

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KAYNAK DENGELEME SONRASI EN UYGUN İŞ PROGRAMININ SEÇİMİ
İÇİN BİR KARAR VERME YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan TEMUR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı İşletmesi Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KAYNAK DENGELEME SONRASI EN UYGUN İŞ PROGRAMININ SEÇİMİ
İÇİN BİR KARAR VERME YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Oğuzhan TEMUR
(501211122)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı İşletmesi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Atilla DAMCI

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR RESOURCE LEVELING



M.Sc. THESIS

**Oğuzhan TEMUR
(501211122)**

Department of Civil Engineering

Construction Management Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Atilla DAMCI

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211122 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Oğuzhan TEMUR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KAYNAK DENGELEME SONRASI EN UYGUN İŞ PROGRAMININ SEÇİMİ İÇİN BİR KARAR VERME YAKLAŞIMI ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Atilla DAMCI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gül POLAT TATAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sevilay DEMİRKESEN ÇAKIR.....
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 23 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 28 Haziran 2024





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Uzun bir emeğin ve özverinin sonucunda ortaya koyulan bu tezin hazırlanma sürecinde katkıları olan herkese teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Öncelikle, değerli tez danışmanım Doç. Dr. Atilla DAMCI'ya rehberliği, bilgeliği ve sabrı için içtenlikle saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Araş. Gör. Dr. Harun TÜRKOĞLU'na teşekkür ederim.

Uzun süren bu maratonda yanımda olan ve manevi desteğini asla eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans tezim süresince bana büyük yardımları dokunan M. Emre ŞİMŞEK'e teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, beni her adımda destekleyen tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Umuyorum ki bu çalışma, alanında katkı sağlayacak ve okuyuculara faydalı olacaktır.

Haziran 2024

Oğuzhan Temur
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. METODOLOJİ	23
3.1 Kritik Yol Yöntemi	23
3.2 Kaynak Yönetimi Yaklaşımlarından Kaynak Dengeleme	27
3.3 Kaynak Dengeleme için Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı	35
4. ÖNERİLEN KAYNAK DENGELEME MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ. 41	
4.1 İş Programı Modülü	41
4.2 Kaynak Dengeleme Modülü.....	42
4.2.1 İş programı kombinasyonlarının oluşturulması	42
4.2.2 İş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi	45
4.3 Karar Verme Modülü	45
5. ÖNERİLEN MODELİN ÖRNEK BİR VAKA ÇALIŞMASINDA UYGULANMASI.....	47
5.1 Geliştirilen Kaynak Dengeleme Modelinde Vaka Analizi.....	48
5.1.1 İş programı modülü.....	49
5.1.2 Kaynak dengeleme modülü.....	53
5.1.3 Karar verme modülü	54
5.2 Geliştirilen Kaynak Dengeleme Modeli Analizi ve Bulguları	55
5.3 Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı ile Kaynak Dengeleme	70
5.4 Minimum Moment Algoritması ile Kaynak Dengelemesi Bulguları	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	81
EKLER.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	99



KISALTMALAR

ACO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
CPM	: Kritik Yol Yöntemi
CSP	: Koşul Tatmin Problemleri
DACO	: Yönlendirilmiş Karınca Kolonisi Optimizasyonu
DPSO	: Ayrık Parçacık Küme Optimizasyonu
GA	: Genetik Algoritma(lar)
ID	: Kimlik Numarası
LOB	: Denge Hattı
LOBRLM	: LOB Tabanlı Kaynak Dengeleme
LOBSS	: LOB Tabanlı İş Programı Oluşturma Sistemi
MS	: Microsoft
PSO	: Parçacık Küme İyileştiricisi
SA	: Simüle Edilme
TOPSIS	: İdeal Çözüme Yakınlık Yoluyla Öncelik Sıralama Tekniği
Z1	: Amaç fonksiyonu 1
Z2	: Amaç fonksiyonu 2
Z3	: Amaç fonksiyonu 3
Z4	: Amaç fonksiyonu 4
Z5	: Amaç fonksiyonu 5
Z6	: Amaç fonksiyonu 6
Z7	: Amaç fonksiyonu 7
Z8	: Amaç fonksiyonu 8
Z9	: Amaç fonksiyonu 9
Z10	: Amaç fonksiyonu 10



SEMBOLLER

EF_i, EF_j	: En Erken Tamamlanma Zamanları
ES_i, ES_j	: En Erken Başlama Zamanları
LS_i, LS_j	: En Geç Başlama Zamanları
LF_i, FF_j	: En Geç Tamamlanma Zamanları
TF_i, TF_j	: Toplam Bolluklar
FF_i, FF_j	: Serbest Bolluklar
D_i, D_j	: Aktivite Süreleri
$R, R_i, R_v, , R_0$	: Kaynak İhtiyacı Miktarları
Σ	: Bir Sayı Dizisinin Toplamı
T	: Proje Süresi
i	: Dikkate Alınan Gün
$Rdev_i$	: i ve $i+1$ Günlerinde Gereken Kaynaklar Arasındaki Sapma
$Rinc_i$	: i ve $i+1$ Günlerinde Gereken Kaynaklar Arasındaki Artış
A_{rr}	: Ortalama Kaynak Kullanımı
R_i	: i . Günde Gereken Kaynak Miktarı
N	: Serbest Bolluk Dahilinde Kullanılan Bolluk Değeri
EB_A	: İncelemede Olan Aktivitenin En Erken Başlama Zamanı
$ET_{öncel}$	: Bitişik Öncel Aktivitelerin En Erken Tamamlanma Zamanlarından En Geç Olan Değer
IDC_a	: İlk İş Programı ID Numarası
$IDS_a)$	: Kaydırma Dizisi ID Numarası
$ESN_{b,c}$	: Kritik Olmayan Aktivitelerin En Erken Başlangıç Zamanlarını
$TFN_{b,c}$	: Kritik Olmayan Aktivitelerin Toplam Bolluk Miktarları
$ESY_{b,c}$	: Seçilen Kritik Olmayan Aktivitenin Yeni En Erken Başlangıcı
b	: Seçilen Kritik Olmayan Aktivitenin Sırası
m	: Değişen Dizideki Kritik Olmayan Aktivitelerin Sayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Amaç fonksiyonları ile kaynak dengeleme çalışmaları, Damcı ve Polat (2014, s. 59) çalışmasından uyarlanmıştır.....	32
Çizelge 5.1 : Vaka analizinde kullanılan iş programının girdileri.....	49
Çizelge 5.2 : Kaynak dengelemesi öncesinde aktivitelere ait bilgiler.....	50
Çizelge 5.3 : Tüm iş programları içerisinde elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerleri.....	56
Çizelge 5.4 : Başlangıç iş programına ait amaç fonksiyonu değerleri.....	56
Çizelge 5.5 : Minimum amaç fonksiyon değerlerini veren iş programı sayıları.....	57
Çizelge 5.6 : $Z1_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	58
Çizelge 5.7 : $Z2_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	58
Çizelge 5.8 : $Z3_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	59
Çizelge 5.9 : $Z4_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	59
Çizelge 5.10 : $Z5_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	60
Çizelge 5.11 : $Z6_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	61
Çizelge 5.12 : $Z7_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	62
Çizelge 5.13 : $Z8_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	62
Çizelge 5.14 : $Z9_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	62
Çizelge 5.15 : $Z10_{min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.....	63
Çizelge 5.16 : Minimum amaç fonksiyonu değerlerini veren ve en yüksek toplam bolluğa sahip iş programlarının tüm amaç fonksiyonu değerleri.....	64
Çizelge 5.17 : $Z3_{min}$ değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programına ait aktivitelerin bilgileri.....	67
Çizelge 5.18 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programına ait aktivitelerin bilgileri.....	73
Çizelge 5.19 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri.....	74
Çizelge 5.20 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programının vaka analizi sonucunda seçilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri.....	75



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : CPM ağı diyagramı örneği.	26
Şekil 3.2 : Kritik yol yöntemi akış şeması.	27
Şekil 3.3 : Kaynak kullanımı: Dalgalı (a); Sabit (b); Değişken (c), Senouci ve Eldin (2004, s. 870).	29
Şekil 3.4 : Örnek moment hesaplamaları-dengelenmemiş günlük kaynak histogramı, Christodoulou ve diğ. (2010, s. 520).	36
Şekil 3.5 : Örnek moment hesaplamaları-dengelenmiş günlük kaynak histogramı, Christodoulou ve diğ. (2010, s. 520).	36
Şekil 4.1 : Tez kapsamında geliştirilen modelin girdileri ve çıktıları.....	46
Şekil 5.1 : Vaka analizinde izlenen adımlar.	48
Şekil 5.2 : Kaynak dengelemesi öncesi iş programı.	51
Şekil 5.3 : Kaynak dengelemesi öncesi iş programına ait kaynak histogramı.....	52
Şekil 5.4 : Z_{3min} değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programı.	68
Şekil 5.5 : Z_{3min} değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programının kaynak histogramı.	69
Şekil 5.6 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programı.	71
Şekil 5.7 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programına ait kaynak histogramı.....	72
Şekil A.1 : İş programı modülü aktivite verisi giriş arayüzü.....	89
Şekil A.2 : İş programı modülü CPM tablosu ve kaynak histogramı arayüzü.	90
Şekil B.1 : Kaynak dengeleme modülü iş programı kombinasyonları oluşturma süreci örneği.....	91
Şekil B.2 : Kaynak dengeleme modülü iş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi.	92
Şekil C.1 : Karar verme modülü arayüzü.	93
Şekil D.1 : Başlangıç iş programına ait aktivitelerin özelliklerinin ve kaynak histogramının gösterim arayüzü.....	95
Şekil D.2 : Minimum moment algoritması yaklaşımının uygulama süreci örneği... ..	96
Şekil D.3 : Karar verme modülü arayüzü.	97



KAYNAK Dengeleme Sonrası En Uygun İş Programının Seçimi İçin Bir Karar Verme Yaklaşımı

ÖZET

İnşaat sektörü, konut ve altyapı ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla ortaya çıkmış ve küresel ekonomide önemli bir sektör haline gelmiştir. Nüfus artışı, kentlerin genişlemesi ve ekonomik büyüme, inşaat projelerinin karmaşıklığını ve dinamizmini artıran unsurlar arasında yer almaktadır. İnşaat projelerinin yönetimi, coğrafi, ekonomik, sosyal ve teknolojik faktörlerin etkileşimiyle daha da karmaşık hale gelebilmektedir. Bu durum, inşaat projelerinin genellikle başlangıçta belirlenen bütçe, süre ve kalite hedeflerini karşılayamamasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, kaynak yönetimi, inşaat projelerinin başarıyla tamamlanabilmesi için kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Kaynak yönetimi, insan kaynakları, ekipman, finansal kaynaklar ve zaman gibi kaynakların etkin kullanımı anlamına gelmektedir. Başarılı bir kaynak yönetimi, projenin bütçe, zaman ve kalite hedeflerine ulaşmasını sağlamakla birlikte, tüm paydaşların beklentilerini karşılamak için de önemlidir. Kaynak kullanımındaki dalgalanmalar, proje maliyetinin artmasına ve süresinin uzamasına yol açabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için kaynak dengelemesi gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Kaynak dengelemesi, proje süresi ile kaynak ihtiyaçlarını sabit tutarak kaynak kullanımındaki dalgalanmaları en aza indirmeyi amaçlar. Planlama mühendisleri, bu tür yaklaşımlar sayesinde bir proje için optimum kaynak yönetimini sağlayan iş programları oluşturmaktadırlar. Fakat, bu iş programları arasından en uygun olanını seçmek planlama mühendisleri için zorlu bir süreç olabilmektedir. Bu tez, inşaat projelerinde, kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengelemesi sonrası en uygun iş programının seçilmesi için geliştirilen bir yaklaşım önermektedir. Söz konusu yaklaşım, kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengeleme sonrasında oluşan iş programları arasından en verimli olanını belirlemek için planlama mühendislerine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında kaynak yönetimi kapsamında kullanılan kaynak dengeleme yaklaşımları üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Kaynak dengeleme problemi için söz konusu yaklaşımlar kullanılarak en uygun çözüme ulaşma amacıyla yapılan çalışmalara ek olarak, kaynak dengelemede kullanılan amaç fonksiyonları ve minimum moment algoritması yaklaşımını inceleyen çalışmalar da incelenmiştir. Literatür, kaynak dengelemenin proje başarısı için kritik olduğunu ve kaynakların dengeli kullanılmasının proje süresi ve maliyetini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Bunlarla birlikte, literatür incelemesi sonucunda kaynak dengeleme için farklı modellerin geliştirildiği ve birçok amaç fonksiyonunun kaynak dengeleme sürecinde kullanıldığı görülmüştür. Ancak, kaynak dengeleme işleminin ardından elde edilen iş programları arasında en uygun olanının belirlenmesi için yürütülen bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, kaynak kullanım kısıtı olmadan, olası tüm iş programı kombinasyonlarını

oluşturabilen ve analiz edebilen web tabanlı bir kaynak dengeleme modeli geliştirilmiş ve bir karar verme yaklaşımı önerilmiştir. Söz konusu yaklaşım, kaynak dengeleme sonrasında elde edilen iş programlarına ait amaç fonksiyonlarının değerleri de göz önünde bulundurularak, iş programlarındaki aktiviteler için en yüksek toplam bolluk miktarına sahip olan iş programının en uygun iş programı olarak kabul edilmesidir.

