devam edebilmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanan iş yükü miktarı t_f+1 kadar artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f+1$).

k aktivitesi n . periyodun başında devam ediyorsa aktivite süresinin $GS_{n,k}$ 'dan büyük olduğu bilinmektedir. k aktivitesi n . periyotta tamamlanmayıp $(n+1)$. periyotta devam ediyorsa ise aktivite iş yükünün $GS_{n,k}+t_f+1$ 'den daha büyük bir değere sahip olması gerekir. Bu bilgi ile, ilgili geçiş olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = P(X_k > GS_{n,k}+t_f+1 \mid X_k > GS_{n,k})$$

$$= \frac{P(X_k > GS_{n,k}+t_f+1)}{P(X_k > GS_{n,k})} = \frac{\frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - B_k + 1)}}{1} = \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - B_k + 1)}$$

Bu sonuçla, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - B_k + 1)}$ olarak yazılabilmektedir.

10. durum: ($GS_{n,k} \geq L_k - t_f - 1$) ve ($GS_{n+1,k} = \emptyset$) ve ($SA_n(k) = 1$)

n . periyot başında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükünün maksimum iş yükünden t_f+1 kadar az olması durumunda $SA_n(k)=1$ kararı ile k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında tamamlanacak olup devam eden aktiviteler kümesinden silinecektir ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$). Bu nedenle $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmakta ve $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılabilmektedir.

$SA_n(k)=0$ ve $SA_n(k)=1$ aksiyonları altında belirtilen durumların dışındaki diğer tüm durumlarda ise $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 0$ olarak ifade edilebilmektedir.

Belirtilen 10 durum dikkate alınarak $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k))$ geçiş olasılığı Denklem (1) ile gösterilmektedir.

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \begin{cases} 1 & (GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1) & SA_n(k) = 0 \\ \frac{1}{L_k - GS_{n,k}} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 0 \\ 1 - \frac{1}{L_k - GS_{n,k}} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1) & SA_n(k) = 0 \\ 1 & (GS_{n,k} = L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 0 \\ 1 & (GS_{n,k} < B_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) & SA_n(k) = 1 \\ \frac{(t_f+1)}{(L_k - GS_{n,k})} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 1 \\ \frac{(GS_{n,k} + t_f - B_k + 2)}{(L_k - B_k + 1)} & (B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 1 \\ 1 - \frac{(t_f+1)}{(L_k - GS_{n,k})} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) & SA_n(k) = 1 \\ \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - B_k + 1)} & (B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) & SA_n(k) = 1 \\ 1 & (GS_{n,k} \geq L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Aktivite bazında geçiş olasılıklarının yazılmasıyla a aksiyon seti altında s durumundaki bir proje durumu için j durumuna geçiş olasılığı $P_{sj}(a)$ Denklem (2)'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$P_{sj}(a) = \prod \left\{ \begin{array}{l} k \in D_n; SA_n(k) \in \{0,1\}; \\ GS_{n,k} \in G_n; \\ GS_{n+1,k} \in G_{n+1}; \\ F_{n+1} = F_n + t_f(\sum_k SA_n(k)); \\ F_{n+1} \leq m; \end{array} \right\} P_{GS_n(k); GS_{n+1}(k)}(SA_n(k)) \quad (2)$$

$s = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ve $a = \{SA_n(k_1), SA_n(k_2), SA_n(k_3), \dots, SA_n(k_{|D_n|})\}$ için

$j = (G_{n+1}, F_{n+1}, T_{n+1}, D_{n+1}), D_{n+1} = \{D_n \setminus (T_{n+1} - T_n)\}$

3.2.6. Amaç Fonksiyonu ve Optimalite Denklemi

Çalışma kapsamında süre taahhütü dikkate alındığından verilen koşullar altında ortalama proje süresi optimize edilmektedir. n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek en iyi ortalama süre olan $f_n(s)$ için sınır değer Denklem (3)'te sunulmaktadır.

$$f_{N+1}(\emptyset, F_n, I, \emptyset) = 0, F_n \leq m \quad (3)$$

$f_n(s)$ için optimalite denklemi ise Denklem (4)'te verilmektedir.

$$f_n(s) = \min_{\{a\}} \{r_n(s, a) + \sum_j P_{sj}(a) \times f_{n+1}(j)\}, n \leq N \quad (4)$$

Formülasyonda bulunan $P_{sj}(a)$ olasılık değeri Denklem (2)'de belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır.

Problemde asıl amaç, en iyi ortalama proje süresini ve bu süreyi verecek optimal aksiyonları bulmaktır. En iyi ortalama proje süresini ifade eden amaç fonksiyonu ise $f_1(G_1, 0, \emptyset, D_1)$ ile verilmektedir. Burada, D_1 kümesi projede öncül aktivitesi bulunmayan ve proje başladığı anda başlayabilen aktivitelerdir. G_1 kümesi ise D_1 kümesinde bulunan aktiviteler için hiç tamamlanmamış iş yüklerinden dolayı 0'lerden oluşmaktadır.

Projede asıl amacın $f_1(G_1, 0, \emptyset, D_1)$ değerinin ve ilgili optimal aksiyonların bulunması olmasına rağmen, Denklem (4)'te verilen $f_n(s)$ formülasyonu ile $n > 1$ olduğu ara dönemlerde de mevcut durum dikkate alınarak hesaplama yapabilmek, durumu tekrar değerlendirerek aksiyon alabilmek mümkün olmaktadır.

3.3. Deterministik Proje Planlama

Önerilen model kapsamında, projeyi oluşturan aktiviteler için minimum ve maksimum iş yüklerinin bilindiği, aktivitelerin bu değerler arasında efor harcanarak tamamlanabildiği durumda proje için olasılıksal dinamik planlama anlatılmıştır. Bu bölümde, aktivitelerin sabit iş yükü değerlerine sahip olduğu varsayılarak, model kurgusu deterministik iş yükleri ile tekrar oluşturulmuştur.

3.3.1. Karar Noktaları

Stokastik iş yüklerine sahip modelde olduğu gibi deterministik model kapsamında da kesikli $n \in \{1,2,\dots,N\}$ noktaları karar noktalarını göstermektedir. Aktiviteler sabit iş yüklerine sahip olduğundan ve normal mesai ile birim zamanda bir birimlik iş yükü tamamlandığından, maksimum proje süresini oluşturan N değeri hesaplanabilmektedir. Karar noktaları kapsamında kullanılan değişkenlerde herhangi bir değişiklik bulunmamaktadır.

3.3.2. Durum Değişkeni ve Durum Değişkenleri Uzayı

Deterministik proje planlama kapsamında, aktivite iş yüklerinin stokastik olduğu durumda tanımlanan durum değişkeni ve durum uzayı kullanılabilir. Bu nedenle, aynı tanımlara sahip olmak üzere, n . periyot başında projenin durumunu gösteren S_n durum değişkeni $S_n = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ile tanımlanabilmektedir.

3.3.3. Aksiyonlar

Her bir karar zamanı olan n periyotta sürece müdahale edilmeyeceği anlamına gelen $a=0$ aksiyonu ya da kaynak kullanımının arttırılmasını ifade eden $a=1$ fazla mesai aksiyonu benzer şekilde kullanılmaktadır.

$a_n(s) = \{ SA_n(k) : k \in D_n \} = \{ (SA_n(k_1), SA_n(k_2), \dots, SA_n(k_{|D_n|})) : k_1, k_2, \dots, k_{|D_n|} \in D_n \}$ olarak sıralı şekilde tanımlanabilmektedir.

Aktivite iş yüklerinin stokastik olduğu duruma benzer şekilde periyot ve proje bazında aşağıda verilen 2 kısıtın sağlanması gerekmektedir:

- $SA_n(k_1) + SA_n(k_2) + \dots + SA_n(k_{|D_n|}) \leq |D_n|$
- $F_n + t_f [SA_n(k_1) + SA_n(k_2) + \dots + SA_n(k_{|D_n|})] \leq m$

3.3.4. Ödüller

Ödül süre olarak tanımlanmakta olup olasılıksal proje planlama kapsamında kullanılan aynı değişkenler ile devam edilebilmekte ve benzer durumlar için ödül tanımlanabilmektedir.

- $n = N+1$ için $r_{N+1}(s,a) = 0 \quad \forall(s,a)$

Projenin maksimum süresine ulaşıldığı zaman projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır olur.

- $n \leq N$ için $r_n(s,a) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } s = (\emptyset, F_n, I, \emptyset) \\ 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases}$

Projede tüm aktiviteler tamamlandığı zaman proje tamamlanmış olacağı için aksiyon alınmamakla beraber sıfır dönemlik süre elde edilirken diğer durumlarda alınabilecek tüm aksiyonlar için bir sonraki (n+1). periyota geçişte bir dönemlik ödül elde edilmektedir.

3.3.5. Geçiş Olasılıkları

Proje n. periyot başında s durumunda uygun bir aksiyon alındığında bulunduğu durumdan geçebilmesi mümkün başka bir duruma belirli bir olasılık ile geçiş yapmaktadır. Bu olasılıkları ifade eden $P_{sj}(a)$ değerinin hesaplanması için ise öncelikli olarak devam eden aktivitelerin aktivite bazlı geçiş olasılıklarının hesaplanması gerekmektedir.

Olasılıksal proje planlamada her aktivitenin tamamlanabileceği minimum ve maksimum iş yükü değerleri kullanılarak geçiş olasılıkları hesaplanabilmekteydi. Bu doğrultuda, minimum ve maksimum iş yüklerini ifade eden değişkenler tanımlanmıştı. Deterministik proje planlama kapsamında ise aktivitelerin sahip olduğu iş yükleri sabit olduğu için bu değişkenler yerine k aktivitesinin tamamlanması için gereken sabit iş yükünü gösteren E_k tanımlanmaktadır.

Bir aktivitede henüz E_k kadar iş yükü harcanmamışsa, aktivite bir sonraki periyotta devam etmektedir. Aktivitede harcanan efor E_k değerine ulaştığında ise aktivite tamamlanarak sonraki periyotta varsa ardıl olan aktivite(ler) başlamaktadır.

Bir aktivite için hesaplanan olasılık değeri, tamamlanan iş yüküne ek olarak $SA_n(k)$ aksiyonuna da bağlı olduğundan ve $SA_n(k)$ kümesi 2 farklı değer alabildiğinden geçiş olasılıkları alınacak aksiyona göre farklılaşmaktadır.

1. durum: $(GS_{n,k} < E_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1)$ ve $(SA_n(k) = 0)$

n. periyot başında $SA_n(k)=0$ aksiyonu altında devam eden k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükünün, ilgili aktivitenin tamamlanması için gereken iş yükünün bir eksiğinden daha az olması durumunda k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında devam etmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanmış iş yükü 1 artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1$). Bu nedenle, belirtilen durum için $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılabilmektedir.

2. durum: $(GS_{n,k} = E_k - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = \emptyset)$ ve $(SA_n(k) = 0)$

n. periyot başında $SA_n(k)=0$ aksiyonu altında k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarının ilgili aktivitenin tamamlanması için gereken iş yükünden bir az olması durumunda, k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında tamamlanmakta ve devam eden aktivite kümesinden silinmektedir ($k \notin D_{n+1}$; $k \in T_{n+1}$). Bu nedenle, $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmakta ve ilgili durumda $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ yazılabilmektedir.

3. durum: $(GS_{n,k} < E_k - t_f - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1)$ ve $(SA_n(k) = 1)$

n. periyot başında ve fazla mesai aksiyonu altında, k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarının ilgili aktivitenin tamamlanması için gereken iş yükü ile (t_f+1) farkından daha küçük olması durumunda k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında devam etmekte ($k \in D_{n+1}$) ve tamamlanan iş yükü miktarı t_f+1 kadar artmaktadır ($GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f+1$). Bu nedenle, $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ yazılabilmektedir.

4. durum: $(GS_{n,k} \geq E_k - t_f - 1)$ ve $(GS_{n+1,k} = \emptyset)$ ve $(SA_n(k) = 1)$

n. periyot başında, k aktivitesine ait tamamlanmış iş yükü miktarının ilgili aktivitenin tamamlanması için gereken iş yükü ile (t_f+1) farkından büyük ve eşit olması durumunda $SA_n(k)=1$ kararı ile k aktivitesi mutlaka bir sonraki periyodun başında tamamlanacak olup devam eden aktiviteler kümesinden silinecektir ($k \notin$

D_{n+1} ; $k \in T_{n+1}$). Bu nedenle $GS_{n+1,k} = \emptyset$ olmakta ve $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 1$ olarak yazılabilmektedir.

$SA_n(k)=0$ ve $SA_n(k)=1$ aksiyonları altında yukarıda verilen 4 durum dışındaki diğer tüm durumlarda $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = 0$ olmaktadır.

Belirtilen 4 durum dikkate alınarak $P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k))$ geçiş olasılığı ifadesi Denklem (5)'te verilmektedir.

$$P_{GS_{n,k}; GS_{n+1,k}}(SA_n(k)) = \begin{cases} (GS_{n,k} < E_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1) & SA_n(k) = 0 \\ (GS_{n,k} = E_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 0 \\ (GS_{n,k} < E_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) & SA_n(k) = 1 \\ (GS_{n,k} \geq E_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) & SA_n(k) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Aktivite bazında geçiş olasılıklarının yazılmasıyla a aksiyon seti altında s durumundaki bir proje durumu için j durumuna geçiş olasılığı $P_{sj}(a)$ Denklem (6) ile ifade edilebilmektedir.

$$P_{sj}(a) = \prod \left\{ \begin{array}{l} k \in D_n ; SA_n(k) \in \{0,1\} ; \\ GS_{n,k} \in G_n ; \\ GS_{n+1,k} \in G_{n+1} ; \\ F_{n+1} = F_n + t_f(\sum_k SA_n(k)) ; \\ F_{n+1} \leq m ; \end{array} \right\} P_{GS_n(k); GS_{n+1}(k)}(SA_n(k)) \quad (6)$$

$s = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ve $a = \{SA_n(k_1), SA_n(k_2), SA_n(k_3), \dots, SA_n(k_{|D_n|})\}$ için

$j = (G_{n+1}, F_{n+1}, T_{n+1}, D_{n+1})$ ve $D_{n+1} = D_n \setminus (T_{n+1} - T_n)$

3.3.6. Amaç Fonksiyonu ve Optimalite Denklemi

Deterministik proje planlama kapsamında da süre taahhütü dikkate alındığından verilen koşullar altında proje süresi optimize edilmektedir. Proje n. periyodun başında s durumunda ise proje bitimine kadar elde edilebilecek en iyi süre olan $f_n(s)$ için sınır değer Denklem (7)'de verilmiş olup $n \leq N$ için optimalite denklemi Denklem (8)'de sunulmaktadır.

$$f_{N+1}(\emptyset, F_n, I, \emptyset) = 0, F_n \leq m \quad (7)$$

$$f_n(s) = \min_{\{a\}} \{r_n(s, a) + \sum_j P_{sj}(a) \times f_{n+1}(j)\}, n \leq N \quad (8)$$

Optimalite denkleminde bulunan $P_{sj}(a)$ olasılık değeri ise Denklem (6)'da belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır. Problemdede, asıl amaç en iyi proje süresini ve bu süreyi sağlayacak optimal aksiyonları bulmaktır. Bu bağlamda, en iyi ortalama proje süresini ifade eden amaç fonksiyonu ise $f_1(G_1, 0, \emptyset, D_1)$ ile ifade edilebilmektedir. Buradaki, D_1 kümesi projede öncül aktivitesi bulunmayan ve proje başladığı anda başlayabilen aktiviteleri, G_1 kümesi ise D_1 kümesinde bulunan aktiviteler için hiç tamamlanmamış iş yüklerini gösteren 0'lerden oluşan sıralı kümeyi göstermektedir.

Bu formülasyon ile $n > 1$ olduğu ara dönemlerde de mevcut durumu dikkate alarak hesaplama yapabilmek, durumu tekrar değerlendirebilmek ve aksiyon alabilmek mümkün olmaktadır.

3.4. Modelde Uygulanabilecek Özel Durumlar

Tezin bu bölümünde, kurgulanan modelin özel durumları olarak kaynak kullanımını arttırmanın mümkün olmadığı ve sınırsız kaynak kullanımına izin verildiği iki özel duruma değinilmiş ve bu özel durumlardaki model karakteristikleri sunulmuştur.

3.4.1. Modelin Sabit Kaynak Durumu

Proje ömrü boyunca, projeye atanmış olan sabit kaynak ile gerekli olan tüm işlerin tamamlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, modelde kaynak kullanımını arttırmaya yönelik izin verilebilecek fazla mesai karar sayısı sıfırdır ve kurgulanan modelde herhangi bir durum için aksiyon kümesinde sadece $a=0$ aksiyonu bulunmakta olup model bu aksiyon üzerinde ilerlemektedir. Özel durum kapsamında kaynak kullanımını arttırmaya izin verilmediğinden durum değişkeni içerisinde yer alan ve fazla mesai ile tamamlanan iş yükünü ifade eden F_n değişkeni işlevsiz hale gelmektedir. Modelde, $m=0$ olarak varsayılmakta ve F_n değişkeninin değeri sabit ve sıfır olarak alınmaktadır. Bu nedenle, modelin bu özel durumunda kullanılan durum değişkeni $S_n = (G_n, 0, T_n, D_n)$ ile verilebilmektedir.

Belirtildiği üzere, modelin bu özel durumunda herhangi bir k aktivitesinde n . periyotta sadece 0 aksiyonu alınabilmektedir. Bu nedenle $SA_n(k) = \{0\}$ ve $a_n(s) = \{SA_n(k) : k \in D_n\}$ olarak yazılabilmektedir.

Modelin genel kurgusuna benzer şekilde tüm aktivitelerin tamamlandığı durumda projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır iken, ara dönemlerde n . periyottan $(n+1)$. periyoda geçişte proje tamamlanmadığı sürece 1 dönemlik süre (kazanç) elde edilmektedir.

- $n = N+1$ için $r_{N+1}(s,0) = 0 \quad \forall s$

Projenin maksimum süresine ulaşıldığı zaman projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır olur.

- $n \leq N$ için $r_n(s,0) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } s = (\emptyset, 0, I, \emptyset) \\ 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases}$

Projede tüm aktiviteler tamamlandığı zaman proje tamamlanmış olacağı için aksiyon alınmamakla beraber sıfır dönemlik süre elde edilirken diğer durumlarda alınabilecek tüm aksiyonlar için bir sonraki $(n+1)$. periyoda geçişte bir dönemlik ödül elde edilmektedir.

Projenin durumları arası geçiş olasılıkları için öncelikli olarak aktivite bazında geçiş olasılıklarının hesaplanması gerekmektedir. Devam eden bir k aktivitesi, n. periyotta 0 aksiyonu altında Denklem (9)'da verilen $P_{n,k}(0)$ olasılıkları ile n+1 dönemi değerlerine geçiş yapmaktadır.

$$P_{n,k}(0) = \begin{cases} 1 & , (GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1) \\ \frac{1}{L_k - GS_{n,k}} & , (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) \\ 1 - \frac{1}{L_k - GS_{n,k}} & , (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + 1) \\ 1 & , (GS_{n,k} = L_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) \end{cases} \quad (9)$$

n. dönemde s durumundaki bir proje sabit a=0 aksiyonu ile Denklem (10)'da verilen $P_{sj}(0)$ olasılığı ile j durumuna geçiş yapabilmektedir.

$$P_{sj}(0) = \prod_{\left\{ \begin{array}{l} k \in D_n ; SA_n(k) \in \{0\} ; \\ GS_{n,k} \in G_n ; \\ GS_{n+1,k} \in G_{n+1} ; \end{array} \right\}} P_{GS_n(k); GS_{n+1}(k)}(SA_n(k)) \quad (10)$$

$s = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ve $a = \{SA_n(k_1), SA_n(k_2), SA_n(k_3), \dots, SA_n(k_{|D_n|})\}$ için

$j = (G_{n+1}, F_{n+1}, T_{n+1}, D_{n+1})$ ve $D_{n+1} = D_n \setminus (T_{n+1} - T_n)$, $F_n = F_{n+1} = 0$

n. periyoda projenin s durumu ile başladığında proje bitimine kadar elde edilebilecek ortalama süre olan $f_n^1(s)$ için sınır değer Denklem (11)'de verilmiş olup, $n \leq N$ için iteratif denklem Denklem (12)'de gösterilmektedir.

$$f_{N+1}^1(\emptyset, 0, I, \emptyset) = 0 \quad (11)$$

$$f_n^1(s) = \{1 + \sum_j P_{sj}(0) \times f_{n+1}^1(j)\} , n \leq N \quad (12)$$

Özelleştirilmiş sabit kaynaklı durum kapsamında model optimizasyon problemi olmaktan çıktığı için $f_n^1(s)$ fonksiyonu proje n. periyotta s durumunda iken proje tamamlanana kadar geçecek olan ortalama süre bilgisini vermektedir.

E_k, X_k değişkeninin beklenen değerine eşit olsun ($E_k = E[X_k]$). Seri bağlı aktivitelerden oluşan proje ağırları için modelin a=0 özel durumundaki $f_n^1(s)$ değeri, deterministik proje

planlama kapsamında sabit E_k iş yüküne sahip aktiviteler ile yapılan kritik yol yöntemi çözümünde elde edilen sonuçların ortalamasına eşittir.

3.4.2. Modelin Sınırsız Kaynak Durumu

Proje süresince, projeye atanmış olan kaynağın sınırsız kullanımı olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, $m = \infty$ olarak varsayılmakta ve F_n değişkeni için bir sınır bulunmamaktadır. Başka bir ifadeyle, modelde kaynak kullanımını arttırmaya yönelik izin verilebilecek fazla mesai karar sayısı sonsuzdur. Bu durumda, model en iyi süreye ulaşabilmek için maliyet bulunmadığından her periyotta ve her aktivitede fazla mesai aksiyonu almaya yönelmektedir. Model genel olarak $a=1$ aksiyonu üzerinde ilerlemektedir. Modelin bu özel durumunda kullanılan durum değişkeni modelin genel kurgusunda kullanılan durum değişkeni olan $S_n = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ile verilebilmektedir.

Modelde herhangi bir k aktivitesinde n . periyotta 1 aksiyonu alınabilmektedir. Kalan iş yüküne bağlı olarak bazı durumlarda $a=1$ aksiyonunda elde edilebilecek ödül değeri $a=0$ aksiyonunda elde edilebilecek ödül değerine eşit olabilmektedir. Ancak bu özel durumda, $a=1$ aksiyonunun alındığı varsayılmaktadır. Proje n . periyotta s durumunda iken devam eden aktiviteler için $a_n(s)$ aksiyon kümesi elde edilmektedir.

$$SA_n(k) = \{1\}, \quad a_n(s) = \{ SA_n(k) : k \in D_n \}$$

Benzer şekilde tüm aktivitelerin tamamlandığı durumda, projeye devam edilemeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır iken ara dönemlerde n . periyottan bir sonraki $(n+1)$. periyoda geçişte proje tamamlanmadığı sürece 1 dönemlik süre (kazanç) elde edilmektedir.

- $n = N+1$ için $r_{N+1}(s,1) = 0 \quad \forall s$

Projenin maksimum süresine ulaşıldığı zaman projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır olur.

- $n \leq N$ için $r_n(s,1) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } s = (\emptyset, F_n, I, \emptyset) \\ 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases}$

Projede tüm aktiviteler tamamlandığı zaman proje tamamlanmış olacağı için aksiyon alınmamakla beraber sıfır dönemlik süre elde edilirken diğer durumlarda alınabilecek tüm aksiyonlar için bir sonraki $(n+1)$. periyoda geçişte bir dönemlik ödül elde edilmektedir.

Devam eden bir k aktivitesi, n döneminde 1 aksiyonu altında Denklem (13)'te verilen $P_{n,k}(1)$ olasılıkları ile n+1 dönemi değerlerine geçiş yapmaktadır.

$$P_{n,k}(1) = \begin{cases} 1 & (GS_{n,k} < B_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) \\ \frac{(t_f+1)}{(L_k - GS_{n,k})} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) \\ \frac{(GS_{n,k} + t_f - B_k + 2)}{(L_k - B_k + 1)} & (B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) \\ 1 - \frac{(t_f+1)}{(L_k - GS_{n,k})} & (B_k - 1 \leq GS_{n,k} < L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) \\ \frac{(L_k - GS_{n,k} - t_f - 1)}{(L_k - B_k + 1)} & (B_k - t_f - 1 \leq GS_{n,k} < B_k - 1) , (GS_{n+1,k} = GS_{n,k} + t_f + 1) \\ 1 & (GS_{n,k} \geq L_k - t_f - 1) , (GS_{n+1,k} = \emptyset) \end{cases} \quad (13)$$

n. dönemde a aksiyon seti altında s durumundaki bir proje Denklem (14)'te verilen $P_{sj}(1)$ olasılığı ile j durumuna geçiş yapabilir.

$$P_{sj}(1) = \prod \left\{ \begin{array}{l} k \in D_n ; SA_n(k) \in \{1\}; \\ GS_{n,k} \in G_n; \\ GS_{n+1,k} \in G_{n+1}; \\ F_{n+1} = F_n + t_f (\sum_k SA_n(k)); \end{array} \right\} P_{GS_n(k); GS_{n+1}(k)}(SA_n(k)) \quad (14)$$

$s = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ ve $a = \{SA_n(k_1), SA_n(k_2), SA_n(k_3), \dots, SA_n(k_{|D_n|})\}$ için

$j = (G_{n+1}, F_{n+1}, T_{n+1}, D_{n+1})$ ve $D_{n+1} = D_n \setminus (T_{n+1} - T_n)$

a=1 aksiyonu altında n. periyotta s durumu ile başlanıldığında proje bitimine kadar elde edilebilecek ortalama süre olan $f_n^2(s)$ için sınır değer Denklem (15)'te verilmiş olup, $n \leq N$ için iteratif denklem Denklem (16)'da gösterilmektedir.

$$f_{N+1}^2(\emptyset, F_n, I, \emptyset) = 0 \quad (15)$$

$$f_n^2(s) = \{1 + \sum_j P_{sj}(1) \times f_{n+1}^2(j)\} , n \leq N \quad (16)$$

Özelleştirilmiş sınırsız kaynak durumunda model optimizasyon problemi olmaktan çıktığı için $f_n^2(s)$ fonksiyonu proje n. periyotta s durumunda iken proje tamamlanana kadar geçecek olan ortalama süre bilgisini vermektedir.

Modelde uygulanabilecek özel durumlar başlığı altında modelin sabit kaynak durumuna ve sınırsız kaynak durumuna değinilmiştir. n. periyotta s durumu ile başlandığında proje bitimine kadar geçebilecek ortalama sürenin a=0 aksiyonu altında $f_n^1(s)$ ve a=1 aksiyonu altında $f_n^2(s)$ ile ifade edildiği belirtilmiştir.

$$f_n^2(s) \leq f_n(s) \leq f_n^1(s) \quad (17)$$

Özel durumların dikkate alındığı iki modelin ortalama proje süreleri ve genel modelin en iyi ortalama proje süresi karşılaştırıldığında Eşitsizlik (17) geçerli olmaktadır.