Tez kapsamında geliştirilen modelde kullanılan yöntemler sırasıyla: (1) Kritik Yol Yöntemi, (2) Kaynak Yönetimi Yaklaşımlarından Kaynak Dengeleme, ve (3) Kaynak Dengeleme için Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı'dır. Kritik yol yöntemi, iş programı oluşturma süreçlerinde ve kaynak dengeleme yaklaşımı amaç fonksiyonları ile birlikte kaynak kullanımı dağılımının dengelenmesinde kullanılmıştır. Minimum moment algoritması yaklaşımı ise bu tez kapsamında önerilen karar verme yaklaşımının performansını ölçmek amacıyla uygulanmıştır.

JavaScript, HTML ve CSS ile web ortamında tasarlanarak geliştirilen kaynak dengeleme modeli, kritik yol yöntemi yardımıyla oluşturulan iş programı alternatiflerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamaktadır. Söz konusu model üç modülden oluşmaktadır: (1) iş programı modülü, (2) kaynak dengeleme modülü, ve (3) karar verme modülü. Söz konusu modüller, kullanıcı dostu bir arayüz sunarak planlama mühendislerinin kaynakları etkili bir şekilde görselleştirmesine ve yönetmesine olanak tanımaktadır. Tez kapsamında geliştirilen model literatürden örnek alınarak uyarlanan bir iş programı üzerinde uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen sonuçlar tezde sunulularak analiz edilmiştir. Bu sonuçlar ile beraber tez kapsamında önerilen karar verme yaklaşımı doğrultusunda örnek vaka analizi için en uygun iş programının seçimi nedenleri ile birlikte açıklanmıştır. Aynı zamanda söz konusu iş programına, minimum moment algoritması yaklaşımı ile de kaynak dengeleme süreci uygulanmıştır. Tez kapsamında önerilen karar verme yaklaşımının performansını ölçmek amacıyla, minimum moment algoritması yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar geliştirilen kaynak dengeleme modelinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, geliştirilen kaynak dengeleme modelinin, tez kapsamında dikkate alınan amaç fonksiyonu için, minimum moment algoritması yaklaşımı ile elde edilen iş programından daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar tez çalışmasında detaylı olarak tartışılmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model ile birlikte önerilen karar verme yaklaşımının iş programı esnekliğini korurken kaynak histogramını optimize ettiği görülmüştür. Söz konusu yaklaşım, sunduğu iş programı esnekliği ile inşaat projelerinde beklenmedik durumlarla karşılaşıldığında proaktif karar verme ve kaynak yönetimini kolaylaştırarak proje hedeflerinin korunmasını sağlayabilir. Planlama mühendisleri için, iş programı esnekliği, proje yönetiminde önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu tez, planlama mühendislerine, kaynak dengeleme sonrası en uygun iş programını seçme konusunda kapsamlı bir bakış açısı sunarak, proje yönetimini daha etkili bir hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Son olarak, bu tez çalışmasının sunulmasının ardından ileride gerçekleştirilecek araştırma ve geliştirme süreçlerine katkı sağlayacak öneriler sunulmuştur.

A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR RESOURCE LEVELING

SUMMARY

A substantial sector of the global economy, the construction industry has expanded in response to the demand for housing and infrastructure. The complexity and dynamism and of construction projects have been increased by population growth, urbanization, and economic development. The management of these projects is further complicated by the interaction of technological, social, economic, and geographical factors. This situation frequently results in construction projects failing to meet the time, cost, and quality objectives that were initially established. In this context, resource management is emerging as a critical factor in the success of projects.

Resource management involves the efficient utilization of various resources, including human resources, equipment, financial resources, and time. Resource management is crucial for achieving the project's time, cost, and quality objectives, as well as meeting the expectations of all parties involved. Effective resource planning and management are necessary due to the complex and ever-changing nature of construction projects.

The management of resources is complicated by fluctuations in resource usage, which can contribute to increased project cost, extended project duration, and decreased labor productivity. Various approaches, such as resource leveling, are used to overcome these challenges. One of the two most important approaches is resource leveling involves the process of equitably distributing the demand for resources based on the available supply over a specific time frame. The objective of resource leveling is to optimize resource utilization by minimizing fluctuations in resource usage, thus avoiding both over allocation and underutilization of resources.

Objective functions (e.g., the minimization of the sum of absolute deviations between resource usage and average resource requirements at specific time intervals) have been employed in studies on resource leveling in construction projects to develop a leveled resource usage histogram. Despite the practicality of objective functions, it remains a challenging task for schedulers to identify the most suitable schedule from a collection of alternatives which generate same optimal result for the leveling objective function. Though many research have been conducted on resource leveling, none have focused exclusively on determining the most optimal schedule among multiple schedules that achieve the same ideal result for the objective function employed in resource leveling. Therefore, the primary objective of this thesis is to propose a systematic approach for selecting the most appropriate schedule after resource leveling in construction projects.

For this purpose, a web-based resource leveling model capable of generating and analyzing all possible schedule combinations without constraints on resource utilization was developed. In the model developed within the scope of the thesis, three methodologies were implemented: Critical Path Method, Resource Leveling from Resource Management Approaches and Minimum Moment Algorithm Approach for Resource Leveling.

The Critical Path Method was used in the process of scheduling. The Critical Path Method is a planning methodology developed for organizing construction projects and completing a project. It is frequently used to sequence project activities based on time and precedence relationships. The fundamental principles of the Critical Path Method involve determining the start/finish times of each activity and the logical relationships between activities. This information is utilized to calculate the minimum time required for project completion. Subsequently, a path formed by critical activities is identified. This path consists of a set of activities that affect the total project duration and are most sensitive to delays.

The resource leveling approach was used to level the resource utilization distribution together with the objective functions. The fundamentals of resource leveling involve shifting the early start times of non-critical project activities without any constraints on existing resources, in accordance with the allowed total float amounts. During resource leveling, the project duration remains constant and unchanged after leveling. It is assumed that resources are sufficient for initiating and continuing activities during resource leveling.

The performance of the decision support model was evaluated utilizing the Minimum Moment Algorithm, which was first introduced by Harris in 1978. One of the widely employed methodologies in project management is the Minimum Moment Algorithm.

The decision support model for resource leveling was developed utilizing JavaScript, HTML, and CSS programming languages in a web-based environment. The model has three modules: the scheduling module, the resource leveling module, and the decision-making module.

The scheduling module carry out basic Critical Path Method (CPM) calculations. The scheduling module is especially designed to perform the forward and backward passes in the CPM calculations.

The resource leveling module is responsible for managing the fundamental procedure of resource leveling. The resource leveling module aims to optimize resource usage by minimizing fluctuations and ensuring a consistent level of resource use. The resource leveling module receives the outcomes generated through the scheduling module, thus confirming the role of the scheduling module as the provider of inputs for the resource leveling module. The resource leveling module uses data from the scheduling module to execute its own algorithmic procedures. It is important to note that each module is developed to run in a harmonious manner through interaction with the others.

The decision-making module emphasizes the process of making unbiased decisions. The decision-making module is designed to determine the schedule that achieves the minimum objective function result for resource leveling and the maximum schedule flexibility among all possible CPM network diagrams. The main rationale behind this approach is to choose the schedule that offers the highest level of flexibility from the schedules that demonstrate the most evenly distributed resource utilization histogram. The decision making module receives the outcomes generated by the resource leveling module, thereby confirming the resource leveling module's role as the input provider for the decision making module. The decision-making module runs its own algorithms by utilizing data provided by the resource leveling module.

An effective method to verify the practicality and effectiveness of the proposed model is to utilize an illustrative example. An example network diagram, comprising of 20 activities, derived from Hegazy's (1999) study, is employed. The schedule module's

calculations determined the total project duration to be 27 days. In addition, the project's total resource requirement was calculated to be 283, with an average daily resource requirement of 11. Moreover, the total amount of total float for the activities was determined to be 29.

The resource leveling module runs the leveling procedure using the data generated by the scheduling module. A total of 24,971 schedules were emerged by modifying the early start times of non-critical activities, while maintaining that the interdependencies between activities were not breached. Additionally, the values of all objective functions presented in the thesis were calculated for each schedule by the resource leveling module. However, in the thesis, priority was given to the objective function of minimization of the sum of the absolute deviations between resource usage for a determined time interval (day, week etc.) and the average resource usage to achieve resource leveling.

The decision-making module ultimately chooses the schedule or schedules that result in the lowest outcome out of 20 objective function results. The minimum value of the objective function was found to be 90 labor per day. After examining the results, the decision-making module concluded that out of 24,971 schedules, 348 of them achieved the minimum objective function result. Some of the 348 schedules were observed to have a varying sum of total floats. There is a single schedule that provides the maximum level of flexibility, with a total float of 21 days, while also achieving the lowest objective function result of 90 labor/day for resource leveling. In this thesis, the proposed approach for selecting the optimal schedule after resource leveling, without constraints on resource utilization, is to select the schedule with the highest total float for activities, considering the values of objective functions. According to this approach, the schedule with a total float of 21 was selected as the most appropriate schedule. To summarize, after implementing resource leveling, the objective function for the project decreased from 112 labor/day to 90 labor/day, resulting in a 20% improvement.

In addition, the Minimum Moment Algorithm approach was used to apply the resource leveling process to the same example network diagram. The decision support model's performance is evaluated by comparing the results obtained via the Minimum Moment Algorithm approach to the results of the proposed model. The objective function yields a result of 102 laborers per day for the schedule, which achieves a balanced resource utilization histogram through the implementation of the Minimum Moment Algorithm approach. In addition, the sum of the total float of activities amounts to 22 days. After applying resource leveling using the Minimum Moment Algorithm, the objective function for the project decreased from 112 labor/day to 102 labor/day, resulting in a 8.92% improvement. The comparison results revealed that the resource use histogram obtained through the proposed resource leveling model is more evenly distributed than the one obtained through the Minimum Moment Algorithm approach.

In sum, the decision-support model effectively optimizes the resource usage histogram while maintaining schedule flexibility. This model, with its provided schedule flexibility, can facilitate proactive decision-making and resource management in construction projects when unexpected situations arise, thereby preserving project objectives. Schedule flexibility is an important advantage in project management for planning engineers. Professionals in the construction industry can effectively manage resources, adjust to changes, minimize risks, and accomplish projects on time with a flexible and resource-balanced schedule. This thesis aims to provide planning

engineers with a comprehensive perspective on selecting the optimal schedule after resource leveling, thereby making project management more effective.



1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, insanlığın temel ihtiyaçlarından biri olan konut ve altyapı gereksinimlerini karşılamak amacıyla ortaya çıkmıştır. Günümüzde küresel ekonomide önemli bir sektör olarak yer almaktadır. Kentlerin sürekli olarak genişlemesiyle artan altyapı ihtiyacı, nüfus artışı ve ekonomik büyüme gibi etkenler, inşaat projelerinde giderek artan karmaşıklığın ortaya çıkmasına sebep olan unsurlar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, inşaat projelerinin yönetimi, pek çok değişkenin dikkate alınması gereken karmaşık bir süreç haline gelmiştir. Ayrıca, coğrafi, ekonomik, sosyal ve teknolojik faktörlerin etkileşimiyle projelerin karmaşıklığı artmaktadır. Bunun sonucu olarak, inşaat projeleri sürekli olarak değişen koşullar altında gerçekleştirilmek zorunda kalmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, inşaat projelerinin çoğu, başlangıçta belirlenen bütçe, süre ve kalite hedeflerini tam olarak karşılayamamaktadır. Bu durum, inşaat projelerinin doğasındaki belirsizliklerin ve değişkenliklerin proje başarısı için önemli olduğunu göstermektedir (Andreotti, 1977; Walker, 2015; Behnam ve diğ., 2016; Harris ve diğ., 2021; Kowacka ve diğ., 2023).

Bu belirsizliklerle başa çıkmak ve projelerin başarıyla tamamlanmasını sağlamak için etkili olabilecek yaklaşımlardan bir tanesi kaynak yönetimidir. Bir başka ifadeyle, kaynakların bir projenin tüm süreçlerini destekleyen temel unsurlar olduğu göz önüne alındığında, kaynak yönetimi bir projenin başarısını belirleyen en önemli kritik faktörlerden biri olarak gösterilebilir. Kaynak yönetimi, insan kaynakları, malzeme, ekipman, finansal kaynaklar ve zaman gibi kısıtlı kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanılması anlamına gelmektedir. Başarılı bir kaynak yönetimi, projenin bütçe, zaman ve kalite hedeflerine ulaşmasını sağlamanın yanı sıra, tüm paydaşların beklentilerini karşılamak için önemli bir rol oynamaktadır. Tüm bunlar düşünüldüğünde, kaynak yönetiminin bir projenin verimliliği, zaman yönetimi, risk yönetimi ve maliyet yönetimi konularında önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir (Hariga ve El-Sayegh, 2011; Benjaoran ve diğ., 2015; El-Sayegh, 2018; Ammar, 2020).

İnşaat projelerinin sürekli olarak değişen gereksinimleri, kaynakların etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, kaynakların sınırlı olduğu gerçeği, projenin başarısı için doğru kararların alınmasını ve kaynakların optimal bir şekilde dağıtılmasını gerektirmektedir. Kaynak kullanımındaki dalgalanmalar, işgücü verimliliğinin azalmasına, proje süresinin uzamasına ve proje maliyetinin artmasına yol açabileceği için kaynak yönetiminde zorluklar oluşturabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve projede kaynakları daha sağlıklı bir şekilde kullanmak için farklı kaynak yönetimi yaklaşımlarından faydalanılmaktadır. Kaynak dengelemesi, kaynak yönetimi için kullanılan en yaygın iki yaklaşımdan biri olup, proje süresini ve kaynak gereksinimlerini sabit tutarken kaynak kullanımındaki dalgalanmaları en aza indirmek için tasarlanmıştır (Son ve Skibniewski, 1999; Leu ve diğ., 2000; Doulabi ve diğ., 2011; Hariga ve El-Sayegh, 2011; Damcı ve Polat, 2014; Damcı ve diğ., 2016). Planlama mühendisleri bu gibi yaklaşımlar ışığında bir proje için optimal kaynak yönetimini sağlayan iş programları oluşturmaktadırlar. Oluşturulan bu iş programları arasından en uygununu seçmek yine planlama mühendisleri için zorlu bir süreç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tezde geliştirilen model ile planlama mühendisleri karşılaştığı bu zorluğa bir çözüm bulabilirler.

1.1 Tezin Amacı ve Önemi

Bu tez çalışması, kaynak kullanım kısıtı olmadan, inşaat projelerinde kaynak dengelemesini takiben en uygun iş programının seçilmesi için bir yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşım ile beraber, kaynak dengeleme sonrasında oluşan iş programları arasından en uygun programı belirlemek için planlama mühendislerine karar vermede yardımcı olacak bir modelin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

İnşaat projelerinin sürekli değişen gereksinimleri sebebiyle ortaya çıkan zorluklara karşı koymak için kaynakların etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir. Fakat inşaat projelerindeki bu değişken yapı kaynak yönetimini zorlaştırabilmektedir. Kaynak kullanımı dengeli bir şekilde dağıtmak bu zorlu kaynak yönetiminde önemli anahtarlardan biridir. Kaynak kullanımındaki dalgalanmalar proje üzerinde birçok olumsuz etkiyi beraberinde getirmektedir. Bu dalgalanmaları en aza indirmek için planlama mühendisleri tarafından farklı yöntemlerin kullanımı ile kaynakların projede daha dengeli bir şekilde dağıtılması sağlanmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan kaynak dengeleme ile ilgili literatür araştırması, dengeli bir

kaynak kullanımı elde etmek için bir amaç fonksiyonunun (örneğin, belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki mutlak sapmaların toplamının en aza indirilmesi) kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, kaynak dengelemesi için kullanılan bu amaç fonksiyonu farklı iş programları için aynı sonucu üretebilmektedir. Bu durumda, planlama mühendisleri için en uygun olan alternatif iş programını seçmek zorlu bir karar olabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen model planlama mühendisinin, kaynak kullanım kısıtı olmadan, amaç fonksiyonunun aynı sonucu ürettiği farklı iş programları arasından en uygun iş programını seçme sürecine yardımcı olmaktadır. Seçim yapılması gereken alternatif iş programları arasından en uygun olanına karar vermek için farklı karar verme yaklaşımlarının dikkate alınması, bu çalışma için potansiyel bir gelişim alanını temsil etmektedir.

1.2 Tezin Kapsamı

Tez çalışmasının giriş bölümünde, çözülmesi amaçlanan problem ve tez çalışmanın kapsamı açıklanmıştır. Ardından ise kaynak yönetimi üzerine yapılan çalışmalar ile tez kapsamında kullanılan kaynak yönetimi yaklaşımlarından biri olan kaynak dengelemeyi örnek iş programları üzerinde uygulamış çalışmalardan literatür araştırması kısmında bahsedilmiştir. Yine bunlarla beraber kaynak dengeleme için kullanılan amaç fonksiyonları ve minimum moment algoritması yaklaşımı üzerine olan çalışmalardan aynı bölümde bahsedilmiştir.

Literatür araştırması bölümünden sonra tez kapsamında geliştirilen modelde kullanılan kaynak yönetimi yaklaşımlarından biri olan kaynak dengeleme ve kaynak dengeleme sürecinde kullanılan amaç fonksiyonları hakkında bilgi verilerek, kaynak dengeleme çözüm süreçleri açıklanmıştır. Bu tez kapsamında önerilen karar verme yaklaşımına destek olması amacıyla, kaynak dengeleme yaklaşımlarından biri olan minimum moment algoritması yaklaşımı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonrasında önerilen modelin ve yaklaşımın nasıl geliştirildiğini ifade edecek çözüm süreçleri açıklanmıştır. Ardından literatürden örnek alınarak uyarlanan bir iş programı üzerinde geliştirilen model uygulanmıştır.

Tez çalışması kapsamında kullanılan model ile birlikte kaynak kullanım kısıtı olmadan, başlangıç iş programı üzerinden kaynak dengeleme süreci yürütülmüştür.

Elden edilen iş programları arasından en uygununa karar vermek için yaklaşım ve öneriler sunulmuştur.

Bu bölümde, tez çalışmasının hangi konuları kapsadığı, amaçları ve kullanılan metodoloji hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 2'de, tez çalışması konusuyla ilgili olarak yapılan literatür araştırmasının detayları paylaşılmıştır.

Bölüm 3'te tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde kullanılan metodolojilere bir genel bakış sunulmuştur.

Bölüm 4'te tez çalışması kapsamında geliştirilen modelin ve karar verme yaklaşımının geliştirilmesinin detayları sunulmuştur.

Bölüm 5 ise geliştirilen modelin ve karar verme yaklaşımının literatürden örnek alınarak uyarlanan bir iş programı üzerinde uygulamasını içermektedir.

Bölüm 6'da ise vaka analizi ile elde edilen sonuçlar değerlendirilerek önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, kaynak yönetimi kapsamında kullanılan kaynak dengeleme yaklaşımı üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Optimum kaynak dengeleme sonuçlarına ulaşmak amacıyla yapılan çalışmaların incelendiği bu bölümde aynı zamanda kaynak dengelemede kullanılan amaç fonksiyonları ve minimum moment algoritması yaklaşımı hakkında araştırmalar yapan çalışmalar sunulmuştur.

İnşaat sektöründe, projenin başarılı bir şekilde tamamlanması için kritik bir öneme sahip olan kaynak yönetiminde, kaynak dengeleme problemi ile karşılaşılabilir. Kaynak dengeleme probleminin, bir projenin belirli kaynaklarının (örneğin işçiler, makineler) iş programı süresince ne zaman kullanılacağını belirleme ve düzenleme sürecini ifade ettiği söylenebilir. Bir başka ifadeyle, projenin kaynak kullanımını optimize etmeyi, kaynakların aşırı yüklenmesini önlemeyi ve projenin belirlenen iş programı süresi için uygunluğunu sağlamayı amaçlayan bir problem olarak tanımlanabilir (Ponz-Tienda ve diğ., 2013; Benjaoran ve diğ., 2015; Qiao ve Li, 2018; Selvam ve Tadepalli, 2019).

Literatürde, bu konuda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalar, inşaat projelerinde karşılaşılan kaynak dengeleme problemlerinin çözümüne yönelik çeşitli yaklaşımları sunmaktadır. Bu çalışmalar, araştırmacılar ve profesyoneller için değerli kaynaklar olup, sektörde verimliliği artırmak ve kaynakları etkin bir şekilde kullanmak isteyenler için önemli bir referans noktası olarak görülmektedir.

Bugünün inşaat endüstrisinde rekabet ve kârlılık için en önemli unsurlardan birinin kaynak yönetimi olduğu düşünülmektedir. Karaa ve Nasr (1986), proje süresi boyunca kaynakların yönetimi için karışık tam sayılı (mixed-integer) lineer programlama modelini sunmuştur. Kritik yol yöntemi zaman analizine dayanarak, söz konusu model ekipman kiralama ve geçici kaynaklar için iş programı oluşturarak, sahip olunan ekipmanın ve diğer mevcut kaynakların kullanım düzenini belirlemektedir. Modelin, çoklu proje kaynak planlama ve paylaşımı için bir tahmin aracı olarak kullanılabileceği

ve proje süresince kaynakların en verimli kullanımını sağlayan bir araç olarak hizmet edebileceği belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada Easa (1989), kaynak dengeleme için bir optimizasyon modeli sunmaktadır. Bu model, kaynak gereksinimleri ile sabit bir kaynak seviyesi, ardışık kaynak gereksinimleri veya istenen dengesiz kaynak seviyeleri arasındaki mutlak sapmaları en aza indirmeyi amaçlayan bir amaç fonksiyonuna sahiptir. Model, kritik yol yöntemi ile oluşturulan iş programları sonuçlarını girdi olarak kullanmaktadır. Modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu, bir ara yüz programı tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen model, küçük ve orta ölçekli inşaat projeleri için tasarlanmıştır. Younis ve Saad (1996) tarafından yürütülen çalışmada ise, çok kaynaklı iş programlarında kaynak dengeleme problemi için en uygun kaynak dengeleme sürecini gerçekleştirmek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, bilgisayar ortamında bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kaynak dengeleme süreci aktivitelerin erken başlama zamanları, toplam bolluk miktarları sınırında kaydırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile tüm olası iş programı kombinasyonlarına ulaşmak amaçlanmıştır. Ayrıca, kaynak dengeleme sürecinde proje maliyetleri de göz önüne alınmıştır. Söz konusu modelin uygulanması ve maliyet değerlendirme hesaplamalarının yapılabilmesi için çözüm süreci 3 aşamalı olarak yürütülmüştür: (1) Kritik yol yöntemi ile hesaplama, (2) uygun çözümleri bulma, ve (3) optimal iş programlarını oluşturma.

Leu ve Yang (1999) yaptıkları çalışmada, inşaat sektöründeki kaynakların sınırlı olduğunu ve iş programının oluşturulmasının kaynak tahsisini içermesi gerektiğini belirterek genetik algoritmaları kullanan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, zaman-maliyet dengesi modelini, kaynak kısıtlı modelini ve sınırsız kaynak dengeleme modelini entegre etmektedir. Bununla birlikte, problemi çözmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen model sayesinde sınırlı kaynak altında proje maliyetlerini, proje sürelerini ve kaynak miktarı ile kaynak kullanımı arasındaki kaynak değişimini en aza indirmek amaçlanmıştır. Hegazy (1999) ise, çalışmasında aynı anda kaynak tahsisi ve kaynak dengeleme üzerine durmaktadır. Bu çalışma, kaynak tahsisi ve dengeleme için sezgisel iyileştirmeler önermekte ve genetik algoritmalar tekniği kullanımı ile her iki yönü de aynı anda göz önünde bulundurarak optimum çözüm sunmayı amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, kaynak yönetimi için 3 ana gelişme yapılmıştır: (1) rastgele aktivite

öncelikleri kullanarak kaynak tahsisi için sezgisel prosedürlerde iyileştirme, (2) kaynak dengelemesi için sezgisel prosedürlerde pratik bir modifikasyon, ve (3) genetik algoritmalar tekniği kullanılarak hem kaynak tahsisi hem de kaynak dengelemesi için çok amaçlı bir optimizasyon. Çalışmada geliştirilen modelin uygulama mantığında ilk olarak aktivitelerin seçilip rastgele öncelikler atanması vardır. Daha sonra söz konusu önceliklerin iş programı üzerindeki etkisi izlenmektedir. Ardından, otomatikleştirilen genetik algoritma prosedürü, daha kısa proje süresi ve dengelenmiş kaynak profilleri üreten en uygun aktivite önceliklerini aramaktadır.