4. SEZGİSEL POLİTİKA VE PERFORMANSI

Oluşturulan kesikli zaman Markov Karar Modelinde durum uzayının çok büyük olmasından kaynaklı yüksek bellek gereksinimi ve hesaplama yükü ortaya çıkmaktadır. Durum uzayına ek olarak aksiyon kümeleri, geçiş olasılıkları da göz önüne alındığında model boyut olarak çok büyümektedir ve zorlaşmaktadır. Proje ağında aynı periyotta devam eden paralel aktivite sayısının c olduğu düşünülürse, her bir tamamlanan iş yükü değeri için hesaplanacak olan geçiş olasılığı sayısı 4^c olmaktadır. Devam eden paralel aktiviteler için hesaplanacak olan toplam geçiş olasılığı sayısı ise $4^c \cdot \prod_{k=1}^c L_k$ olarak hesaplanabilmektedir. Bu doğrultuda, tez çalışmasının bu bölümünde proje yöneticisinin ve aktivite sorumlularının geçmiş tecrübelerini de dikkate alan sezgisel bir model önerilmektedir. Bölüm 4.1.'de sezgisel model önerisi yapılarak Bölüm 4.2.'de sezgisel modelin performansı incelenmiştir.

4.1. Sezgisel Model

Proje başlamadan önce sözleşmede proje süresi taahhüt edilmekte olup projenin bu sürede tamamlanması için proje süresi boyunca her karar noktasında gerekli aksiyonların alınması gerekmektedir. Sezgisel model ile proje süresince dinamik karar alınması sağlanmaktadır. Projenin herhangi bir periyodunda aktivitelerin tamamlanma oranlarına bakılarak alınacak aksiyonlara karar verilmektedir. Bu sayede daha az işlem yapılarak projenin planlanan sürede tamamlanması hedeflenmektedir.

Model kapsamında, sezgisel politika önerisi için kullanılan varsayımlar, değişkenler, ve parametreler aşağıda açıklanmaktadır.

- Kesikli zamanlı toplam N periyottan oluşan bir proje için her n karar noktasında değişkenlik gösteren $S_n = (G_n, F_n, T_n, D_n)$ durum değişkeni kullanılmaktadır.
- Proje yöneticisinin ve aktivite sorumlularının tecrübeleri ve geçmiş veriler doğrultusunda her aktivitenin tamamlanabileceği en az ve en çok iş yükü bilindiğinden en kısa ve en uzun süre hesaplanabilmektedir.
- Proje başında, her aktivite için hesaplanan en kısa ve en uzun sürelerin ortalaması alınarak aktivitelerin planlanan teorik süreleri elde edilmektedir. Her i aktivitesi için planlanan süre H_i olarak ifade edilmektedir. H_i değişkeni, X_i değişkeninin beklenen değerinin ($E[X_i]$) süreye çevrildiği değeridir.

- Aktivitelerin planlanan sürelerini ifade eden H_i değerleri kritik yol yönteminde kullanılarak proje süresi hesaplanmaktadır. Hesaplanan proje süresinin, proje başlamadan önce sözleşmede taahhüt edilen süreye eşit olduğu varsayılmaktadır.
- Sezgisel politika kapsamında tamamlanan ve devam eden aktiviteler için harcanan süre ile bu aktivitelerin planlanan süreleri karşılaştırıldığından, projenin kritik yolu üzerinde tamamlanmış olan aktiviteler y indeksi ile ifade edilmektedir. $y \in T_n \subset I$
- Her karar noktasında, tamamlanan ve devam eden aktiviteler için harcanan süre ve bu aktivitelerin planlanan süreleri belirli bir oran dahilinde karşılaştırılmaktadır. Aktivite tamamlandıktan sonra o aktivite için aksiyon almak mümkün olmadığından, gecikme daha fazla artmadan sürece müdahale edebilmek için aktivitenin planlanan süresinin belirli bir oranı kadar zaman geçtiğinde karar kuralı uygulanmaktadır. Projede planlanan sürenin ne kadarına ulaşıldığı belirleyen bu oran x_1 parametresi ile belirtilmektedir. x_1 parametresi, 0 ile 1 arasında değer almaktadır ($0 < x_1 < 1$). Parametrenin küçük değerler aldığı durumlarda, sürece daha erken müdahale edildiği için daha kısa süreler elde edilirken, 1'e yakın değerler aldığında ortalama süre daha uzun olmaktadır. x_1 parametresinin optimal değeri, koşullara ve duruma bağlı olarak değişiklik göstermektedir.
- Önerilen sezgisel modelde, karar noktalarında optimal aksiyon yerine bir karar kuralına göre alınacak aksiyon belirlenmektedir. n . periyot başında devam eden bir $k \in D_n$ aktivitesi için aşağıdaki $SA_n(k)$ kuralı gereği aksiyona karar verilmektedir.

$$SA_n(k) = \begin{cases} 1 & , \quad n - 1 \geq \lfloor x_1 * (\sum_{y \in T_n} H_y + H_k) \rfloor \\ 0 & , \quad \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Karar kuralında öncelikle sürece ne kadar süre önce müdahale edileceğini belirten x_1 parametresi belirlenmektedir. Model her karar noktasında devam eden bir aktivite için, proje başından itibaren toplam geçirilen süre ile proje takvimine göre geçirilmesinin planlandığı süreyi karşılaştırmaktadır. Geçirilen sürenin parametre ile ayarlanan kritik noktayı geçmesi durumunda $a=1$ aksiyonu alınmaktadır.

Projede aktiviteler seri ya da paralel bağı olabilmektedir. Projenin kritik yolu seri bağı aktivitelerde ilgili aktivite üzerinden ilerlerken, paralel bağı aktivitelerde en uzun süreye sahip aktivite üzerinden ilerlemektedir. Paralel bağı aktivitelerde aynı anda birden fazla aktivite aktif duruma gelebilmektedir. Bu husus göz önüne alınarak meydana gelebilecek durumlar için karar kuralı aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

- Aktivite seri bağılıysa; n. karar noktası, ilgili aktivitenin proje takviminde tamamlanmasının planlandığı toplam sürenin x_1 kadarına eşitse veya daha fazla süre geçmiş durumdaysa $a=1$ aksiyonu alınır. Diğer durumda $a=0$ aksiyonu alınır.
- Aktivite paralel bağılıysa; n. karar noktası, paralel aktivitelerden kritik olan aktivitenin proje takviminde tamamlanmasının planlandığı toplam sürenin x_1 kadarına eşitse veya daha fazla süre geçmiş durumdaysa $a=1$ aksiyonu alınır. Diğer durumda $a=0$ aksiyonu alınır.

Karar kuralı algoritmasının sözde kodu kullanılan notasyon ile beraber aşağıda verilmektedir.

Sezgisel Model Karar Kuralı Algoritması

Notasyon

N : Projenin tamamlanması için gereken maksimum periyottur.

n : Projenin her bir karar noktasını temsil eden periyottur.

D_n : n. periyot başında devam eden aktivite kümesidir.

T_n : n. periyot başında tamamlanmış olan aktivite kümesidir

i : Projenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken aktivite indeksidir.

k : Devam eden aktiviteleri belirten indekstir.

kk : Paralel bağı aktivitelerden kritik olan aktiviteyi belirten indekstir.

y : Kritik yol üzerindeki tamamlanmış aktiviteleri belirten indekstir.

$g_n(s)$: Sezgisel modelde n. periyoda s durumu ile başladığında proje bitimine kadar geçebilecek ortalama süredir.

H_i : i. aktivitenin planlanan süresidir.

x_1 : Projede planlanan sürenin ne kadarına ulaştığını belirten parametredir

$SA_n(k)$: n. periyot başında devam eden k. aktivite için alınacak aksiyondur.

1. İşleme **başla**
2. Her i aktivitesi için $E[X_i]$ değerini **bul**
3. Her i aktivitesi için $E[X_i]$ değerini kullanarak H_i değerini **bul**
4. Kritik yolu **bul**
5. N değerini **hesapla**
6. **Eğer** $n \geq N+1$ ise,
 $g_n(s) = 0$ **yap**
7. **Eğer** $n \leq N$ ise,
8. $k \in D_n$ **seç**
9. **Eğer** k proje planında kritik yol üzerinde ise,
10. **Eğer** $n-1 \geq \lfloor x_1 * (\sum_{y \in T_n} H_y + H_k) \rfloor$ ise, // $n-1$, proje planında k aktivitesi dahil toplam planlanan sürenin x_1 katının alt tam sayısından büyük ve eşitse
 $SA_n(k) = 1$ **yap**
11. **Eğer** $n-1 < \lfloor x_1 * (\sum_{y \in T_n} H_y + H_k) \rfloor$ ise,
 $SA_n(k) = 0$ **yap**
12. **Eğer** k proje planında kritik yol üzerinde değil ise,
13. **Eğer** $n-1 \geq \lfloor x_1 * (\sum_{y \in T_n} H_y + H_{kk}) \rfloor$ ise,
 $SA_n(k) = 1$ **yap**
14. **Eğer** $n-1 < \lfloor x_1 * (\sum_{y \in T_n} H_y + H_{kk}) \rfloor$ ise,
 $SA_n(k) = 0$ **yap**
15. $g_n(s)$ değerini **hesapla**
16. İşlemi **bitir**

- Sezgisel model kapsamındaki geçiş olasılıkları Markov Karar Süreci kapsamında oluşturulan geçiş olasılıkları ile benzer şekildedir. n . periyotta k aktivitesi için alınacak olan $SA_n(k)$ kararı altında $P_{n,k}(SA_n(k))$ geçiş olasılığı formülasyonu Denklem (1)'de daha önce verilmiştir.
- Ara dönemlerde dönemlik elde edilecek kazançlar süre cinsinden bir periyoda karşılık gelirken, projeyi oluşturan tüm aksiyonların tamamlandığı durumda elde edilecek dönemlik kazanç sıfırdır. Bu durum aynı zamanda proje süresi tamamlanana kadar bir fazla döneme geçiş yapılması ve proje tamamlandığında durulması anlamına gelmektedir.
 - $n = N+1$ için $r_{N+1}(s,a) = 0 \quad \forall (s,a)$

Projenin maksimum süresine ulaşıldığı zaman projeye devam edilmeyeceği için elde edilecek dönemlik kazanç sıfır olur.

- $n \leq N$ için $r_n(s,a) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } s = (\emptyset, F_n, I, \emptyset), a = \{0,1\} \\ 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases}$

Projede tüm aktiviteler tamamlandığı zaman proje tamamlanmış olacağı için aksiyon alınmamakla beraber sıfır dönemlik süre elde edilirken diğer durumlarda alınabilecek tüm aksiyonlar için bir sonraki (n+1). periyoda geçişte bir dönemlik ödül elde edilmektedir.

n. periyoda s durumu ile başlanıldığında proje bitimine kadar elde edilebilecek ortalama süre olan $g_n(s)$ için sınır değer Denklem (17)'de verilmiş olup, $n \leq N$ için iteratif denklem Denklem (18)'de gösterilmektedir.

$$g_{N+1}(\emptyset, F_n, I, \emptyset) = 0 \quad (17)$$

$$g_n(s) = \left\{ 1 + \sum_j P_{sj}(a) \times g_{n+1}(j) \right\}, n \leq N \quad (18)$$

Proje henüz tamamlanmadığı için dönemlik kazanç olan bir süre ve geçiş yapılacak (n+1). periyot durumlarının değerleri ile bu geçiş olasılıklarının çarpımlarından oluşan değerler toplanmaktadır. Genel modelden farklı olarak, sezgisel politika önerisinde karar kuralı gereği alınacak aksiyon önceden belirlendiği için $g_n(s)$ formülasyonunda minimizasyon hesaplaması kullanılmamaktadır.

4.2. Performans Değerlendirme Çalışması

Bu bölümde, önerilen sezgisel modelin performansı incelenmektedir. Bu amaçla, farklı aktivite ilişkilerine ve büyüklüklerine sahip proje ağları için Markov karar modeli, bu modelin incelenen özel durumları ve önerilen sezgisel model çözdürülmüştür. Aktivitelerin ilişkilerinin ve bilinen minimum (B_i) ve maksimum (L_i) sürelerinin yer aldığı proje ağlarının detayları Ek 2'de verilmiştir. Ayrıca, bu ağlara sahip tamamlanan 2 farklı projenin gerçekleştirme verileri paylaşılmıştır. Bilgileri verilen her proje ağı için bu bilgiler kullanılarak Excel VBA ile model çözümlerine girdi sağlayacak olan proje veri kümesi oluşturulmuştur. Proje ağlarından bir tanesi için oluşturulan veri kümesi örnek olarak Ek 3'te bulunmaktadır. Veri kümesi, devam eden her aktivite, bu aktiviteler için tamamlanmış olan iş yükü, alınabilecek aksiyonlar, aktivitenin devam etme yada etmeme durumundaki olasılık bilgilerini içermektedir. Bu bilgilerin birleşimi ile benzersiz anahtar-1 oluşturulmaktadır. İlave olarak, benzersiz anahtar-1 için bir

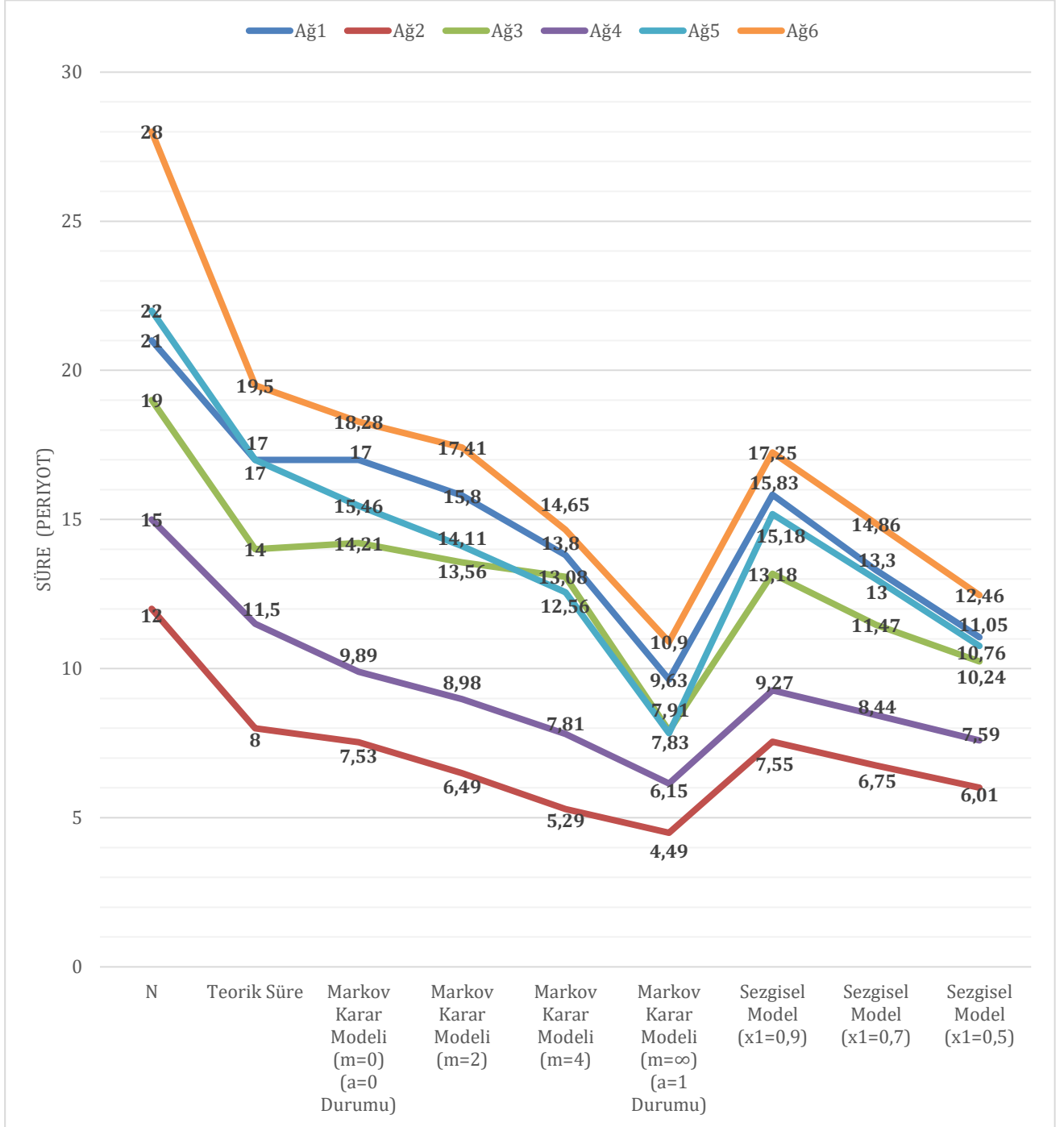
sonraki dönemde devam edebilecek olan aktivite ve bu aktiviteler için tamamlanmış olan iş yükü birleştirilerek benzersiz anahtar-2 oluşturulmaktadır.

Tez çalışması kapsamında kaynak kısıtlı, sabit kaynak ($a=0$), sınırsız kaynak ($a=1$) Markov karar modeli özel durumları ve sezgisel model olmak üzere 4 farklı model oluşturulmuştur. Ek 2’de verilen proje ağları için oluşturulan veri kümeleri, her bir model için Excel VBA’de çözdürülerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kaynak kısıtlı Markov karar modeli, kısıt değerleri değiştiğinde farklı sonuçlar vereceğinden modelin proje ağlarındaki davranışının incelenmesi için veri setleri farklı kısıtlar ile çözdürülmüştür. Benzer şekilde, sezgisel model kurgusunda yer alan ve sürece ne zaman müdahale edileceğini belirten x_1 parametresi değiştiğinde modelin vereceği sonuçlar değişeceği için farklı x_1 değerleri ile veri setleri tekrar çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Ek 4 performans tablosunda verilmektedir. Performans tablosunda ağ numarası ile ifade edilen satırlar proje ağının farklı kısıtlar/parametreler altındaki model çözümlerini içermektedir. Ağ ve gerçekleşme numarası ile ifade edilen satırlar ise, ilgili proje ağının gerçekleşme değerleri için farklı kısıtlar/parametreler altındaki model değerlerini vermektedir. Ayrıca tabloda, proje ağının paralel bağlantıya sahip olup olmadığı bilgisine, CPM’de en uzun aktivite süreleri kullanılarak hesaplanan en uzun proje süresini ifade eden N değerine, CPM’de ortalama aktivite süreleri olan H_i değişkenleri kullanılarak hesaplanan proje süresini ifade eden teorik süreye yer verilmektedir. Her bir proje ağı ve gerçekleşme verisi için modelin verdiği sonuç ve proje süresince kullanılan fazla mesai sayısı belirtilmektedir. Sezgisel model optimalite denklemi içermediği için proje ağı çözümlerinde fazla mesai sayısına ulaşamamaktadır. Bu sebeple, sezgisel modelde fazla mesai sayısı sadece proje ağı gerçekleşme verilerinin kullanıldığı çözümlerde hesaplanmaktadır.

Önerilen sezgisel modelde x_1 parametresinin değeri arttıkça proje süresi artmaktadır. x_1 parametresi ile proje sürecine ne zaman müdahale edileceği belirlendiği için parametre değerinin artması, sürece daha geç müdahale edileceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple, proje süresi artmakta ve alınan fazla mesai aksiyonu sayısı azalmaktadır. Markov karar modeli kapsamında ise fazla mesai kısıtını ifade eden m değeri arttıkça proje süresi azalmaktadır. m değeri arttıkça projede daha fazla $a=1$ aksiyonu alınabildiği için proje süresi kısalmaktadır.

Proje ağı içerisindeki aktivitelerin seri ve paralel bağlantıları dikkate alındığında genel çerçevede kısıtlı Markov karar modeli ve sezgisel model, en düşük süreyi veren $a=1$ ve

en yüksek süreyi veren $a=0$ modellerinin sonuçları arasında değerler almaktadır. Kısıtlı Markov karar modeli ile sezgisel model arasındaki ilişki, kısıtın ve sezgisel modeldeki x_1 parametresinin değerine göre değişiklik göstermektedir. Farklı durumlarda elde edilen süreler aşağıdaki Şekil 4.1’de yer alan grafikte gösterilmektedir.



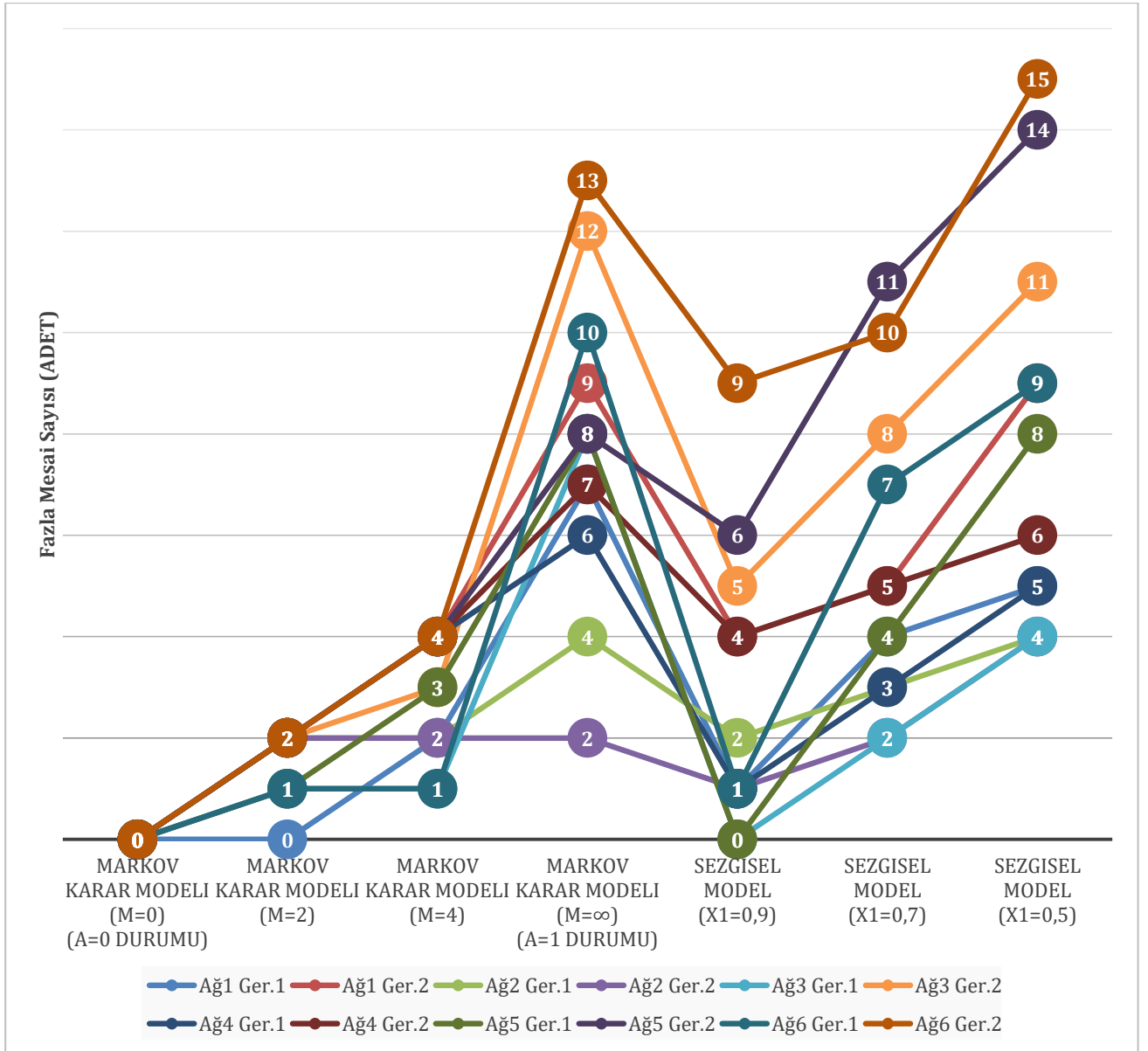
Şekil 4.1 Süre Grafiği

Kısıtlı Markov karar modelinin herhangi bir kısıt değeri çözümü ile sezgisel modelin herhangi bir x_1 değeri çözümü çok benzer sonuçlar verdiğiinden fazla mesai kısıtının belirli olduğu bir durum için sezgisel modelde sürece en geç ne zaman müdahale edileceğini belirten x_1 parametresi belirlenebilmektedir. Örneğin, Proje Ağı 3 için Markov karar modelinin ($m=4$) durumu ile sezgisel modelin ($x_1=0,9$) durumunun sonuçları çok yakındır. En fazla 4 kere fazla mesai yapılmasına izin verilen bir ortamda, sezgisel model için sürece en erken planlanan sürenin %90'ı tamamlandığında müdahale edilebileceği anlamına gelmektedir. Planlanan proje süresine daha yakın bir gerçekleşme olması için x_1 değeri 0,9'dan daha küçük alınarak sürece daha erken müdahale edilirse, bir süre sonra ilerideki aktivitelerde kaynak yetersizliği dolayısıyla fazla mesai aksiyonu alınamayacak olup ($x_1=0,9$) sonucuna yakın bir süre elde edilecektir. Diğer açıdan bakmak gerekirse, sezgisel modelde herhangi bir x_1 değeri ile çözülen bir proje ağında kısıtlı Markov karar modeline göre yaklaşık olarak ne kadar fazla mesai yapılacağı elde edilebilmektedir.

Kısıtlı Markov karar modeli ve özel durumları için minimizasyon içeren amaç fonksiyonu ile bağlantılı bir şekilde aksiyon alındığından model çözümünde proje ömrü boyunca alınacak fazla mesai aksiyonu sayısı bulunabilmektedir. Fakat sezgisel modelde aksiyonlar bir karar kuralı gereği alındığından bu sayıya ulaşılamamaktadır. Bu nedenle, toplam alınan aksiyon sayılarının kıyaslanması için proje ağlarındaki bazı gerçekleştirmeler üzerinden modeller tekrar çözdürülmüş ve Şekil 4.2'de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.

Bazı ağlarda $a=1$ durumunda sezgisel ($x_1=0,5$) durumuna göre daha fazla mesai yapılmasına rağmen, bazı ağlar için tam tersi durum oluşmuştur. 6 proje ağındaki 12 gerçekleştirmesi için her durumdaki toplam fazla mesai sayıları incelendiğinde; maksimum 4 fazla mesai kısıtlı durum ve sezgisel durum ($x_1=0,9$) için toplam sayı birbirine eşitken, $a=1$ durumu ile sezgisel durum ($x_1=0,5$) için toplam fazla mesai sayısı birbirine eşit çıkmıştır. Bu sonuç, 2 durum için de maksimum fazla mesai sayısına ulaşıldığını ifade etmektedir.