Leu ve diğ. (2000), kaynak optimizasyonu için genetik algoritma kullanmanın yanında bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Önerilen algoritma sayesinde kaynak dengeleme için birden fazla kaynağın optimum kombinasyonu ve aktivitelerin başlama ve bitiş zamanlarını etkili bir şekilde belirlenmesi sağlanabilmektedir. Geliştirilen genetik algoritma tabanlı iş programı oluşturma sistemi, birden fazla kaynağı dengeleyerek belirli bir proje süresi içinde kaynak kullanımı varyasyonunu en aza indirme amacı taşımaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında, planlama mühendislerinin varsayımsal sorgular aracılığıyla anlık analizler yapmaları için bir karar destek sistemi de geliştirilmiştir.

Senouci ve Adeli (2001) ise, kaynak dengeleme için bir matematiksel model sunmaktadır. Önerilen model, Adeli ve Park (1995, 1996, 1998) tarafından geliştirilen patentli (ABD Patenti No. 5,815,394; Eylül 29, 1998) sinir dinamikleri modelini kullanmaktadır. Model, öncelik ilişkilerini, çoklu ekip stratejilerini ve zaman-maliyet dengesini içermektedir. Önerilen model toplam proje maliyetinin en aza indirilmesini de göz önünde bulundurmaktadır.

Aktivite süresi, hava durumu, saha yoğunluğu ve verimlilik düzeyi gibi genel ortamda meydana gelen değişiklikler nedeniyle belirsiz olabilmektedir. Leu ve Hung (2002), belirsiz aktivite süresi ve kaynak dengelemenin birleşik etkilerini dikkate alan bir kaynak dengeleme modeli önermektedir. Monte Carlo simülasyonu, faaliyet süresinin belirsizliklerini modellemek için kullanılmıştır. Daha sonra, belirsiz aktivite sürelerinin olası etkilerini göstermek için genetik algoritma kullanan bir teknik benimsenmiştir.

Senouci ve Eldin (2004) yaptıkları çalışmada, kaynak dengelemesi için bir artırılmış Lagrange genetik algoritma modeli sunmaktadırlar. Model, proje süresini en aza

indirmeye odaklanmak yerine öncelik ilişkilerini, birden fazla ekip stratejisini, toplam proje maliyetini en aza indirmeyi ve zaman-maliyet dengesini dikkate almaktadır. Geliştirilen modelde, kaynak dengeleme ve kısıtlı kaynaklar altında iş programı oluşturma aynı anda gerçekleştirilmektedir. Toplam inşaat maliyetini minimize etme amacıyla bir optimizasyon formülü sunulmuştur. Aynı zamanda, geliştirilen model kaynak dengeleme sürecinde iş programını ve toplam maliyeti optimize etmekle birlikte kaynak-zaman planlama sorununu kısıtlı olmayan bir forma dönüştürmek için ikinci dereceden ceza fonksiyonunu (quadratic penalty function) kullanmaktadır. Model, FORTRAN bilgisayar programlama dilinde kodlanmıştır. Modelin kaynak dengelemesi açısından verimli bir sonuç vermesi hedeflenmiştir.

Razavi ve Mozayani (2007) ise kaynak dengeleme problemi için izin verilen belirli aktivitelerin durdurulmasına ve yeniden başlatılmasına izin veren genetik algoritma tabanlı bir model sunmaktadır. Diğer bir ifadeyle, önerilen model, belirli aktivitelerin durdurulmasına ve yeniden başlatılmasına izin verirken kaynakları dengelemektedir. Söz konusu modelin sağladığı çözümdeki iyileşmeyi göstermek için örnekler sunulmuştur. Ulaşılan çıktılar bir yazılım aracılığıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sakka ve El-Sayegh (2007) yaptıkları çalışmada aktivitelerin bolluk kaybının projenin süresi ve maliyeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tamamlanma zamanları erken bitiş zamanlarından daha geç olan kritik olmayan aktivitelerde yaşanan gecikmelerin yarattığı etkiyi ölçmeyi sağlayacak bir yöntem geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemde, Isidore ve Back (2002) tarafından sunulan çok simülasyonlu analiz tekniği (the multiple simulation analysis technique) ile maliyet aralığı tahminleri ve stokastik iş programı oluşturma sonuçları Monte Carlo simülasyonu kullanılarak birleştirilmektedir. Aynı zamanda geliştirilen yöntemde, bolluk kaybı etkisini projenin süresi ve maliyeti ile doğrudan ilişkilendiren bir polinom fonksiyonuna dönüştürmek için en küçük kareler doğrusal olmayan (nonlinear) regresyon kullanılmıştır.

Lu ve diğ. (2008) tarafından yürütülen çalışmada, basitleştirilmiş Simülasyon Tabanlı İş Programı Oluşturma Sistemi (S3) adı verilen bir model geliştirilmiştir. Kaynaklarının kısıtlı olduğu koşullarda, kritik yol yönteminde geriye geçiş hesaplama sürecinin başarısız olabileceği ve bunun sonucunda toplam bollukta potansiyel hataların oluşabileceği belirtilerek yeni bir toplam bolluk hesaplama algoritması önerilmiştir. Söz konusu sistem ile basitleştirilmiş ayrık olay simülasyon

yaklaşımından (simplified discrete event simulation approach) ve parçacık küme iyileştiricisi (particle swarm optimizer) adı verilen optimizasyon tekniğinden faydalanarak, kısıtlı kaynaklar altında en uygun iş programını otomatik olarak oluşturan bir çözüm sunulması amaçlanmıştır. Georgy (2008) ise doğrusal projelerde kaynak dengeleme sürecini genetik algoritma kullanarak otomatikleştiren bir sistem geliştirmiştir. Söz konusu sistem, kaynak kullanımındaki dalgalanmaları veya ortalama kaynak kullanımından sapmayı en aza indirerek kaynakların dengelenmesini amaçlamaktadır. Sistem, grafik gösterimlerinde ve matematiksel modellemede esneklik sağlamak amacıyla AutoCAD™ altında AutoLISP programlama kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde proje verilerinin girişi, GA optimizasyonu ve optimize doğrusal zamanlamayı üretmek için çizim yeteneği gibi diğer işlevleri kontrol eden etkileşimli bir kullanıcı ara yüz oluşturulmuştur. Bununla birlikte altı modül içermektedir: (1) veri giriş modülü, (2) iş programı oluşturma modülü, (3) GA optimizasyon sağlayıcı, (4) değerlendirme modülü, (5) kaynak tahsisi modülü, ve (6) çizim modülü. Aynı zamanda çalışma kapsamında, kaynak dengeleme sürecinde iki farklı kriter için amaç fonksiyonları dikkate alınmıştır: (1) projenin toplam kaynak kullanımında günlük, haftalık veya aylık dalgalanmaları en aza indirmek, ve (2) projenin ortalama toplam kaynak kullanımında mutlak sapmayı en aza indirmek. Sonuç olarak, genetik algoritma kullanılarak kaynak dengeleme problemi için kullanılan matematiksel çözümlere katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Bir başka çalışmada, Jun ve El-Rayes (2009), inşaat projelerinde kaynak planlaması ve dengelemesi için çoklu hedef optimizasyonunu ele almayı amaçlamışlardır. Mevcut teknikler ve modellerin kaynak tahsisini ve dengelemesini iki ayrı problem olarak ele almasına karşın, bu çalışmada kaynak tahsisini ve dengelemesini aynı anda uygulayan bir model sunulmuştur. Serbest Bırakma ve Yeniden Alım (Release and Re-Hire) ve Kaynak Atıl Günleri (Resource Idle Days) gibi yeni kaynak dengeleme metriklerini kullanarak, kaynak dalgalanmalarının inşaat üretkenliği ve maliyeti üzerindeki olumsuz etkilerini ölçmek ve minimize etmek için bir çoklu hedef optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu model sayesinde kaynak kullanımı verimliliği ile proje süresi arasında optimal dengeyi sağlamak amaçlanmıştır.

Anagnostopoulos ve Koulinas (2010), daha iyi dengelenmiş bir kaynak histogramı oluşturmak için hiper-sezgisel (hyperheuristic) bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem kısıtlı kaynaklar altında ve Microsoft Project programına bağlı

olarak kullanılmaktadır. Söz konusu yöntem, kaynakların aşırı kullanımını engellemektedir. Bu temel doğrultusunda iş programı için kaynak dengeleme süreci yürütülmektedir. Geliştirilen hiper-sezgisel yöntemin, geçmiş yıllardaki kaynak dengeleme alanındaki çalışmalarda geliştirilen meta-sezgisel yöntemlere katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Doulabi ve diğ. (2011), büyük ölçekli projelerde birden fazla kaynağı içeren çoklu kaynak dengeleme problemiyle başa çıkabilmek için aktivitelerin bölünmesine izin veren bir genetik algoritma modeli geliştirmişlerdir. Kaynak dalgalanmalarının ölçülmesi için “günlük kaynak gereksinimlerinin ortalama günlük kaynak gereksinimlerinden mutlak sapmalarının toplamı” olarak ifade edilen amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Modelin performansını değerlendirmek için, 5.000'e kadar aktivite ve birden fazla kaynak içeren bir iş programı kullanılmıştır. Küçük örneklerde karşılaştırma yapmak amacıyla mevcut bir karma tam sayılı programlama modeli (Son & Mattila, 2004) genişletilmiş ve çözülmüştür. Önerilen model ile çok kaynaklı projelerde en uygun iş programının kısa sürede verimli bir şekilde oluşturulması hedeflenmiştir. Heon ve El-Rayes (2011) ise çalışmasında, kaynak kullanımını maksimize etmeyi ve proje süresini minimize etmeyi hedefleyen çok amaçlı optimizasyon modelini geliştirmişlerdir. Çalışmada üç modül bulunmaktadır: (1) karar değişkenleri için alt ve üst sınırları hesaplayan bir başlangıç modülü, (2) iş programları oluşturan ve performanslarını değerlendiren bir iş programı oluşturma modülü, ve (3) en uygun iş programlarını tanımlayan çok amaçlı bir genetik algoritma modülü. Sunulan modüller ve beraberinde önerilen yöntem, çoklu hedef optimizasyonunu gerçekleştirmeyi ve çözümleri geliştirmeyi amaçlayarak, en uygun kriterlerin devamını sağlamak için Pareto kavramını benimsemektedir. Ayrıca, kullanıcıların kolaylıkla kullanabilmesi için ticari bir yazılım sistemi içerisine entegre edilmiştir. Öte yandan doğrusal olmayan kaynak dengeleme problemini çözmek için meta-sezgisel yaklaşımı kullanılarak yürütülen çalışmalar üzerine Geng ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, proje topoloji ağının özelliklerini analiz ederek, doğrusal olmayan kaynak dengeleme problemini çözmek için Yönlendirilmiş Karınca Kolonisi Optimizasyonu (DACO) algoritmasını kullanmaktadırlar. Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritması, gerçek bir karınca kolonisinden esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır. İnşaat yönetiminde ACO, bir projenin en etkili yolu olan optimal bir proje planı oluşturmak için kullanılabilir. Projenin farklı süreçleri ve kaynakları

arasındaki ilişkileri ve bağımlılıkları göz önünde bulundurarak, ACO algoritması farklı yol seçeneklerini değerlendirip ve en iyi çözümü bulmayı amaçlamaktadır. DACO yaklaşımı, umut verici bir yol keşfetmek için bir karınca kolonisini kullanmaktadır. Söz konusu koloni, bir yönde düğümden düğüme ilerlerken kritik aktivite noktalarında yasak listeler oluşturmaktadır. Karınca sayısı, proje topoloji ağının karmaşıklığı ve iterasyon sayısı ile doğrudan ilişkilidir ve bolluk süresi ile kritik olmayan aktivitelerin sayısına bağlı olarak belirlenir. DACO algoritması sayesinde iş programı oluşturmak için yakınsama oranının ve çözüm kalitesinin veriminin artırılması hedeflenmiştir.

Alsayegh ve Hariga (2012) tarafından sunulan çalışmada çoklu kaynak dengeleme problemindeki kaynak kullanımından doğan toplam maliyeti ve kritik olmayan aktivitelerin kaydırılması sonucunda oluşan maliyetleri minimumda tutmak hedeflenmiştir. Bu amaçla parçacık küme iyileştiricisi (PSO) ve simüle edilme (SA) prosedürleri entegre edilerek en uygun iş programını elde etmek için meta-sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Farklı mekanizmalara ait 6 adet hibrit PSO/SA prosedürü geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemlerin zaman-maliyet dengesi açısından performansları incelenmiştir. Geliştirilen yöntemler sayesinde, büyük ölçekli projelerde en uygun iş programının hazırlanması ve zaman-maliyet dengesinin sağlanması hedeflenmiştir.