Genel olarak ağ yapıları ve sonuçlar incelendiğinde sezgisel modelde, aktiviteler arasındaki ilişkilerde paralellik arttıkça planlanan süreye göre daha az sapma oluşması için sürece daha erken müdahale edilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Bu durum, paralellığı yüksek ağlarda x_1 değerinin sıfıra yakın daha küçük bir değer olarak belirlenmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 4.2 Fazla Mesai Aksiyon Sayısı Grafiği

Rekabetçi ortam koşulları, müşterinin acil ihtiyaçları vb. sebeplerle zaman taahhütünün proje başlangıcında planlanan süreden daha kısa olarak taahhüt edildiği durumlarda en iyi ortalama süreyi elde edebilmek için ve proje boyunca kaynak kısıtının belirli olduğu durumlarda Markov karar modelinin kullanılması daha elverişlidir. Stok maliyetlerinin yüksek olduğu, en iyi sürede değil planlanan sürede teslimat yapılmasının gerektiği durumlarda sezgisel modeli kullanmak daha faydalı olmaktadır.

Karar verici için planlanan süreye daha yakın gerçekleştirmeler elde etmenin kritik olduğu durumlarda, sezgisel modelde x_1 parametresinin küçük değerler alması gerekmektedir.

Parametrenin optimal değeri, koşullara ve duruma bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu sebeple, karar vericinin hassasiyetine ve projedeki tolerans seviyesine bağlı olarak değer belirlenebilmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Şirketler tarafından pek çok alanda birçok farklı proje yürütülmektedir. Özellikle yüksek bütçeli, stratejik öneme sahip projelerde proje yönetimini zorlaştıran bazı taahhütler yer almaktadır. Belirsizliklerin ve kısıtların bulunduğu zorlu proje ortamlarına bir de ek olarak sözleşmesel bazı yükümlülüklerin gelmesi ile etkin ve çok yönlü proje yönetimi daha çok önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında sözleşmesel kısıt olarak zaman taahhüdü dikkate alınmıştır. Zaman taahhüdü, projeyi en iyi sürede değil belirlenen sürede tamamlamayı gerektirmektedir. Zamanından geç bitirilen projeler cezai yaptırımlar ile karşılaşırken, erken bitirilenler müşteriye teslim edilene kadar bekledikleri için stok maliyeti, yıpranma riski vb. durumlar ile karşılaşmaktadır.

Bu kapsamda literatürde yer alan sözleşme tasarımı, tekli ve çoklu proje ortamlarında kaynak kısıtlı proje çizelgeleme çalışmaları incelenmiştir. Ek olarak, daha az işlem yüküne sahip olması ve daha kullanışlı olması nedeniyle genel olarak sektörde kullanılan proje yönetim araçları projeleri oluşturan aktivite iş yüklerinin ve sürelerinin deterministik olduğunu düşünerek planlama yapmaktadır. Deterministik olan faaliyet iş yükleri ve süreleri önceden belirlenmiş ve sabit kabul edildiği için bu araçlarda Kritik Yol Yöntemi (CPM) kullanılmaktadır. Oysa ki gerçek hayatta özellikle tasarım odaklı çalışan firmalar için aktivitelerin iş yükleri ve süreleri bu kadar net olarak öngörülememektedir. Bu durum gerçeğe yakın planlama yapılmasını zorlaştırmaktadır. Literatür araştırması kapsamında ayrıca, çalışmalarda kullanılan aktivite iş yükü ve sürelerinin dağılımları, deterministik ve stokastik iş yükleri için proje süresi belirleme yöntemleri araştırılmıştır.

Tez çalışması doğrultusunda öncelikle bir Markov karar modeli kurgulanmaktadır. Çalışanların bilgi ve tecrübeleri ile geçmiş verilerden yararlanılarak aktivite iş yüklerinin ve sürelerinin belirli bir aralıkta olduğu gerçeğe daha yakın süreler belirlenmektedir. Geçerli veri tarihi ilerledikçe aktivitelerde tamamlanan iş yüküne bağlı olarak geçiş olasılıkları hesaplanmaktadır. Modelde normal mesaiyi ifade eden $a=0$ aksiyonu ve kaynak kullanımını arttırmayı ya da fazla mesaiyi ifade eden $a=1$ aksiyonu kullanılmaktadır. Proje tamamlanana kadar her dönem 1 birim sürelik kazanç elde edilmektedir. Aktivitelerin öncül-ardıl ilişkisi ve belirlenen maksimum süreleri üzerinden kritik yol yöntemi ile projenin tamamlanabileceği en uzun süre hesaplanmaktadır. Model, normal süreçte maksimum iş yükü için gerçekleştirilecek en

uzun süreden geriye doğru minimizasyon problemi olarak çözümlenerek projenin tamamlanabileceği en iyi ortalama süre bulunmaktadır.

Sabit kaynaklı ve sınırsız kaynaklı proje ortamları için sadece $a=0$ ve $a=1$ aksiyonları altında ilerleyen modelin iki özel durumuna değinilmiştir. Özel durumlar kapsamında elde edilen ortalama proje süreleri ile genel modelin en iyi ortalama proje süresi arasındaki ilişki verilmiştir.

Ek olarak, tez çalışması kapsamında sezgisel bir politika önerilmiş ve bu doğrultuda model farklılaştırılmıştır. Zaman taahhüdü dolayısıyla proje başında sözleşmede taahhüt edilen süre dikkate alınmaktadır. Projedeki aktivitelerin ilerlemelerinin planlanan aktivite süreleri ile belirli bir algoritma doğrultusunda karşılaştırılarak alınacak aksiyona karar verilen bir karar kuralı geliştirilmiştir. Bu karar kuralı gereğince ilgili durumda alınacak aksiyon belirlendiğinden, model minimizasyon problemi olmaktan çıkmıştır. Sezgisel model kapsamındaki politika ile başlangıçta taahhüt edilen proje süresine daha yakın gerçekleştirmelerin oluşması sağlanmaktadır. Ayrıca, her periyotta alınacak aksiyonun belirlenmesi dolayısıyla oluşan işlem yükü azaltılmıştır.

Özellikle yoğun iş yükünün olduğu kapsamı büyük projelerin çok sayıda seri-paralel aktivitelerden oluşması, birçok farklı kaynağın süreçte kullanılması ve belirsizlikler dolayısıyla geçiş olasılığı yelpazesinin büyüklüğü modelin dinamik olarak planlamasını zorlaştırmaktadır. Bu durum işlem yükünü çok arttırmaktadır. Bu nedenle dinamik proje planlama kapsamında projelerin iş paketlerine ayrılmasının, her iş paketinin kendi içerisinde modellenmesinin ve çözdürülmesinin uygun olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle, benzer yetkinliklere sahip kaynaklar ile yürütülen işlerin, iş paketi olarak ayrı küçük bir proje gibi yönetilmesinin hem kaynak hem de zaman yönetimi açısından daha elverişli olduğu düşünülmektedir. Bu sayede model çözümündeki işlem yükü önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Son olarak, farklı proje ağları için oluşturulan 4 model çözdürülmüş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı bağlantı tiplerine sahip proje türlerinde modellerin vereceği sonuçlar analiz edilmiştir. Sezgisel modelde, proje ağlarında aktiviteler arası bağlantılarda paralellik arttıkça plandan daha az sapma gerçekleşmesi için sürece daha erken müdahale edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı parametrelere veya farklı kısıt değerlerine sahip modellerin arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sezgisel modelde herhangi bir kısıt olmamasına rağmen, model kurgusu gereği x_1 parametresi ile aksiyonlar kısıtlanmıştır. İncelenen ilişkiler, Markov karar modeli ile sezgisel model

arasındaki bağlantıya göre kısıt değerlerinde ve parametrelerde duruma bağlı güncelleme imkanı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında zaman taahhütünden sapmaların projede oluşturduğu ek maliyete ve proje kârlılığına etkisi incelenebilir. Farklı taahhütler için değişkenler ve amaç fonksiyonu taahhüte uygun şekilde güncellenerek modellerin işlevi değerlendirilebilir. Hem problem boyutunu küçültmek hem de optimal süre elde edebilmek için Markov karar modelinin ve sezgisel modelin proje süresi boyunca birlikte kullanıldığı hibrit bir model oluşturulabilir. Ayrıca, proje ömrü boyunca farklı aktivitelerde farklı x_1 parametreleri kullanılarak oluşturulan bir modelin performansı izlenebilir.

6. KAYNAKLAR

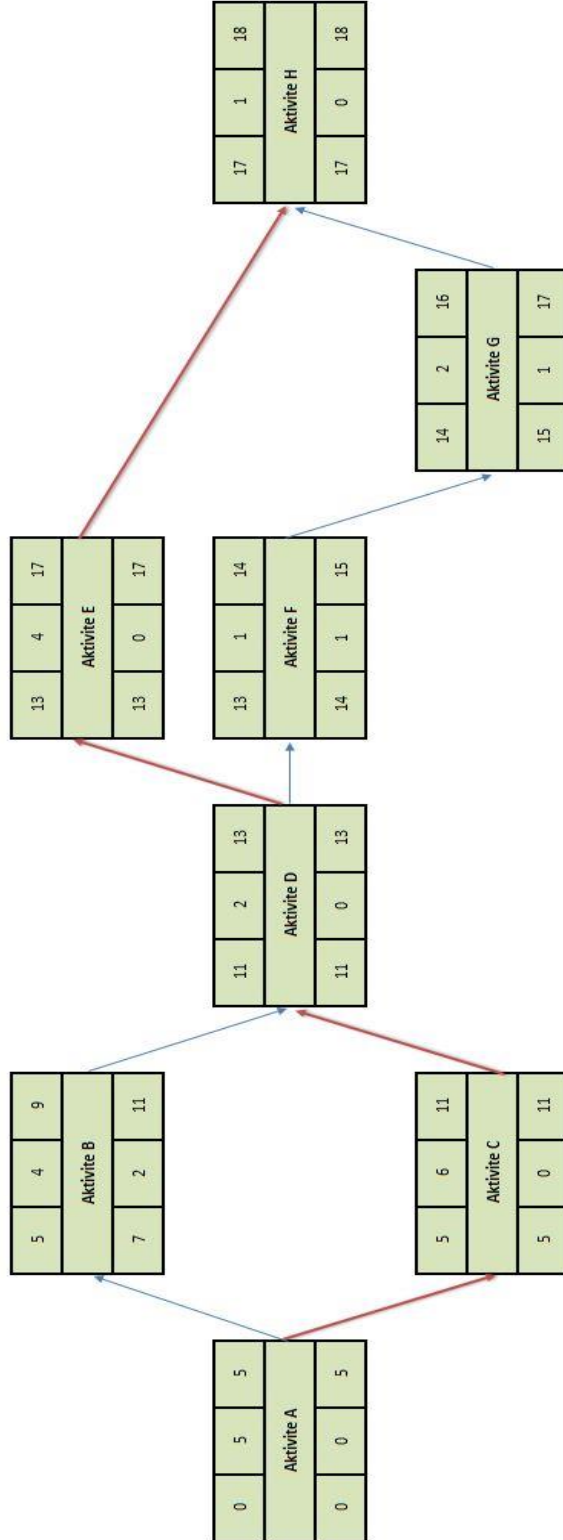
- Adler, P.S., Mandelbaum, A., Nguyen, V., Schwerer, E., From Project to Process Management: An Empirically-Based Framework for Analyzing Product Development Time, *Management Science*, 41(3), (1995), 458–484.
- Artigues, C., Demassey, S., Néron, E., *Resource-Constrained Project Scheduling, Models, Algorithms, Extensions and Applications*, Wiley, 2008.
- Atin, S., Lubis, R., Implementation of Critical Path Method in Project Planning and Scheduling, *Materials Science and Engineering*, 662, 2019.
- Ba'its, H.A., Puspita, I.A., Bay, A.F., Combination of Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) for Project Schedule Development, *International Journal of Integrated Engineering*, 12(3), (2020), 68-75.
- Bellman, R., *Dynamic programming*. Princeton: Princeton University Press, 1957.
- Brahimia, N., Aouamb, T., Aghezzaf, E., Integrating Order Acceptance Decisions with Flexible Due Dates in a Production Planning Model with Load-Dependent Lead Times, *International Journal of Production Research*, 53(12), (2015), 3810-3822.
- Brcic, M., Katic, M., Hlupic, N., Planning Horizons Based Proactive Rescheduling for Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Problems, *European Journal of Operational Research*, 273, (2019), 58-66.
- Dawande, M., Janakiraman, G., Qi, A., Optimal Incentive Contracts in Project Management, *Production and Operations Management*, 28(6), (2019), 1431–1445.
- Ellis, G., *Project Management in Product Development: Leadership Skills and Management Techniques to Deliver Great Products*, Butterworth-Heinemann, 2015.
- Felberbauer, T., Gutjahr, W.J., Doerner, K.F., Stochastic Project Management: Multiple Projects with Multi-Skilled Human Resources, *Journal of Scheduling*, (2019), 271–288.
- Gutjahr, W.J., Strauss, C., Wagner, E., A Stochastic Branch-and-Bound Approach to Activity Crashing in Project Management, *INFORMS Journal on Computing*, 12(2), (2000), 125-135.
- Hajdu, M., Bokor, O., Sensitivity Analysis in PERT Networks: Does Activity Duration Distribution Matter?, *Automation in Construction*, 65, (2016), 1-8.
- Hao, X., Lin, L., Gen, M., An Effective Multi-Objective EDA for Robust Resource Constrained Project Scheduling with Uncertain Durations, *Procedia Computer Science*, 36, (2014), 571-578.