Iranagh ve Sonmez (2012) kaynak yönetimi alanında kullanılan mevcut ticari yazılımların kaynak dengeleme problemini çözümü için yetersiz olduğunu belirterek, çözüm sürecine katkıda bulunmak amacıyla bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirilen genetik algoritmanın hesaplama prosedürü için 3 adım izlenmiştir: (1) Kritik yol yöntemi ile iş programı oluşturulması, (2) Başlangıç popülasyonunun oluşturulması, ve (3) Genetik operatörlerin (Genetic Operators) uygulanması. Kaynak ihtiyacındaki dalgalanmayı ölçmek için Microsoft Project'in de kullandığı kaynak ihtiyacı ile ortalama kaynak tüketimi arasındaki mutlak sapma metriği kullanılmıştır. Söz konusu genetik algoritmanın performansı, Microsoft Project'in kaynak dengeleme performansı ile karşılaştırılmıştır. Algoritmanın performansı doğrusal tam sayılı programlama tekniği (linear-integer programming technique) kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak geliştirilen genetik algoritmanın Microsoft Project programına karşı daha verimli sonuçlar sunduğu belirtilmiştir.

Bazı çalışmalar ise denge diyagramı (line of balance - LOB) yöntemi ile oluşturulan iş programları için genetik algoritma tabanlı modeller geliştirmişlerdir. LOB, inşaat projelerinde zaman ve kaynakların etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayan bir iş programı oluşturma tekniğidir. Bu teknik, özellikle tekrar eden işlerin (örneğin, bir binada kat kat inşaatı gibi) ve sıralı işlerin (örneğin, bir yolun belirli bir sıra izleyerek inşaatı gibi) planlanması ve takibi için kullanılır. LOB, işlerin sırasını ve sürelerini grafiksel olarak gösteren bir yöntemdir ve kaynakları optimize etmekle birlikte zamanı en iyi şekilde kullanmaya yardımcı olur. Damcı ve diğ. (2013a), LOB ile oluşturulan iş programları için genetik algoritma esaslı kaynak dengeleme modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu model sayesinde projenin tamamlanma süresini değiştirmeden kaynak dalgalanmalarını en aza indirmek hedeflenmiştir. Çalışmada, literatürdeki farklı doğrusal iş programı oluşturma modelleriyle kaynak dengeleme işlemi gerçekleştirildiğinde verimlilik düşüşleri yaşanabileceği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, LOB ile iş programı oluşturma süreci boyunca verimlilik üzerinde olumsuz bir etkisi olmayan genetik algoritma tabanlı bir kaynak dengeleme modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen model, "doğal ritim" prensibine dayanmaktadır. Bu ilkeye göre, bir aktiviteyi en verimli şekilde tamamlayabilmek için ekip büyüklüğünün optimal seviyede olması gerekmektedir. Aktivitenin başlangıç zamanını değiştirirken, aktiviteler arasındaki öncelik ilişkilerini ihlal etmeden ekibin optimum büyüklüğünü ayarlamak bu prensibin temelini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, LOB hesaplamalarını gerçekleştirmek için MS Excel tabanlı bir modül ve kaynak dengelemeyi gerçekleştirmek için genetik algoritma tabanlı bir modül geliştirilmiştir. Söz konusu modüller birbirleri ile entegre hale getirilmiştir. Önerilen model, bir boru hattı projesinde uygulanarak gösterilmiştir. Toplam proje süresini değiştirmeden proje boyunca kaynak dengelemesi yapmak için bir amaç fonksiyonu (günlük kaynak kullanımının ortalama kaynak kullanımından mutlak sapmalarının toplamı) ve bir dizi kısıt kullanılmıştır. Damcı ve diğ. (2013b) diğer yürüttükleri çalışmada ise denge diyagramı yöntemiyle oluşturulan iş programlarında çoklu kaynak dengeleme alanına katkıda bulunmak için genetik algoritma tabanlı çoklu kaynak dengeleme modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde, bir aktivitenin üretim hızının ve süresinin, bir birimi tamamlamak için gereken en uzun süreye sahip kaynak tarafından belirlendiği savunulmaktadır. Ayrıca geliştirilen modelin kaynak dengeleme süreci, “en uygun ekip büyüklüğü” ve “doğal ritim” prensiplerine göre gerçekleştirilmiştir. Söz konusu genetik algoritma tabanlı çoklu kaynak dengeleme modelinin geliştirilmesi için MS

Excel ve MS Excel için bir eklenti olan Evolutionary Solver kullanılmıştır. Kaynak dengeleme modelinin geliştirilmesinde dört adım izlenmiştir: (1) değişkenleri temsil eden MS Excel hücrelerinin tanımlanması, (2) amaç fonksiyonunun tanımlanması, (3) kısıtlamaların tanımlanması, ve (4) genetik algoritma operatörlerinin değerlerinin belirlenmesi. Ayrıca bu çalışmanın kaynak dengeleme sürecinde, “günlük kaynak gereksinimleri ile ortalama kaynak gereksiniminin mutlak sapmalarının toplamının en aza indirgenmesi” üzerine olan amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Geliştirilen model, bir boru hattı projesi üzerinde uygulanarak performansı değerlendirilmiştir.

Diğer yandan, Ponz-Tienda ve diğ. (2013), projelerde kullanılan kaynakların sınırlı olmasından dolayı oluşabilecek kaynak kıtlığına ve proje tamamlanma süresinin uzamasına çözüm olarak Uygulanabilir Genetik Algoritma tekniğini geliştirmişlerdir. Çalışmada, kaynak dengeleme problemi için farklı çözüm prosedürleri sunulmuştur. Ayrıca, birden fazla kaynağın olduğu durumlar ele alınmıştır ve uygulanabilir genetik algoritma ile projenin tamamlanma süresini uzatmadan kaynak kullanımı optimize edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda, söz konusu yöntem ile Weibull dağılımından faydalanılarak, projenin süresinin uzaması durumunda cezalandırma sistemi getirilmiştir ve projenin tamamlanma süresinin gecikme olasılığı azaltılmıştır. Yöntem, MS Excel 2010 – VBA ile geliştirilerek bir karar destek sistemi olarak sunulmuştur. Çalışmada, projelerin karmaşıklığı ve kısıtlı kaynaklar dikkate alınarak daha verimli ve esnek çözümler sunmak hedeflenmiştir.

Kyriklidis ve diğ. (2014) kaynak dengeleme probleminin çözümüne odaklanmışlardır. Yürüttükleri çalışma, kaynak dengeleme probleminin çözümü için doğadan esinlenen akıllı metodolojilerin ve bu metodolojilerin birbirleri ile entegre çalıştırılmasının avantajlarını sunmayı amaçlamıştır. Çalışmada 3 farklı algoritma yaklaşımı uygulanmış ve karşılaştırılmıştır: (1) evrimsel hesaplama üzerine kurulu genetik algoritmalar, (2) doğadan esinlenen standart bir yaklaşım, ve (3) ilk iki yaklaşımın birleştirilmesi sonucu oluşan hibrit bir yaklaşım. Genetik algoritma ve karınca kolonisi optimizasyon algoritması yöntemleri, projelerde kaynakların dengelenmesi üzerine geliştirilmiştir. Ayrıca, bu iki yöntemin özelliklerini birleştiren hibrit bir yaklaşım sunulmuştur. Hibrit yaklaşımda, karınca kolonisi optimizasyon yönteminin genetik algoritmanın başlangıç popülasyonu kalitesini artırması ve bunun sonucunda algoritmanın daha iyi bir çözüm sunması hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucu olarak hibrit yaklaşımın verimli bir performans gösterdiği belirtilmiştir.

Damcı ve Polat (2014) yaptıkları çalışmada, kaynak dengeleme alanında kullanılan farklı amaç fonksiyonlarının kaynak ihtiyacı histogramları üzerindeki etkilerini araştırmak için genetik algoritma tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Model, çelik iskeletli bir endüstriyel bina inşaatı projesinden elde edilen gerçek veriler kullanılarak geliştirilmiştir. Kaynak dengeleme sonucunda elde edilen iyileşmeyi ölçmek için her bir parametredeki iyileştirme yüzdeleri ve ayrıca her bir amaç fonksiyonunun ortalama iyileştirme yüzdesi hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda her bir amaç fonksiyonunun farklı kaynak ihtiyacı histogramları ürettiği ve ortalama iyileştirme yüzdelерinin farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Benjaoran ve diğ. (2015) ise farklı bir konuyu irdelemişlerdir. Geleneksel kaynak dengeleme çözümlerinin aktiviteler arası önceden tanımlanmış ilişkiler ile kısıtlandığını belirtmişlerdir. Söz konusu ilişkilere karşın bitiş-başlangıç, başlangıç-başlangıç ve bitiş-bitiş gibi alternatif ilişkiler sunularak daha esnek ve etkin bir kaynak dengeleme süreci oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bu hedef doğrultusunda, aktiviteler arasında alternatif ilişki türlerinin kullanılmasına imkan tanıyan, matematiksel denklemlerle ifade edilen, MS Excel ve VBA kodu ile uygulanan genetik algoritma tabanlı bir model geliştirilmiştir.

Damcı ve diğ. (2016), Damcı ve Polat (2014) tarafından yürütölen çalışmaya ilave olarak denge diyagramı yöntemi kullanarak hazırlanan iş programlarında kaynakların dengelenmesi için farklı amaç fonksiyonlarının kullanımının etkilerini incelemişlerdir. Denge diyagramı ile hazırlanan iş programlarında kaynak dengelemek amacıyla genetik algoritma tabanlı bir model geliştirilmiştir. Söz konusu modelin temeli, "en uygun ekip büyüklüğü" ve "doğal ritim" ilkelerine dayanmaktadır. Bu ilkeler doğrultusunda, bir aktivitenin en erken başlama zamanını değiştirmek için, istihdam edilen ekip sayısını ayarlamak gerektiğı belirtilmiştir. Toplam proje süresi ve aktiviteler arasındaki öncöl-ardıl ilişkileri aynı kalırken, farklı amaç fonksiyonları kullanılarak denge diyagramı ile hazırlanan iş programları oluşturulmuştur. Oluşturulan iş programlarına ait kaynak histogramları karşılaştırılarak farklı amaç fonksiyonlarının söz konusu iş programları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yan ve diğ. (2016) proje süresinin belirli bir aralıkta değiştirilebileceğı varsayımını yaparak kısıtlı kaynak kullanımı altında kaynak dalgalanmaları ile proje maliyeti arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışma kapsamında çoklu kaynak dengeleme problemi için bir maliyet optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Söz konusu modelde 5 çeşit maliyet dikkate alınmıştır: (1) kaynak talebi kaynak miktarından büyük

olduğunda ek kiralama maliyeti, (2) mevcut kaynak miktarı kaynak talebinden büyük olduğunda mevcut kaynaklar için boşta kalma maliyeti, (3) süre ile ilişkili dolaylı maliyet, (4) proje süresinin uzatılması durumunda tazminat cezaları, ve (5) proje süresinin azaltılması durumunda teşvik ücreti. Mevcut kaynak miktarı kaynak talebinden az olduğunda, projenin planlanan zaman içerisinde tamamlanmasının sağlanması için harici piyasadan ek kaynaklar kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bunun yanında, mevcut kaynak miktarı, kaynak talebinden fazla olduğu durumlara çözüm için üç strateji önerilmiştir: (1) istihdamı sürdürme, (2) kısmi işten çıkarma, ve (3) işten çıkarma. Eğer istihdamı sürdürme stratejisi seçilirse, kaynaklar için boşta kalma maliyetinin ödenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, söz konusu model, süre uzatılmasından kaynaklanan dolaylı maliyetleri ve tazminat cezalarını dikkate almıştır. Bunlara karşın süre azaltıldığında teşvik ücreti de dikkate alınmıştır. Geliştirilen modelin sonucunda tüm bu maliyetlerin toplamının en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Zhang ve diğ. (2017), denge diyagramı üzerindeki özel bir aktivite ile birlikte bir kaynak dengeleme algoritması geliştirmişlerdir. Bu özel aktivitenin süresi uzatıldığında hem geriye doğru tahsis edilen kaynak miktarının hem de proje süresinin azalabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, söz konusu özel aktivitenin mevcut olmadığı ana kadar veya özel aktivitenin ekip sayısını azaltılamayacak duruma gelmesine kadar süreci işleten bir kaynak dengeleme algoritması sunulmuştur. Algoritmanın tasarımı MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen modelde "en uygun ekip büyüklüğü" ve "doğal ritim" prensipleri uygulanmıştır. Söz konusu model ile tüm aktivitelerin verimliliğini tutarlı hale getirmek hedeflenmiştir.