- Hou, C., Allena, T.T., Hall, N.G., Comuzzi, V.S., Modeling Formalism and Notifications in Project Management, *Computers & Industrial Engineering*, 131, (2019), 200-210.
- Howard, R., *Dynamic programming and Markov processes*, Cambridge: MIT, 1960.
- Jansen, S., *Quantitative Models for Stochastic Project Planning*, Doktora Tezi, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2019.
- Keller, B., Bayraksan, G., Scheduling Jobs Sharing Multiple Resources Under Uncertainty: A Stochastic Programming Approach, *IIE Transactions*, 42(1), (2009), 16-30.
- Klastorin, T., Mitchell, G., Optimal Project Planning Under the Threat of a Disruptive Event, *IIE Transactions*, 45(1), (2013), 68-80.
- Kusumadarma, I. A., Pratami, D., Yasa, I. P., Tripiawan, W., Developing Project Schedule in Telecommunication Projects Using Critical Path Method (CPM), *International Journal of Integrated Engineering*, 12(3), (2020), 60-67.
- Lambrechts, O., Demeulemeester, E., Herroelen, W., A Tabu Search Procedure for Developing Robust Predictive Project Schedules, *International Journal of Production Economics*, 111, (2008), 493-508.
- Lester, A., *Project Planning and Control*, Butterworth-Heinemann, 2004.
- Leus, R., Herroelen, W., Stability and Resource Allocation in Project Planning, *IIE Transactions*, 36, (2004), 667-682.
- Lippman, S.A., Applying a New Device in the Optimization of Exponential Queueing Systems, *Operations Research*, 23, (1975), 687-710.
- Melchiors, P., *Dynamic and Stochastic Multi-Project Planning*, Springer, İsviçre, 2015.
- Melchiors, P., Leus, R., Creemers, S., Kolisch, R., Dynamic Order Acceptance and Capacity Planning in a Stochastic Multi-Project Environment with a Bottleneck Resource, *International Journal of Production Research*, (2018), 459-475.
- Mitchell, G., Klastorin, T., An Effective Methodology for the Stochastic Project Compression Problem, *IIE Transactions*, 39, (2007), 957-969.
- Oracle Primavera, P6 Professional User Guide Version 19, December 2019.
- Project Management Institute Turkey, İnsan Odaklı Dönüşüm, 2021 Proje Yönetim Zirvesi, 30 Mayıs 2021.
- Puterman, M.L., *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*, John Wiley & Sons Inc, 2005.
- Repenning, N.P., A Dynamic Model of Resource Allocation in Multi-Project Research and Development Systems, *System Dynamics Review*, 16(3), (2000), 173-212.

- Schweitzer, P.J., Seidman, A., Generalized Polynomial Approximations in Markovian Decision Processes, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 110, (1985), 568–582.
- Takakura, Y., Yajima, T., Kawajiri, Y., Hashizume, S., Application of Critical Path Method to Stochastic Processes with Historical Operation Data, *Chemical Engineering Research and Design*, 149, (2019), 195-208.
- Wang, J., Yang, K., Zhao, R., The Impact of Decision Criteria on Deadline-Based Incentive Contracts in Project Management, *J Intell Manuf*, 28, (2017), 643-655.
- Xie, F., Li, H., Xu, Z., An Approximate Dynamic Programming Approach to Project Scheduling with Uncertain Resource Availabilities, *Applied Mathematical Modelling*, 97, (2021), 226-243.
- Yang, K., Zhao, R., Lan, Y., Incentive Contract Design in Project Management with Serial Tasks and Uncertain Completion Times, *Engineering Optimization*, 48(4), (2016), 629-651.

EKLER

EK 1 – Örnek Projede Kritik Yol Yöntemi Çözümü



EK 2 – Proje Aktivite Ağ Tabloları

Ağ-1 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	B	3	4	3	4
B	C	3	5	4	4
C	D	2	3	2	3
D	Φ	5	9	4	7

Ağ-2 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	C	1	5	2	4
B	C	2	4	3	2
C	Φ	3	7	6	3

Ağ-3 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	B,C	6	10	6	9
B	Φ	2	9	3	8
C	Φ	5	7	5	7

Ağ-4 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	B,C	2	4	2	3
B	D	1	3	2	2
C	D	2	4	3	4
D	E	3	5	4	5
E	Φ	1	2	1	2

Ağ-5 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	C	1	3	2	3
B	C	3	5	3	4
C	D,E	2	4	3	4
D	F	3	6	4	5
E	F	1	5	2	5
F	Φ	4	7	4	7

Ağ-6 Aktiviteleri	Ardıl	Min Efor (B _i)	Max Efor (L _i)	Gerçekleşme 1	Gerçekleşme 2
A	B	3	4	3	4
B	C	2	3	2	3
C	D,E	1	3	2	2
D	F	2	5	3	4
E	F	1	4	4	3
F	G	2	7	3	6
G	Φ	1	6	2	5

EK 3 – 6 Numaralı Proje Ağı Veri Kümesi

n. Periyotta Devam Eden Aktivite (k)	n. Periyotta Devam Eden Aktivitede Tamamlanan İş Yüğü (G_k)	Aksiyon ($a_n(s)$)	x/y	Benzersiz Anahtar-1	Olasılık ($P_{sj}(a)$)	n+1. Periyotta Devam Eden Aktivite (k+1)	n+1. Periyotta Devam Eden Aktivitede Tamamlanan İş Yüğü (G_{k+1})	Benzersiz Anahtar-2
A	0	0	x	A00x	1,000	A	1	A1
A	0	0	y	A00y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
A	0	1	x	A01x	1,000	A	2	A2
A	0	1	y	A01y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
A	1	0	x	A10x	1,000	A	2	A2
A	1	0	y	A10y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
A	1	1	x	A11x	0,500	B	0	B0
A	1	1	y	A11y	0,500	A	3	A3
A	2	0	x	A20x	0,500	B	0	B0
A	2	0	y	A20y	0,500	A	3	A3
A	2	1	x	A21x	1,000	B	0	B0
A	2	1	y	A21y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
A	3	0	x	A30x	1,000	B	0	B0
A	3	0	y	A30y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
A	3	1	x	A31x	1,000	B	0	B0
A	3	1	y	A31y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
B	0	0	x	B00x	1,000	B	1	B1
B	0	0	y	B00y	0,000	Φ	Φ	$\Phi\Phi$
B	0	1	x	B01x	0,500	C	0	C0
B	0	1	y	B01y	0,500	B	2	B2

B	1	0	x	B10x	0,500	C	0	C0
B	1	0	y	B10y	0,500	B	2	B2
B	1	1	x	B11x	1,000	C	0	C0
B	1	1	y	B11y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
B	2	0	x	B20x	1,000	C	0	C0
B	2	0	y	B20y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
B	2	1	x	B21x	1,000	C	0	C0
B	2	1	y	B21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
C	0	0	x	C00x	0,333	D,E	0,0	D0;E0
C	0	0	y	C00y	0,667	C	1	C1
C	0	1	x	C01x	0,667	D,E	0,0	D0;E0
C	0	1	y	C01y	0,333	C	2	C2
C	1	0	x	C10x	0,500	D,E	0,0	D0;E0
C	1	0	y	C10y	0,500	C	2	C2
C	1	1	x	C11x	1,000	D,E	0,0	D0;E0
C	1	1	y	C11y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
C	2	0	x	C20x	1,000	D,E	0,0	D0;E0
C	2	0	y	C20y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
C	2	1	x	C21x	1,000	D,E	0,0	D0;E0
C	2	1	y	C21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D	0	0	x	D00x	1,000	D	1	D1
D	0	0	y	D00y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D	0	1	x	D01x	0,250	F	0	F0
D	0	1	y	D01y	0,750	D	2	D2
D	1	0	x	D10x	0,250	F	0	F0
D	1	0	y	D10y	0,750	D	2	D2
D	1	1	x	D11x	0,500	F	0	F0

D	1	1	y	D11y	0,500	D	3	D3
D	2	0	x	D20x	0,333	F	0	F0
D	2	0	y	D20y	0,667	D	3	D3
D	2	1	x	D21x	0,667	F	0	F0
D	2	1	y	D21y	0,333	D	4	D4
D	3	0	x	D30x	0,500	F	0	F0
D	3	0	y	D30y	0,500	D	4	D4
D	3	1	x	D31x	1,000	F	0	F0
D	3	1	y	D31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D	4	0	x	D40x	1,000	F	0	F0
D	4	0	y	D40y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D	4	1	x	D41x	1,000	F	0	F0
D	4	1	y	D41y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
E	0	0	x	E00x	0,250	F	0	F0
E	0	0	y	E00y	0,750	E	1	E1
E	0	1	x	E01x	0,500	F	0	F0
E	0	1	y	E01y	0,500	E	2	E2
E	1	0	x	E10x	0,333	F	0	F0
E	1	0	y	E10y	0,667	E	2	E2
E	1	1	x	E11x	0,667	F	0	F0
E	1	1	y	E11y	0,333	E	3	E3
E	2	0	x	E20x	0,500	F	0	F0
E	2	0	y	E20y	0,500	E	3	E3
E	2	1	x	E21x	1,000	F	0	F0
E	2	1	y	E21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
E	3	0	x	E30x	1,000	F	0	F0
E	3	0	y	E30y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ

E	3	1	x	E31x	1,000	F	0	F0
E	3	1	y	E31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	0,0	0,0	x,x	D00x;E00x	0,250	D	2	D2
D,E	0,0	0,0	x,y	D00x;E00y	0,750	D,E	1,1	D1;E1
D,E	0,0	0,0	y,x	D00y;E00x	0,000	F	0	F0
D,E	0,0	0,0	y,y	D00y;E00y	0,000	E	2	E2
D,E	0,0	0,1	x,x	D00x;E01x	0,500	D	2	D2
D,E	0,0	0,1	x,y	D00x;E01y	0,500	D,E	1,2	D1;E2
D,E	0,0	0,1	y,x	D00y;E01x	0,000	F	0	F0
D,E	0,0	0,1	y,y	D00y;E01y	0,000	E	2	E2
D,E	0,0	1,0	x,x	D01x;E00x	0,063	F	0	F0
D,E	0,0	1,0	x,y	D01x;E00y	0,188	E	2	E2
D,E	0,0	1,0	y,x	D01y;E00x	0,188	D	2	D2
D,E	0,0	1,0	y,y	D01y;E00y	0,563	D,E	2,1	D2;E1
D,E	0,0	1,1	x,x	D01x;E01x	0,125	F	0	F0
D,E	0,0	1,1	x,y	D01x;E01y	0,125	E	2	E2
D,E	0,0	1,1	y,x	D01y;E01x	0,375	D	2	D2
D,E	0,0	1,1	y,y	D01y;E01y	0,375	D,E	2,2	D2;E2
D,E	0,1	0,0	x,x	D00x;E10x	0,333	D	2	D2
D,E	0,1	0,0	x,y	D00x;E10y	0,667	D,E	1,2	D1;E2
D,E	0,1	0,0	y,x	D00y;E10x	0,000	F	0	F0
D,E	0,1	0,0	y,y	D00y;E10y	0,000	E	3	E3
D,E	0,1	0,1	x,x	D00x;E11x	0,667	D	2	D2
D,E	0,1	0,1	x,y	D00x;E11y	0,333	D,E	1,3	D1;E3
D,E	0,1	0,1	y,x	D00y;E11x	0,000	F	0	F0
D,E	0,1	0,1	y,y	D00y;E11y	0,000	E	3	E3
D,E	0,1	1,0	x,x	D01x;E10x	0,083	F	0	F0

D,E	0,1	1,0	x,y	D01x;E10y	0,167	E	3	E3
D,E	0,1	1,0	y,x	D01y;E10x	0,250	D	2	D2
D,E	0,1	1,0	y,y	D01y;E10y	0,500	D,E	2,2	D2;E2
D,E	0,1	1,1	x,x	D01x;E11x	0,167	F	0	F0
D,E	0,1	1,1	x,y	D01x;E11y	0,083	E	3	E3
D,E	0,1	1,1	y,x	D01y;E11x	0,500	D	2	D2
D,E	0,1	1,1	y,y	D01y;E11y	0,250	D,E	2,3	D2;E3
D,E	0,2	0,0	x,x	D00x;E20x	0,500	D	2	D2
D,E	0,2	0,0	x,y	D00x;E20y	0,500	D,E	1,3	D1;E3
D,E	0,2	0,0	y,x	D00y;E20x	0,000	F	0	F0
D,E	0,2	0,0	y,y	D00y;E20y	0,000	E	4	E4
D,E	0,2	0,1	x,x	D00x;E21x	1,000	D	2	D2
D,E	0,2	0,1	x,y	D00x;E21y	0,000	D	2	D2
D,E	0,2	0,1	y,x	D00y;E21x	0,000	F	0	F0
D,E	0,2	0,1	y,y	D00y;E21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	0,2	1,0	x,x	D01x;E20x	0,125	F	0	F0
D,E	0,2	1,0	x,y	D01x;E20y	0,125	E	4	E4
D,E	0,2	1,0	y,x	D01y;E20x	0,375	D	2	D2
D,E	0,2	1,0	y,y	D01y;E20y	0,375	D,E	2,3	D2;E3
D,E	0,2	1,1	x,x	D01x;E21x	0,250	F	0	F0
D,E	0,2	1,1	x,y	D01x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	0,2	1,1	y,x	D01y;E21x	0,750	D	2	D2
D,E	0,2	1,1	y,y	D01y;E21y	0,000	D	2	D2
D,E	0,3	0,0	x,x	D00x;E30x	1,000	D	2	D2
D,E	0,3	0,0	x,y	D00x;E30y	0,000	D	2	D2
D,E	0,3	0,0	y,x	D00y;E30x	0,000	F	0	F0
D,E	0,3	0,0	y,y	D00y;E30y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ

D,E	0,3	0,1	x,x	D00x;E31x	1,000	D	2	D2
D,E	0,3	0,1	x,y	D00x;E31y	0,000	D	2	D2
D,E	0,3	0,1	y,x	D00y;E31x	0,000	F	0	F0
D,E	0,3	0,1	y,y	D00y;E31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	0,3	1,0	x,x	D01x;E30x	0,250	F	0	F0
D,E	0,3	1,0	x,y	D01x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	0,3	1,0	y,x	D01y;E30x	0,750	D	2	D2
D,E	0,3	1,0	y,y	D01y;E30y	0,000	D	2	D2
D,E	0,3	1,1	x,x	D01x;E31x	0,250	F	0	F0
D,E	0,3	1,1	x,y	D01x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	0,3	1,1	y,x	D01y;E31x	0,750	D	2	D2
D,E	0,3	1,1	y,y	D01y;E31y	0,000	D	2	D2
D,E	1,0	0,0	x,x	D10x;E00x	0,063	F	0	F0
D,E	1,0	0,0	x,y	D10x;E00y	0,188	E	2	E2
D,E	1,0	0,0	y,x	D10y;E00x	0,188	D	3	D3
D,E	1,0	0,0	y,y	D10y;E00y	0,563	D,E	2,1	D2;E1
D,E	1,0	0,1	x,x	D10x;E01x	0,125	F	0	F0
D,E	1,0	0,1	x,y	D10x;E01y	0,125	E	2	E2
D,E	1,0	0,1	y,x	D10y;E01x	0,375	D	3	D3
D,E	1,0	0,1	y,y	D10y;E01y	0,375	D,E	2,2	D2;E2
D,E	1,0	1,0	x,x	D11x;E00x	0,125	F	0	F0
D,E	1,0	1,0	x,y	D11x;E00y	0,375	E	2	E2
D,E	1,0	1,0	y,x	D11y;E00x	0,125	D	3	D3
D,E	1,0	1,0	y,y	D11y;E00y	0,375	D,E	3,1	D3;E1
D,E	1,0	1,1	x,x	D11x;E01x	0,250	F	0	F0
D,E	1,0	1,1	x,y	D11x;E01y	0,250	E	2	E2
D,E	1,0	1,1	y,x	D11y;E01x	0,250	D	3	D3

D,E	1,0	1,1	y,y	D11y;E01y	0,250	D,E	3,2	D3;E2
D,E	1,1	0,0	x,x	D10x;E10x	0,083	F	0	F0
D,E	1,1	0,0	x,y	D10x;E10y	0,167	E	3	E3
D,E	1,1	0,0	y,x	D10y;E10x	0,250	D	3	D3
D,E	1,1	0,0	y,y	D10y;E10y	0,500	D,E	2,2	D2;E2
D,E	1,1	0,1	x,x	D10x;E11x	0,167	F	0	F0
D,E	1,1	0,1	x,y	D10x;E11y	0,083	E	3	E3
D,E	1,1	0,1	y,x	D10y;E11x	0,500	D	3	D3
D,E	1,1	0,1	y,y	D10y;E11y	0,250	D,E	2,3	D2;E3
D,E	1,1	1,0	x,x	D11x;E10x	0,167	F	0	F0
D,E	1,1	1,0	x,y	D11x;E10y	0,333	E	3	E3
D,E	1,1	1,0	y,x	D11y;E10x	0,167	D	3	D3
D,E	1,1	1,0	y,y	D11y;E10y	0,333	D,E	3,2	D3;E2
D,E	1,1	1,1	x,x	D11x;E11x	0,333	F	0	F0
D,E	1,1	1,1	x,y	D11x;E11y	0,167	E	3	E3
D,E	1,1	1,1	y,x	D11y;E11x	0,333	D	3	D3
D,E	1,1	1,1	y,y	D11y;E11y	0,167	D,E	3,3	D3;E3
D,E	1,2	0,0	x,x	D10x;E20x	0,125	F	0	F0
D,E	1,2	0,0	x,y	D10x;E20y	0,125	E	4	E4
D,E	1,2	0,0	y,x	D10y;E20x	0,375	D	3	D3
D,E	1,2	0,0	y,y	D10y;E20y	0,375	D,E	2,3	D2;E3
D,E	1,2	0,1	x,x	D10x;E21x	0,250	F	0	F0
D,E	1,2	0,1	x,y	D10x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	1,2	0,1	y,x	D10y;E21x	0,750	D	3	D3
D,E	1,2	0,1	y,y	D10y;E21y	0,000	D	3	D3
D,E	1,2	1,0	x,x	D11x;E20x	0,250	F	0	F0
D,E	1,2	1,0	x,y	D11x;E20y	0,250	E	4	E4

D,E	1,2	1,0	y,x	D11y;E20x	0,250	D	3	D3
D,E	1,2	1,0	y,y	D11y;E20y	0,250	D,E	3,3	D3;E3
D,E	1,2	1,1	x,x	D11x;E21x	0,500	F	0	F0
D,E	1,2	1,1	x,y	D11x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	1,2	1,1	y,x	D11y;E21x	0,500	D	3	D3
D,E	1,2	1,1	y,y	D11y;E21y	0,000	D	3	D3
D,E	1,3	0,0	x,x	D10x;E30x	0,250	F	0	F0
D,E	1,3	0,0	x,y	D10x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	1,3	0,0	y,x	D10y;E30x	0,750	D	3	D3
D,E	1,3	0,0	y,y	D10y;E30y	0,000	D	3	D3
D,E	1,3	0,1	x,x	D10x;E31x	0,250	F	0	F0
D,E	1,3	0,1	x,y	D10x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	1,3	0,1	y,x	D10y;E31x	0,750	D	3	D3
D,E	1,3	0,1	y,y	D10y;E31y	0,000	D	3	D3
D,E	1,3	1,0	x,x	D11x;E30x	0,500	F	0	F0
D,E	1,3	1,0	x,y	D11x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	1,3	1,0	y,x	D11y;E30x	0,500	D	3	D3
D,E	1,3	1,0	y,y	D11y;E30y	0,000	D	3	D3
D,E	1,3	1,1	x,x	D11x;E31x	0,500	F	0	F0
D,E	1,3	1,1	x,y	D11x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	1,3	1,1	y,x	D11y;E31x	0,500	D	3	D3
D,E	1,3	1,1	y,y	D11y;E31y	0,000	D	3	D3
D,E	2,0	0,0	x,x	D20x;E00x	0,083	F	0	F0
D,E	2,0	0,0	x,y	D20x;E00y	0,250	E	2	E2
D,E	2,0	0,0	y,x	D20y;E00x	0,167	D	4	D4
D,E	2,0	0,0	y,y	D20y;E00y	0,500	D,E	3,1	D3;E1
D,E	2,0	0,1	x,x	D20x;E01x	0,167	F	0	F0

D,E	2,0	0,1	x,y	D20x;E01y	0,167	E	2	E2
D,E	2,0	0,1	y,x	D20y;E01x	0,333	D	4	D4
D,E	2,0	0,1	y,y	D20y;E01y	0,333	D,E	3,2	D3;E2
D,E	2,0	1,0	x,x	D21x;E00x	0,167	F	0	F0
D,E	2,0	1,0	x,y	D21x;E00y	0,500	E	2	E2
D,E	2,0	1,0	y,x	D21y;E00x	0,083	D	4	D4
D,E	2,0	1,0	y,y	D21y;E00y	0,250	D,E	4,1	D4;E1
D,E	2,0	1,1	x,x	D21x;E01x	0,333	F	0	F0
D,E	2,0	1,1	x,y	D21x;E01y	0,333	E	2	E2
D,E	2,0	1,1	y,x	D21y;E01x	0,167	D	4	D4
D,E	2,0	1,1	y,y	D21y;E01y	0,167	D,E	4,2	D4;E2
D,E	2,1	0,0	x,x	D20x;E10x	0,111	F	0	F0
D,E	2,1	0,0	x,y	D20x;E10y	0,222	E	3	E3
D,E	2,1	0,0	y,x	D20y;E10x	0,222	D	4	D4
D,E	2,1	0,0	y,y	D20y;E10y	0,444	D,E	3,2	D3;E2
D,E	2,1	0,1	x,x	D20x;E11x	0,222	F	0	F0
D,E	2,1	0,1	x,y	D20x;E11y	0,111	E	3	E3
D,E	2,1	0,1	y,x	D20y;E11x	0,444	D	4	D4
D,E	2,1	0,1	y,y	D20y;E11y	0,222	D,E	3,3	D3;E3
D,E	2,1	1,0	x,x	D21x;E10x	0,222	F	0	F0
D,E	2,1	1,0	x,y	D21x;E10y	0,444	E	3	E3
D,E	2,1	1,0	y,x	D21y;E10x	0,111	D	4	D4
D,E	2,1	1,0	y,y	D21y;E10y	0,222	D,E	4,2	D4;E2
D,E	2,1	1,1	x,x	D21x;E11x	0,444	F	0	F0
D,E	2,1	1,1	x,y	D21x;E11y	0,222	E	3	E3
D,E	2,1	1,1	y,x	D21y;E11x	0,222	D	4	D4
D,E	2,1	1,1	y,y	D21y;E11y	0,111	D,E	4,3	D4;E3

D,E	2,2	0,0	x,x	D20x;E20x	0,167	F	0	F0
D,E	2,2	0,0	x,y	D20x;E20y	0,167	E	4	E4
D,E	2,2	0,0	y,x	D20y;E20x	0,333	D	4	D4
D,E	2,2	0,0	y,y	D20y;E20y	0,333	D,E	3,3	D3;E3
D,E	2,2	0,1	x,x	D20x;E21x	0,333	F	0	F0
D,E	2,2	0,1	x,y	D20x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	2,2	0,1	y,x	D20y;E21x	0,667	D	4	D4
D,E	2,2	0,1	y,y	D20y;E21y	0,000	D	4	D4
D,E	2,2	1,0	x,x	D21x;E20x	0,333	F	0	F0
D,E	2,2	1,0	x,y	D21x;E20y	0,333	E	4	E4
D,E	2,2	1,0	y,x	D21y;E20x	0,167	D	4	D4
D,E	2,2	1,0	y,y	D21y;E20y	0,167	D,E	4,3	D4;E3
D,E	2,2	1,1	x,x	D21x;E21x	0,667	F	0	F0
D,E	2,2	1,1	x,y	D21x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	2,2	1,1	y,x	D21y;E21x	0,333	D	4	D4
D,E	2,2	1,1	y,y	D21y;E21y	0,000	D	4	D4
D,E	2,3	0,0	x,x	D20x;E30x	0,333	F	0	F0
D,E	2,3	0,0	x,y	D20x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	2,3	0,0	y,x	D20y;E30x	0,667	D	4	D4
D,E	2,3	0,0	y,y	D20y;E30y	0,000	D	4	D4
D,E	2,3	0,1	x,x	D20x;E31x	0,333	F	0	F0
D,E	2,3	0,1	x,y	D20x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	2,3	0,1	y,x	D20y;E31x	0,667	D	4	D4
D,E	2,3	0,1	y,y	D20y;E31y	0,000	D	4	D4
D,E	2,3	1,0	x,x	D21x;E30x	0,667	F	0	F0
D,E	2,3	1,0	x,y	D21x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	2,3	1,0	y,x	D21y;E30x	0,333	D	4	D4

D,E	2,3	1,0	y,y	D21y;E30y	0,000	D	4	D4
D,E	2,3	1,1	x,x	D21x;E31x	0,667	F	0	F0
D,E	2,3	1,1	x,y	D21x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	2,3	1,1	y,x	D21y;E31x	0,333	D	4	D4
D,E	2,3	1,1	y,y	D21y;E31y	0,000	D	4	D4
D,E	3,0	0,0	x,x	D30x;E00x	0,125	F	0	F0
D,E	3,0	0,0	x,y	D30x;E00y	0,375	E	2	E2
D,E	3,0	0,0	y,x	D30y;E00x	0,125	D	5	D5
D,E	3,0	0,0	y,y	D30y;E00y	0,375	D,E	4,1	D4;E1
D,E	3,0	0,1	x,x	D30x;E01x	0,250	F	0	F0
D,E	3,0	0,1	x,y	D30x;E01y	0,250	E	2	E2
D,E	3,0	0,1	y,x	D30y;E01x	0,250	D	5	D5
D,E	3,0	0,1	y,y	D30y;E01y	0,250	D,E	4,2	D4;E2
D,E	3,0	1,0	x,x	D31x;E00x	0,250	F	0	F0
D,E	3,0	1,0	x,y	D31x;E00y	0,750	E	2	E2
D,E	3,0	1,0	y,x	D31y;E00x	0,000	F	0	F0
D,E	3,0	1,0	y,y	D31y;E00y	0,000	E	2	E2
D,E	3,0	1,1	x,x	D31x;E01x	0,500	F	0	F0
D,E	3,0	1,1	x,y	D31x;E01y	0,500	E	2	E2
D,E	3,0	1,1	y,x	D31y;E01x	0,000	F	0	F0
D,E	3,0	1,1	y,y	D31y;E01y	0,000	E	2	E2
D,E	3,1	0,0	x,x	D30x;E10x	0,167	F	0	F0
D,E	3,1	0,0	x,y	D30x;E10y	0,333	E	3	E3
D,E	3,1	0,0	y,x	D30y;E10x	0,167	D	5	D5
D,E	3,1	0,0	y,y	D30y;E10y	0,333	D,E	4,2	D4;E2
D,E	3,1	0,1	x,x	D30x;E11x	0,333	F	0	F0
D,E	3,1	0,1	x,y	D30x;E11y	0,167	E	3	E3