Tang ve diğ. (2018), denge diyagramı tekniği kullanarak inşaat projelerinde kaynak dengeleme problemini çözmek için LOBRLM (LOB tabanlı Kaynak Dengeleme Modeli) adlı bir model geliştirmişlerdir. LOBRLM, LOB ve koşul tatmin problemleri (CSP) tekniklerini kullanan, kaynak dengeleme problemini çözerek uygun iş programı oluşturan bir optimizasyon modelidir. Söz konusu model, geleneksel modellerin sunduğu avantajları korurken sabit bir iş programı belirtmeden, daha kapsamlı optimizasyon parametreleri ve mantıksal kısıtların eklenebilmesi gibi yeni imkânlar ile birlikte iş programı oluşturma optimizasyonu sunmaktadır. LOBRLM, önceki LOB tabanlı modellerin avantajlarını ve dezavantajlarını dikkate alarak esneklik, pratiklik ve optimizasyon yeteneği açısından geliştirilmiştir. Ayrıca, LOBRLM'yi desteklemek

için bir iş programı oluşturma sistemi olan LOBSS (LOB tabanlı iş programı oluşturma sistemi) geliştirilmiştir. Sonuç olarak çalışmada, doğrusal projelerdeki kaynak dengeleme problemi ele alınırken LOB ve CSP tekniklerini birleştiren bir yaklaşım sayesinde daha etkili ve optimize edilmiş bir iş programı oluşturma sistemi sunmak hedeflenmiştir.

Atan ve Eren (2018) yaptıkları çalışmada, genellikle, daha iyi kaynak dağılımlarına sahip iş programlarının, proje süresi sabit kalacak şekilde aktivitelerin erken başlama zamanlarının toplam bolluk miktarları sınırları içinde ötelenmesiyle elde edildiğini, fakat, proje süresinin uzatılmasının aktiviteler için daha fazla toplam bolluk sağlayabileceği ve böylelikle kaynak dengelemesinin daha iyi olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu doğrultuda çalışma, kaynaklar açısından iyi derecede dengelenmiş iş programı için minimal proje süresinin ne olması gerektiğini araştırmaktadır. Bu amaçla kaynak dengeleme formülasyonları için karışık tam sayılı modeller sunulmuştur. “Serbest Bırakma ve Yeniden Alım” metriği gibi birkaç dengeleme metriği ile bu modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, büyük iş programı ağlarında bu problemin kesin çözümlerinin makul bir zamanda elde edilemeyeceği için “Serbest Bırakma ve Yeniden Alım” metriği ile kullanılan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. El-Sayegh (2018) ise toplam bolluk kavramıyla ilgili farklı bir noktaya değinmiştir. Yürüttüğü çalışmasında, kaynak dengelemesi yapılırken azalan bolluk miktarının projeye olumsuz etkilerinin olduğunu ve projenin başarıyla tamamlanma olasılığını azalttığını vurgulamıştır. Bu problemi çözebilmek için “Doğrusal Olmayan Tam Sayı Programlama (Non-Linear Integer Programming)” modeli geliştirmiştir. Kaynak dengeleme süreci sonucunda bolluk miktarının azalmasından doğan maliyet için çözüm önermiştir. Geliştirilen modelin amacı kaynak dengeleme sürecinde oluşan toplam maliyeti minimumda tutmaktır. Geliştirilen modelin kaynak dengeleme ve program esnekliği arasında başarılı dengeler kurması hedeflenmiştir. Bunlara ilave olarak, Qiao ve Li (2018) yaptıkları çalışmada kaynak dengeleme probleminin çözümü için yeni amaç fonksiyonları tanımlamışlardır. Söz konusu çalışmada, proje süresini kısaltmak ve daha etkili amaç fonksiyonları bulmak için normalleştirilmiş entropi (normalized entropy) ve göreceli entropi (relative entropy) gibi yöntemler önerilmiştir. Çalışma kapsamında 6 adet amaç fonksiyonu sunulmuştur ve söz konusu amaç fonksiyonları 2 kategoriye ayrılmıştır: (1) matematiksel istatistiklere dayananlar, ve (2) entropi teorisine dayananlar. Normalleştirilmiş entropi proje süresini azaltmayı

hedeflemektedir. Göreceli entropi optimizasyon hesaplaması sırasında daha hassastır ve çapraz entropi modelini (cross-entropy model) de kapsamaktadır. Ayrıca ayrık parçacık küme optimizasyonu (DPSO) ile önerilen normalleştirilmiş entropi ve bağıl entropinin diğer amaç fonksiyonları ile performansı incelenmiştir.

Selvam ve Tadepalli (2019), genetik algoritmayı meta-sezgisel bir yöntem olarak kullanmayı amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında, “değiştirilmiş iş programı oluşturma kritik yol yöntemi (modified critical path scheduling method)”, inşaat projelerinden elde edilen gerçek veriler doğrultusunda aktivitelerin kritikliğinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Genetik algoritma ise kaynak profilini dengelemek için hangi aktivitelerin proje süresini etkilemeden kaç gün boyunca kaydırılacağını belirlemektedir. Önerilen metodoloji ile başlangıçtan başlangıca ilişkisine dayalı olarak gecikme esnekliği olan aktiviteler için daha iyi bir çözüm sunmak hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kaynak dengeleme problemini etkili bir şekilde çözmek amacıyla geliştirilen yöntemin, mevcut ticari yazılımlardan daha iyi sonuçlar sunduğu kanısına varılmıştır.

Bir başka çalışmada, Ammar (2020), tekrar eden aktiviteler içeren projeler için hem kaynak dengeleme, hem de kaynak tahsisi problemlerini çözmek için denge diyagramı tekniği temelinde bir model geliştirmişlerdir. Söz konusu model için kaynak dengeleme ve kaynak tahsisi problemleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve problem kısıtlamaları dikkate alınarak formüle edilmiştir. Geliştirilen model ile planlama mühendislerine tekrar eden aktiviteler içeren projelerde kaynak yönetimi problemleri için en uygun çözümleri sunmak hedeflenmiştir. Wang ve diğ. (2020) ise toplam bolluk haricinde doğrusal iş programı oluşturma yöntemi bağlamında, farklı bir bolluk kavramı tanıtarak, doğrusal kaynak dengelemesinin optimize edilmesine yardımcı olacak iki aşamalı bir optimizasyon süreci önermişlerdir. Çalışma kapsamında, tamsayı doğrusal olmayan (nonlinear) özelliği temelinde, model için kısıt işleme mekanizması ve parçacık arama aralığı kısıtlaması olan bir kuantum parçacık küme iyileştiricisi algoritması geliştirilmiştir. Söz konusu model ile kaynak kullanımını, kaynak miktarını ve iş programı kilometre taşlarını dikkate alarak, aktivitelerin mekân-zaman esnekliğini en üst düzeye çıkarmak hedeflenmiştir.

Diğer yandan, Gwak ve Lee (2021) mevcut kaynak dengeleme yaklaşımlarının, toplam bolluk tüketimi ile proje tamamlanma olasılığı arasındaki dengeyi yeterince analiz edemediklerini belirtmişlerdir. Söz konusu duruma katkıda bulunmak amacıyla

yaptıkları çalışmada, toplam bolluk tüketimini minimize etmek ve proje tamamlanma olasılığını maksimize etmek için “Stokastik Kaynak Dengeleme Optimizasyonu (Stochastic Resource Leveling Optimization)” adındaki modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu model, kritik olmayan aktiviteleri uygun zamanlarda başlatarak en erken başlama zamanlarını ve iş programının kaynak dalgalanma seviyesini ölçerek, projenin hedeflenen son tarihte tamamlanma olasılığını hesaplamaktadır. Genetik algoritma tekniği ile optimum çözümleri (yani kritik olmayan aktivitelerin optimum en erken başlama zamanlarını) belirlemektedir. Bu sayede, planlama mühendislerine daha uygun bir kaynak dengeleme çözümü sunmak amaçlanmıştır. Alagha ve diğ. (2021) ise yaptıkları çalışmada, kaynak ihtiyacı miktarını azaltırken proje süresini koruyan, inşaat projeleri için tek hedefli optimizasyon modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen metodolojiyi basitleştirmek için MS Excel'de "GANetXL" optimizasyon aracını kullanarak denge diyagramı tekniğine dayanan bir bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Söz konusu model, en uygun iş programını, her aktivitenin en uygun başlama zamanını ve en uygun inşaat ekibi sayısını belirlemektedir.

Waligóra (2022) geçmişte yapılan kaynak yönetimindeki bazı çalışmalar gibi kaynak dengeleme problemini kısıtlı kaynaklar altında ele almıştır. Çalışmada, bir projedeki aktiviteler için tüm öncelik ve kaynak kısıtlamalarını karşılayacak şekilde planlama yapılmasını ve kaynak kullanımındaki dalgalanmaları açıklayan belirli bir amaç fonksiyonu değerinin en aza indirilmesini hedeflemiştir. Bu hedef doğrultusunda aktivitelerin bölünemez olduğu ve kaynakların yenilenebilir olduğu bir ortamda çeşitli amaç fonksiyonları analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, ele alınan problemin çözümü için bir genetik algoritma önerilmiştir. Söz konusu algoritmanın performansı basit sezgisel yaklaşımların yardımı ile bir dizi standart örnek üzerinde yapılan deneylerle incelenerek ölçülmüştür.

Damcı ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, kaynak dengeleme için seçilen aktiviteler arasında ayırım yapabilen verimli bir modele ihtiyaç olduğuna değinmişlerdir. Bu doğrultuda, kaynak dengelemesinde aktivitelerin bolluk tüketim oranlarını dikkate alan bir model sunulmuştur. Bolluk tüketim oranı, aktivite başlama zamanının kaydırılmasında tüketilebilecek maksimum bolluk miktarını belirlemek için ayarlanan bir oran olarak ifade edilmiştir. Planlama mühendisinin modele bolluk tüketim oranlarını atamasından sonra, önerilen model, kritik olmayan aktiviteleri toplam bolluk miktarlarını aşmayacak şekilde kaydırırken ihtiyaç duyulan günlük kaynak

miktarlarını otomatik olarak değiştirmektedir. Önerilen model ile birlikte iş programındaki ciddi gecikmelerin ve maliyet aşımı olasılığının en aza indirgenmesi hedeflenmiştir.

Tüm bunlarla birlikte, kaynak dengeleme için yıllar boyunca geliştirilen yöntemler arasında minimum moment yöntemi de yer almaktadır. Minimum moment yöntemi, Harris (1978) tarafından ortaya atılan, bir projenin orijinal kaynak histogramını dikdörtgen şekline dönüştürmek amacıyla geliştirilen bir yöntemdir. Minimum moment yöntemi, aktivitelerin belirli günlere atanmasında ve nihai kaynak histogramının adım adım oluşturularak bir dikdörtgene yaklaşmasında kullanılan "PACK Yöntemi" (Harris; 1990) için de temel oluşturmuştur. Harris (1990) yaptığı çalışmada bir kaynak dengeleme yöntemi sunmakta olup, amacı proje aktivitelerini planlamak ve proje süresinin belirli bir sınırı aşmamasını sağlamaktır. Geliştirilen yöntem, yalnızca kritik aktiviteler ve toplam bolluk miktarları eşit veya daha az olan aktivitelerin temel kaynak histogramını belirlemek için kullanılan sezgisel bir yöntemi içermektedir. Her kritik olmayan aktivite, doğrudan zaman içinde konumlandırılır ve kaynak ihtiyaçları temel histogramlara eklenir. Sonuç olarak, elde edilen histogramın, proje süresi boyunca bir kaynağın minimum günlük talebini temsil ettiği ve minimum moment sezgisel optimizasyon modellerinden elde edilen plana çok yaklaştığı veya eşit olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada ise başlangıçta tek tip kaynak dengeleme için geliştirilen yöntem, Martinez ve Ioannou (1992) tarafından bilgisayar ortamına uyarlanmıştır.

Daha sonra Hiyassat (2000, 2001), bu yöntemi çoklu kaynak dengelemesini hesaba katacak şekilde geliştirmiştir. Hiyassat (2000), Harris (1978) tarafından kaynak dengelemesi için kullanılan minimum moment yaklaşımında bir değişiklik önermiştir. Harris tarafından sunulan öneri, geleneksel yaklaşımların temelini oluşturan, kaynakların sınırsız kullanılabilir olduğu ve proje süresinin sabit olduğu varsayımlarını ele almaktadır. Hiyassat (2000), söz konusu çalışmada ise önerdiği yöntemin, aktivitelerin erken başlama zamanlarını kaydırırken daha iyi bir seçim kriteri kullanarak geleneksel yöntemlerden ayrıldığını ifade etmiştir. Bu fark, aktivitelerin erken başlama zamanlarını kaydırmadan önce ve sonra kaynak histogramının statik momentindeki değişikliklerle değerlendirilmiştir. Önerilen yaklaşımda, aktivitelerin erken başlama zamanlarının kaydırılması sırasında, aynı sıra adımında ilk seçilecek olan aktivite, hem serbest bolluğun hem de kaynak oranının

değerine dayalı olarak belirlenmiştir. Bu yol ile iyileştirme faktörü hesaplarırken bir aktivitenin erken başlama zamanının ne ölçüde kaydırılacağını belirlemek için gereken adımlar azaltılmıştır. Bununla birlikte, Hiyassat (2001), tek tip kaynak dengelemeli iş programlarında kullanılan minimum moment yaklaşımının, çok kaynaklı iş programları için nasıl geliştirilebileceğini araştırmıştır. Çalışmada özellikle, geliştirilmiş minimum moment yaklaşımıyla birden fazla kaynağı dengelemek için bir prosedür geliştirilmiştir. Söz konusu sezgisel prosedürün, birden fazla kaynağın dengelenmesi için iki ana yöntem olan seri ve birleşik kaynak dengelemesi için uygulanabilirliği gösterilmiştir. Geliştirilen prosedür, geleneksel minimum moment yaklaşımının çoklu kaynak dengeleme yöntemlerinde nasıl kullanılabileceğini göstermek için karşılaştırmalı bir analize dayanmaktadır.