D,E	3,1	0,1	y,x	D30y;E11x	0,333	D	5	D5
D,E	3,1	0,1	y,y	D30y;E11y	0,167	D,E	4,3	D4;E3
D,E	3,1	1,0	x,x	D31x;E10x	0,333	F	0	F0
D,E	3,1	1,0	x,y	D31x;E10y	0,667	E	3	E3
D,E	3,1	1,0	y,x	D31y;E10x	0,000	F	0	F0
D,E	3,1	1,0	y,y	D31y;E10y	0,000	E	3	E3
D,E	3,1	1,1	x,x	D31x;E11x	0,667	F	0	F0
D,E	3,1	1,1	x,y	D31x;E11y	0,333	E	3	E3
D,E	3,1	1,1	y,x	D31y;E11x	0,000	F	0	F0
D,E	3,1	1,1	y,y	D31y;E11y	0,000	E	3	E3
D,E	3,2	0,0	x,x	D30x;E20x	0,250	F	0	F0
D,E	3,2	0,0	x,y	D30x;E20y	0,250	E	4	E4
D,E	3,2	0,0	y,x	D30y;E20x	0,250	D	5	D5
D,E	3,2	0,0	y,y	D30y;E20y	0,250	D,E	4,3	D4;E3
D,E	3,2	0,1	x,x	D30x;E21x	0,500	F	0	F0
D,E	3,2	0,1	x,y	D30x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	3,2	0,1	y,x	D30y;E21x	0,500	D	5	D5
D,E	3,2	0,1	y,y	D30y;E21y	0,000	D	5	D5
D,E	3,2	1,0	x,x	D31x;E20x	0,500	F	0	F0
D,E	3,2	1,0	x,y	D31x;E20y	0,500	E	4	E4
D,E	3,2	1,0	y,x	D31y;E20x	0,000	F	0	F0
D,E	3,2	1,0	y,y	D31y;E20y	0,000	E	4	E4
D,E	3,2	1,1	x,x	D31x;E21x	1,000	F	0	F0
D,E	3,2	1,1	x,y	D31x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	3,2	1,1	y,x	D31y;E21x	0,000	F	0	F0
D,E	3,2	1,1	y,y	D31y;E21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	3,3	0,0	x,x	D30x;E30x	0,500	F	0	F0

D,E	3,3	0,0	x,y	D30x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	0,0	y,x	D30y;E30x	0,500	D	5	D5
D,E	3,3	0,0	y,y	D30y;E30y	0,000	D	5	D5
D,E	3,3	0,1	x,x	D30x;E31x	0,500	F	0	F0
D,E	3,3	0,1	x,y	D30x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	0,1	y,x	D30y;E31x	0,500	D	5	D5
D,E	3,3	0,1	y,y	D30y;E31y	0,000	D	5	D5
D,E	3,3	1,0	x,x	D31x;E30x	1,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,0	x,y	D31x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,0	y,x	D31y;E30x	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,0	y,y	D31y;E30y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	3,3	1,1	x,x	D31x;E31x	1,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,1	x,y	D31x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,1	y,x	D31y;E31x	0,000	F	0	F0
D,E	3,3	1,1	y,y	D31y;E31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,0	0,0	x,x	D40x;E00x	0,250	F	0	F0
D,E	4,0	0,0	x,y	D40x;E00y	0,750	E	2	E2
D,E	4,0	0,0	y,x	D40y;E00x	0,000	F	0	F0
D,E	4,0	0,0	y,y	D40y;E00y	0,000	E	2	E2
D,E	4,0	0,1	x,x	D40x;E01x	0,500	F	0	F0
D,E	4,0	0,1	x,y	D40x;E01y	0,500	E	2	E2
D,E	4,0	0,1	y,x	D40y;E01x	0,000	F	0	F0
D,E	4,0	0,1	y,y	D40y;E01y	0,000	E	2	E2
D,E	4,0	1,0	x,x	D41x;E00x	0,250	F	0	F0
D,E	4,0	1,0	x,y	D41x;E00y	0,750	E	2	E2
D,E	4,0	1,0	y,x	D41y;E00x	0,000	F	0	F0
D,E	4,0	1,0	y,y	D41y;E00y	0,000	E	2	E2

D,E	4,0	1,1	x,x	D41x;E01x	0,500	F	0	F0
D,E	4,0	1,1	x,y	D41x;E01y	0,500	E	2	E2
D,E	4,0	1,1	y,x	D41y;E01x	0,000	F	0	F0
D,E	4,0	1,1	y,y	D41y;E01y	0,000	E	2	E2
D,E	4,1	0,0	x,x	D40x;E10x	0,333	F	0	F0
D,E	4,1	0,0	x,y	D40x;E10y	0,667	E	3	E3
D,E	4,1	0,0	y,x	D40y;E10x	0,000	F	0	F0
D,E	4,1	0,0	y,y	D40y;E10y	0,000	E	3	E3
D,E	4,1	0,1	x,x	D40x;E11x	0,667	F	0	F0
D,E	4,1	0,1	x,y	D40x;E11y	0,333	E	3	E3
D,E	4,1	0,1	y,x	D40y;E11x	0,000	F	0	F0
D,E	4,1	0,1	y,y	D40y;E11y	0,000	E	3	E3
D,E	4,1	1,0	x,x	D41x;E10x	0,333	F	0	F0
D,E	4,1	1,0	x,y	D41x;E10y	0,667	E	3	E3
D,E	4,1	1,0	y,x	D41y;E10x	0,000	F	0	F0
D,E	4,1	1,0	y,y	D41y;E10y	0,000	E	3	E3
D,E	4,1	1,1	x,x	D41x;E11x	0,667	F	0	F0
D,E	4,1	1,1	x,y	D41x;E11y	0,333	E	3	E3
D,E	4,1	1,1	y,x	D41y;E11x	0,000	F	0	F0
D,E	4,1	1,1	y,y	D41y;E11y	0,000	E	3	E3
D,E	4,2	0,0	x,x	D40x;E20x	0,500	F	0	F0
D,E	4,2	0,0	x,y	D40x;E20y	0,500	E	4	E4
D,E	4,2	0,0	y,x	D40y;E20x	0,000	F	0	F0
D,E	4,2	0,0	y,y	D40y;E20y	0,000	E	4	E4
D,E	4,2	0,1	x,x	D40x;E21x	1,000	F	0	F0
D,E	4,2	0,1	x,y	D40x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	4,2	0,1	y,x	D40y;E21x	0,000	F	0	F0

D,E	4,2	0,1	y,y	D40y;E21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,2	1,0	x,x	D41x;E20x	0,500	F	0	F0
D,E	4,2	1,0	x,y	D41x;E20y	0,500	E	4	E4
D,E	4,2	1,0	y,x	D41y;E20x	0,000	F	0	F0
D,E	4,2	1,0	y,y	D41y;E20y	0,000	E	4	E4
D,E	4,2	1,1	x,x	D41x;E21x	1,000	F	0	F0
D,E	4,2	1,1	x,y	D41x;E21y	0,000	F	0	F0
D,E	4,2	1,1	y,x	D41y;E21x	0,000	F	0	F0
D,E	4,2	1,1	y,y	D41y;E21y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,3	0,0	x,x	D40x;E30x	1,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,0	x,y	D40x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,0	y,x	D40y;E30x	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,0	y,y	D40y;E30y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,3	0,1	x,x	D40x;E31x	1,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,1	x,y	D40x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,1	y,x	D40y;E31x	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	0,1	y,y	D40y;E31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,3	1,0	x,x	D41x;E30x	1,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,0	x,y	D41x;E30y	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,0	y,x	D41y;E30x	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,0	y,y	D41y;E30y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
D,E	4,3	1,1	x,x	D41x;E31x	1,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,1	x,y	D41x;E31y	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,1	y,x	D41y;E31x	0,000	F	0	F0
D,E	4,3	1,1	y,y	D41y;E31y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
F	0	0	x	F00x	1,000	F	1	F1
F	0	0	y	F00y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ

F	0	1	x	F01x	0,167	G	0	G0
F	0	1	y	F01y	0,833	F	2	F2
F	1	0	x	F10x	0,167	G	0	G0
F	1	0	y	F10y	0,833	F	2	F2
F	1	1	x	F11x	0,333	G	0	G0
F	1	1	y	F11y	0,667	F	3	F3
F	2	0	x	F20x	0,200	G	0	G0
F	2	0	y	F20y	0,800	F	3	F3
F	2	1	x	F21x	0,400	G	0	G0
F	2	1	y	F21y	0,600	F	4	F4
F	3	0	x	F30x	0,250	G	0	G0
F	3	0	y	F30y	0,750	F	4	F4
F	3	1	x	F31x	0,500	G	0	G0
F	3	1	y	F31y	0,500	F	5	F5
F	4	0	x	F40x	0,333	G	0	G0
F	4	0	y	F40y	0,667	F	5	F5
F	4	1	x	F41x	0,667	G	0	G0
F	4	1	y	F41y	0,333	F	6	F6
F	5	0	x	F50x	0,500	G	0	G0
F	5	0	y	F50y	0,500	F	6	F6
F	5	1	x	F51x	1,000	G	0	G0
F	5	1	y	F51y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
F	6	0	x	F60x	1,000	G	0	G0
F	6	0	y	F60y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
F	6	1	x	F61x	1,000	G	0	G0
F	6	1	y	F61y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	0	0	x	G00x	0,167	Φ	Φ	ΦΦ

G	0	0	y	G00y	0,833	G	1	G1
G	0	1	x	G01x	0,333	Φ	Φ	ΦΦ
G	0	1	y	G01y	0,667	G	2	G2
G	1	0	x	G10x	0,200	Φ	Φ	ΦΦ
G	1	0	y	G10y	0,800	G	2	G2
G	1	1	x	G11x	0,400	Φ	Φ	ΦΦ
G	1	1	y	G11y	0,600	G	3	G3
G	2	0	x	G20x	0,250	Φ	Φ	ΦΦ
G	2	0	y	G20y	0,750	G	3	G3
G	2	1	x	G21x	0,500	Φ	Φ	ΦΦ
G	2	1	y	G21y	0,500	G	4	G4
G	3	0	x	G30x	0,333	Φ	Φ	ΦΦ
G	3	0	y	G30y	0,667	G	4	G4
G	3	1	x	G31x	0,667	Φ	Φ	ΦΦ
G	3	1	y	G31y	0,333	G	5	G5
G	4	0	x	G40x	0,500	Φ	Φ	ΦΦ
G	4	0	y	G40y	0,500	G	5	G5
G	4	1	x	G41x	1,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	4	1	y	G41y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	5	0	x	G50x	1,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	5	0	y	G50y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	5	1	x	G51x	1,000	Φ	Φ	ΦΦ
G	5	1	y	G51y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
Φ	Φ	0	x	ΦΦ0x	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
Φ	Φ	0	y	ΦΦ0y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
Φ	Φ	1	x	ΦΦ1x	0,000	Φ	Φ	ΦΦ
Φ	Φ	1	y	ΦΦ1y	0,000	Φ	Φ	ΦΦ

EK 4 – Performans Tablosu

Ağ No	Paralel Aktivite İçeriyor mu?	N	Teorik Süre	Markov Karar Modeli (m=0) (a=0 Durumu)		Markov Karar Modeli (m=2)		Markov Karar Modeli (m=4)		Markov Karar Modeli (m=∞) (a=1 Durumu)		Sezgisel Model (x1=0,9)		Sezgisel Model (x1=0,7)		Sezgisel Model (x1=0,5)	
				Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı	Değer	Fazla Mesai Sayısı
Ağ1	Hayır	21	17	17	0	15,8	2	13,8	4	9,63	9	15,83	-	13,3	-	11,05	-
Ağ1 Ger.1	Hayır	21	17	13	0	13	0	11	2	7	7	13	1	12	4	9	5
Ağ1 Ger.2	Hayır	21	17	18	0	17	2	15	4	10	9	16	4	13	5	11	9
Ağ2	Evet	12	8	7,53	0	6,49	2	5,29	4	4,49	7	7,55	-	6,75	-	6,01	-
Ağ2 Ger.1	Evet	12	8	9	0	7	2	7	2	6	4	8	2	7	3	6	4
Ağ2 Ger.2	Evet	12	8	7	0	5	2	5	2	5	2	6	1	6	2	5	4
Ağ3	Evet	19	14	14,21	0	13,56	2	13,08	4	7,91	14	13,18	-	11,47	-	10,24	-
Ağ3 Ger.1	Evet	19	14	11	0	10	1	10	1	6	8	11	0	10	2	9	4
Ağ3 Ger.2	Evet	19	14	17	0	16	2	15	3	9	12	14	5	12	8	11	11
Ağ4	Evet	15	11,5	9,89	0	8,98	2	7,81	4	6,15	7	9,27	-	8,44	-	7,59	-
Ağ4 Ger.1	Evet	15	11,5	10	0	9	2	7	4	6	6	11	1	9	3	8	5
Ağ4 Ger.2	Evet	15	11,5	14	0	12	2	9	4	8	7	11	4	10	5	9	6
Ağ5	Evet	22	17	15,46	0	14,11	2	12,56	4	7,83	11	15,18	-	13	-	10,76	-
Ağ5 Ger.1	Evet	22	17	14	0	13	1	12	3	8	8	14	0	12	4	10	8
Ağ5 Ger.2	Evet	22	17	20	0	19	2	17	4	9	8	17	6	14	11	12	14
Ağ6	Evet	28	19,5	18,28	0	17,41	2	14,65	4	10,9	14	17,25	-	14,86	-	12,46	-
Ağ6 Ger.1	Evet	28	19,5	16	0	16	1	15	1	10	10	16	1	14	7	10	9
Ağ6 Ger.2	Evet	28	19,5	24	0	22	2	21	4	13	13	19	9	16	10	14	15