Bir başka çalışmada ise Christodoulou ve diğ. (2010), minimum moment yöntemini kaynak dengelemesi için tekrar ele almışlardır ve entropi maksimizasyon problemi olarak yeniden ifade etmişlerdir. Bu bağlamda, optimal kaynak tahsisinin toplam momentinin en az olduğu zaman diliminde, kaynak histogramının yatay eksenı boyunca günlük kaynak ihtiyaçlarının momentinin kaynak kullanımı için iyi bir ölçü olduğu kabul edilmiştir. Önerilen entropi maksimizasyon yöntemi, minimum moment yöntemini gözden geçirerek, kaynak dengelemesi için daha gelişmiş çözümler sağlamak amacıyla genel entropi teorisinden yararlanmıştır. Söz konusu yöntemin, aktivitenin esnekliğine olanak tanıdığı ve önceki yöntemlere kıyasla daha iyi kaynak tahsis çözümleri sunduğu belirtilmiştir.

Tawalare ve Lalwani (2012) ise Hiyassat (2000) tarafından önerilen geliştirilmiş minimum moment yaklaşımını yeniden düzenleyerek iyileştirmeler yapmıştır. İyileştirmelerin odak noktası, kaynak histogramının dengelenmesi için kaydırılması gereken aktivitenin seçim kriterlerindeki farklılıklardır. Geleneksel yöntemde, her bir kaydırma günü için, ilk olarak aktiviteyi seçmek için bir iyileştirme faktörü bulunmaktadır. Geliştirilmiş yöntemde ise, öncelikle kaynak oranı ve serbest bolluk miktarının çarpımının maksimum değeri bulunmaktadır ve ardından kaydırılması gereken aktivite için iyileştirme faktörü hesaplanmaktadır. Önerilen yöntemde, ilk olarak kaynak oranının en yüksek değerine sahip olan aktivite kaydırılmak için seçilmektedir. Ardından, Baviskar ve Bhangale (2014), Tawalare ve Lalwani (2012) tarafından sunulan “Yeniden Değiştirilmiş Minimum Moment Yönteminin” Hindistan’daki inşaat projelerindeki uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu

doğrultuda Nashik şehrinde bulunan üç adet konut projesi verileri üzerinden analizler yapılmıştır.

Kaynak dengeleme alanında yapılan araştırmalar göstermektedir ki yıllar içinde kaynak dengelemesi problemi için çeşitli modeller, algoritmalar ve teknikler geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığı zaman genetik algoritmalar kaynak dengelemesi konusunda oldukça yaygın kullanılan bir yöntem olarak gözükmektedir. İnşaat projelerinde genetik algoritmalar, proje süresini, maliyeti ve kaynak kullanımını optimize etmek için kullanılabilir. Buna ilave olarak, yıllar içinde, kaynak kullanımını optimize etmek için yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilen tekniklerin yanında, projelerin hedeflerine ve gereksinimlerine uygun olarak belirlenen ve kaynak kullanımını mümkün olduğunca dengeli hale getirmeyi amaçlayan amaç fonksiyonları geliştirilmiştir. Söz konusu amaç fonksiyonları genellikle proje hedeflerine, kısıtlarına ve önceliklerine bağlı olarak şekillenmektedir. Tüm bunların yanında, kaynak dengeleme problemi için kullanılan tekniklerde önemli parametreler bulunmaktadır. Kaynakların toplam bolluklarının, söz konusu bu parametreler arasında önemli bir yere sahip olduğu söylenebilir. Toplam bolluk miktarı bir nevi projedeki aktivitelerin ne kadar esnek olduğunu göstermektedir. Kaynak dengeleme sürecinde toplam bolluk, aktivitelerin başlama ve bitiş zamanları arasındaki esneklik derecesini etkilemektedir. Toplam bolluk miktarları dikkate alınarak kaynakların en verimli şekilde kullanılması sağlanabilmektedir. Toplam bolluk miktarlarına sahip olan aktiviteler, kaynakların esnek bir şekilde tahsis edilebileceği ve diğer aktivitelere öncelik verilebileceği anlamına gelebilmektedir. Bu durumda, kaynakların diğer kritik aktivitelere etkili bir şekilde yeniden dağıtılması mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, toplam bolluk miktarları özellikle zaman ve kaynak yönetimi açısından, aktivitelerin önceliklendirilmesi ve kaynakların verimli bir şekilde tahsis edilmesi için önemli bir etken olarak görülebilir.



3. METODOLOJİ

Araştırma metodolojisi, bu tezde kullanılan yöntemlere genel bir bakış sağlayan üç alt bölümden oluşmaktadır:

- Kritik Yol Yöntemi
- Kaynak Yönetimi Yaklaşımlarından Kaynak Dengeleme
- Kaynak Dengeleme için Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı

3.1 Kritik Yol Yöntemi

İnşaat sektöründe, büyük ölçekli projelerin yönetimi oldukça karmaşık bir süreçtir. Projelerin zamanında tamamlanmaları son derece kritik öneme sahiptir. Bu sürecin etkin bir şekilde yönetilmesi için proje yöneticileri, kritik yol yöntemi gibi analitik araçlardan yardım alırlar.

Kritik yol yöntemi, inşaat projelerinin düzenlenmesi ve belirlenen bir projenin tamamlanması için geliştirilmiş bir planlama metodolojisidir. Bu yöntemde en etkin maliyet ve zaman parametrelerini sağlamak için birbirine bağlı ve benzer aktivitelerden oluşan bir ağ kullanır. Kritik yol yöntemi, geçmiş projelerden elde edilen bilgi ve deneyime dayanarak projenin yürütülmesi sırasında çeşitli aktiviteler için gereken süreyi doğru bir şekilde tahmin etmek için de kullanılmaktadır. Çeşitli literatür araştırmaları, kritik yol yöntemi kullanımının projenin süresini optimize etme ve kaynakları etkin bir şekilde kullanma konusunda önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır (Aziz ve diğ., 2014; Cynthia, 2020).

Kritik yol yöntemi, proje aktivitelerini zaman ve öncelik ilişkilerine göre düzenlemek için sıklıkla kullanılmaktadır. Kritik yol yönteminin temel prensipleri, her bir aktivitenin başlangıç/bitiş zamanlarını ve aktiviteler arasındaki mantıksal ilişkilerini belirlemeyi içermektedir. Bu bilgiler, projenin tamamlanması için gereken minimum süreyi hesaplamak için kullanılmaktadır. Daha sonra, kritik aktivitelerin oluşturduğu bir yol belirlenmektedir. Bu yol, projenin toplam süresini belirleyen ve gecikmelere en hassas olan aktivitelerin bir dizisidir.

Kritik yol olarak adlandırılan bu yolda bulunan herhangi bir kritik aktivitedeki gecikme projenin tamamlanma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, proje yöneticileri kritik yolu tanımlayarak ve izleyerek, projenin zamanında tamamlanmasını sağlamak için stratejik kararlar alabilirler.

Kritik yol yöntemi için bir ağ diyagramı oluşturulmaktadır. Bu ağ diyagramında projeyi oluşturan aktiviteler, aktivitelerin süreleri, en erken başlama/bitiş zamanları, geç başlama/bitiş zamanları, toplam/serbest bolluk miktarları ve aktiviteler arasındaki öncüllük-ardıllık ilişkisi gösterilmektedir. Kritik yol yönteminde kullanılan kavramların genel tanımları aşağıda açıklanmıştır:

Proje: Belirli bir amaca ulaşmak için planlanmış ve organize edilmiş, sınırlı bir zaman çerçevesinde gerçekleştirilen geçici bir çaba. Proje, belirli bir sonuç veya ürün elde etmek için kaynakların kullanılmasını içerir ve genellikle önceden belirlenmiş bir başlangıç ve bitiş tarihi vardır.

Ağ Diyagramı: Bir projenin aktivitelerini ve bu aktiviteler arasındaki ilişkileri göstermek için kullanılan grafikdir.

Aktivite: Belirli bir süre boyunca tamamlanması gereken, tanımlanmış bir iş veya görev.

Aktivite Süresi (D): Bir aktivitenin tamamlanması için gerekli olan zaman miktarı. Aktivite süresi, kaynakların uygun şekilde tahsis edilmesi ve proje süresinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için kritik bir faktördür.

En Erken Başlama (ES): Bir aktivitenin en erken başlayabileceği zamanı temsil eder.

En Erken Tamamlanma (EF): Bir aktivitenin en erken tamamlanabileceği zamanı temsil eder.

En Geç Başlama (LS): Bir aktivitenin en geç başlayabileceği zamanı temsil eder.

En Geç Tamamlanma (LF): Bir aktivitenin en geç tamamlanabileceği zamanı temsil eder.

İleri Geçiş: Projenin başlangıç tarihinden itibaren aktivitelerin erken başlama ve bitiş zamanlarını hesaplama yöntemi. Bu yöntem, aktivitelerin mantıksal ilişkilerini ve sürelerini dikkate alır.

Geri Geçiş: Projenin bitiş tarihinden geriye doğru ilerlenerek aktivitelerin geç başlama ve bitiş sürelerini hesaplama yöntemi.

Toplam Bolluk (TF): Bir aktivitenin en geç tamamlanma zamanı ile en geç başlama zamanı arasındaki fark olarak tanımlanır. Söz konusu fark, aktivitenin gecikme yaşayabileceği maksimum süreyi temsil eder.

Serbest Bolluk (FF): Bir aktivitenin, kendisinden hemen sonra gelen aktivitenin en erken başlama zamanını ötelemeden başlangıç zamanını geciktirebileceği maksimum süredir.

Kaynak İhtiyacı (R): Projenin başarıyla tamamlanması için her bir aktivite için gereken insan, para, malzeme ve zaman gibi kaynakların miktarı ve türü.

Kritik Aktivite: Projenin tamamlanma süresini doğrudan etkileyen ve proje bitiş tarihini belirleyen aktivitelerdir. Bu aktivitelerde herhangi bir gecikme yaşandığında, projenin süresi de uzayacaktır.

Kritik Yol: Kritik aktivitelerin birleşiminden oluşan ve proje tamamlanma süresini belirleyen bir dizi aktivitedir. Kritik yol boyunca ilerleyen aktivitelerin herhangi bir gecikmesi, projenin toplam süresini uzatacaktır.

Proje Süresi: Projenin başlangıcından tamamlanmasına kadar geçen toplam süre. Proje süresi, kritik yol üzerindeki aktivitelerin toplam süresine dayanarak hesaplanır.

Kritik yol yönteminde aktivitelerin başlangıç ve bitiş zamanlarının hesaplanması için ileri geçiş ve geri geçiş hesaplamaları uygulanmaktadır. İleri geçiş hesaplamaları için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır:

$$EF_i = ES_i + D_i \quad (3.1)$$

Burada EF_i =öncül olan aktivitenin en erken bitiş zamanı, ES_i =öncül olan aktivitenin en erken başlama zamanı ve D_i =öncül olan aktivitenin süresi. Tez kapsamında ileri geçiş hesaplama süreci, başlangıç aktivitesinin en erken başlama zamanı “0” ($ES_0=0$) kabul edilerek ağ diyagramında yer alan bitiş aktivitesine ulaşana kadar devam etmektedir.

$$ES_j = maks(EF_i) \quad (3.2)$$

Burada ES_j =ardıl olan aktivitenin en erken başlama zamanı.

İleri geçiş hesapları bittikten sonra geri geçiş hesaplamaları başlamaktadır.

$$LF_i = \min(LS_j) \quad (3.3)$$

Burada LF_i =öncül olan aktivitenin en geç bitiş zamanı, LS_j =ardıl olan aktivitenin en geç başlama zamanı. Geri geçiş hesaplama sürecinde, bitiş aktivitesinin erken bitiş zamanı, geç bitiş zamanına eşit olarak kabul edilmektedir.

$$LS_j = LF_j - D_j \quad (3.4)$$

Burada LF_j =ardıl aktivitenin en geç bitiş zamanı ve D_j =ardıl olan aktivitenin süresi.

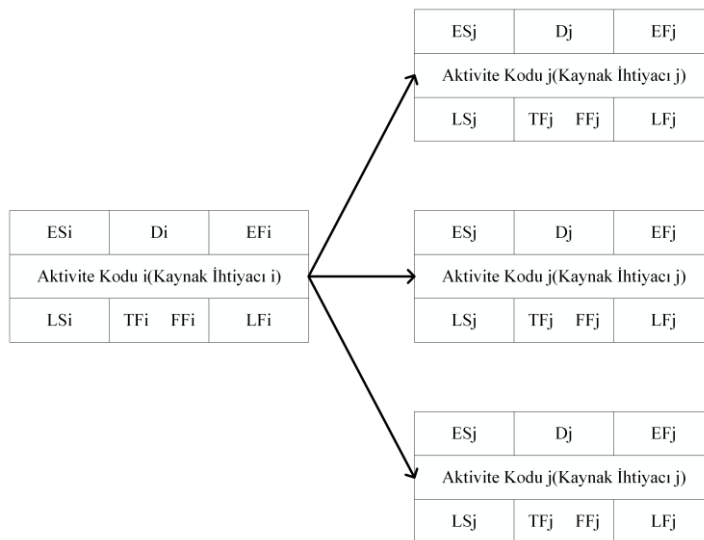
$$TF_{i,j} = LF_{i,j} - LS_{i,j} \quad (3.5)$$

Burada $TF_{i,j}$ =öncül/ardıl aktivitenin toplam bolluk miktarı.

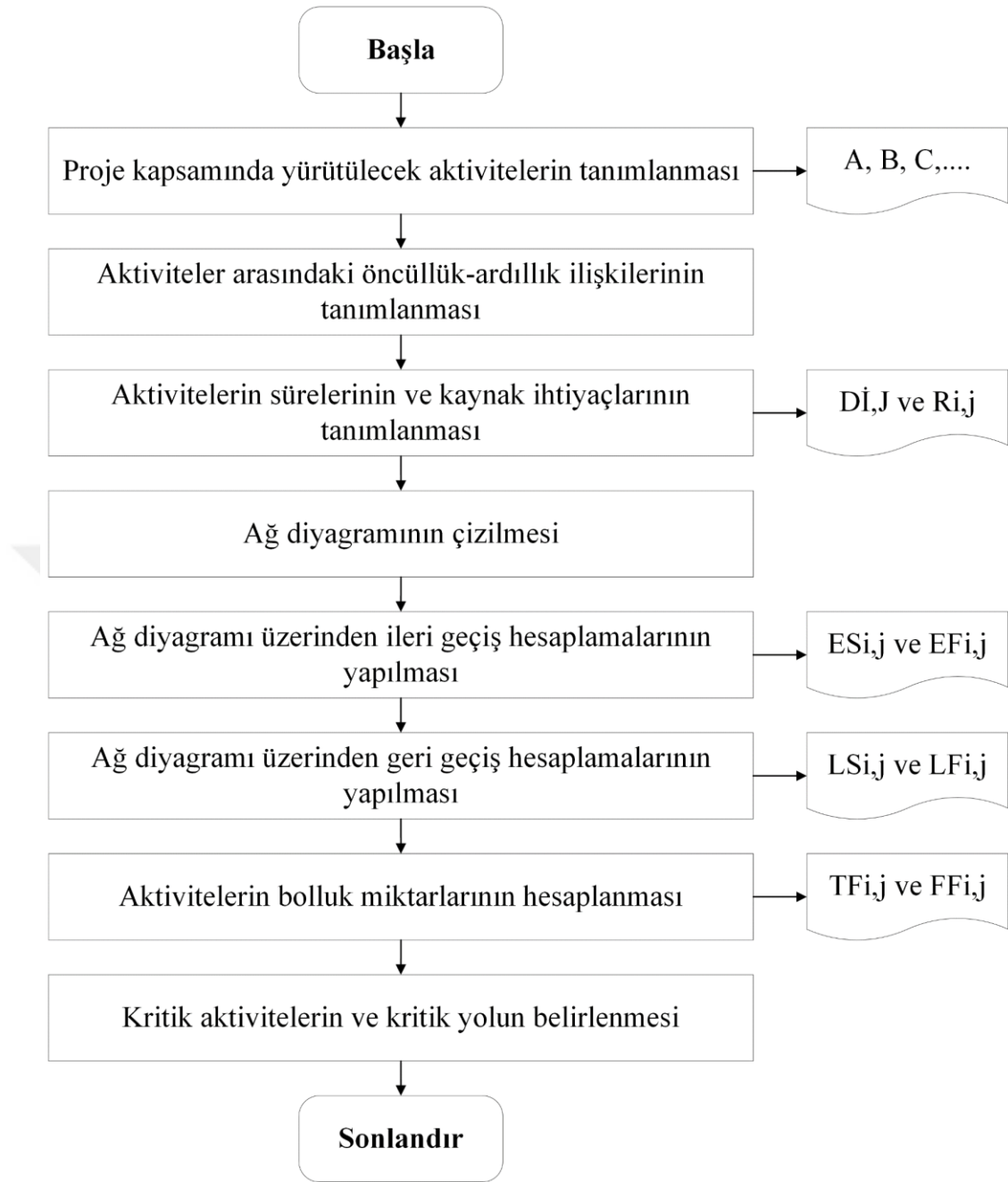
$$FF_i = \min(ES_j) - EF_i \quad (3.6)$$

Burada $FF_{i,j}$ =öncül/ardıl aktivitenin serbest bolluk miktarı.

Kritik aktivitelerin toplam bolluk ve serbest bolluk miktarları “0” olarak bulunmaktadır. Bir başka ifadeyle, toplam bolluğu ve serbest bolluğu “0” olan aktiviteler kritik aktivitelerdir. Bunlarla birlikte, bitiş aktivitesinin erken veya geç tamamlanma zamanı projenin toplam süresini ifade etmektedir. CPM ağı diyagramı örneği Şekil 3.1’de ve kritik yol yönteminde izlenilen adımlar Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 : CPM ağı diyagramı örneği.



Şekil 3.2 : Kritik yol yöntemi akış şeması.

3.2 Kaynak Yönetimi Yaklaşımlarından Kaynak Dengeleme

Bu bölümde kaynak dengeleme hakkında bilgi verilerek, tez kapsamında geliştirilen modelde uygulanan kaynak dengeleme yaklaşımı açıklanmıştır.

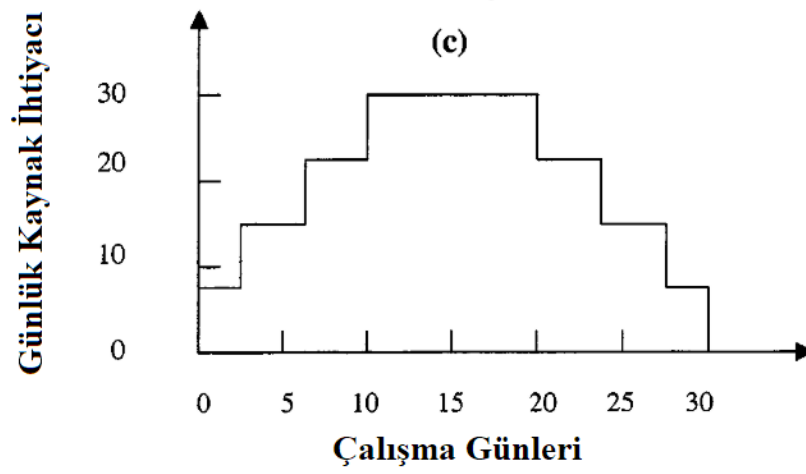
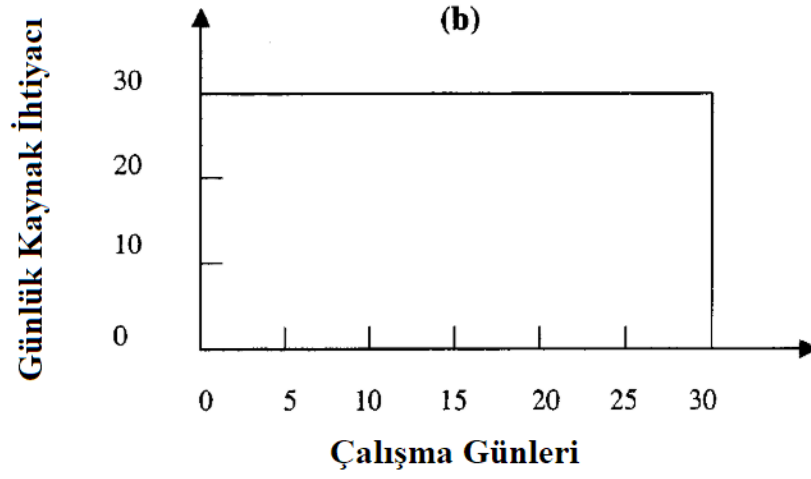
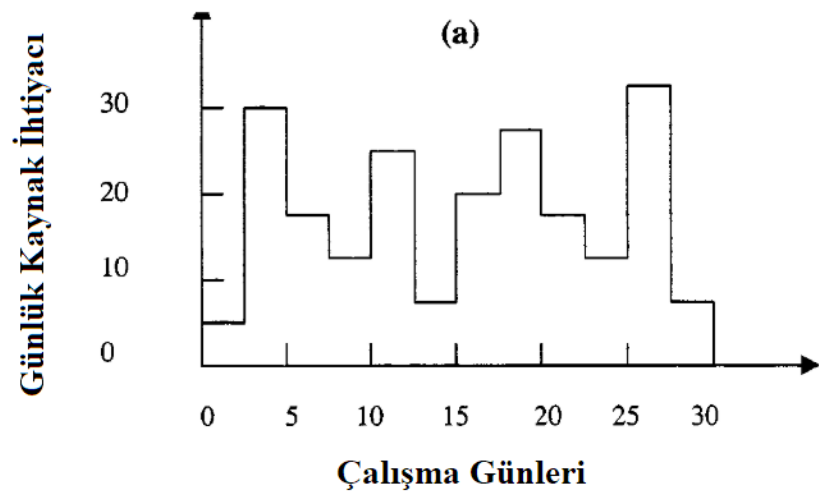
İnşaat sektöründeki yöneticiler, mevcut sınırlı finansman ve zaman kısıtları altında bir projeyi başarılı bir şekilde tamamlamak için makine, işçi ve malzeme kaynaklarını birbirleri ile uyumlu ve zaman açısından bakıldığında verimli bir şekilde yönetmek ve denetlemek amacıyla bir sistem oluşturmalı ve geliştirmelidirler (Lu ve Li, 2003).

Kaynak dengeleme, proje yönetiminde kritik bir kavramdır. Özellikle inşaat gibi kaynak yoğun sektörlerde, kaynakların etkili yönetimi projenin zamanında ve bütçe dâhilinde tamamlanması için hayati önem taşır. Bu nedenle, kaynak dengeleme süreci, projenin başarısını etkileyen unsurlardan biridir. Kaynak dengeleme süreci, projenin ihtiyaç duyduğu kaynakların belirlenmesini ve bunların optimal bir şekilde kullanılmasını sağlayacak stratejilerin geliştirilmesini içerir. Bu genellikle iş gücü, malzeme ve ekipman gibi ana kaynakları kapsar.

Projede ihtiyaç duyulan gerekli kaynakların kullanımının dalgalanması, inşaat planlamasında sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, araştırmacılar, kaynak dengeleme teknikleri geliştirerek kaynak gereksinimleri ile mevcut kaynaklar arasındaki farkı en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Kaynak gereksinimlerini mümkün olduğunca dengeli bir şekilde dağıtarak sürekliliği sağlamak kaynak dengelemenin amacıdır (Senouci ve Adeli, 2001; Son ve Skibniewski, 1999). Bir başka ifadeyle, kaynak dengelemenin amacı, en yüksek kaynak taleplerini azaltmayla birlikte bu taleplerin zirve ve dip noktalarını en aza indirerek dalgalanmayı azaltmaktır. Dalgalanmalar fazla olduğunda kaynaklar verimsiz kullanılmaktadır. Bu durum proje maliyetinde artışa sebep olabilmektedir. Kaynak dengeleme, tüm projenin kaynak ihtiyaçlarını analiz ederek ve ilgili dalgalanmaları en aza indirmeye çalışarak projenin kaynak kullanımını optimize etmeyi hedefler (Hariga ve El-Sayegh, 2011; Doulabi ve diğ., 2011). Bir projedeki kaynak kullanımı için oluşabilecek kaynak histogramlarının türleri Şekil 3.3(a), Şekil 3.3(b) ve Şekil 3.3(c)'de gösterilmiştir.

Doulabi ve diğ. (2011) kaynak dengeleme ihtiyacının ana sebeplerini şu şekilde açıklamışlardır:

1. Kaynak gereksinimlerindeki dalgalanmaları karşılamak için kısa vadeli olarak işgücünü işe almak ve işten çıkarmak oldukça maliyetli olmasının yanında yeni alınacak işgücünün eğitim vb. gibi dolayları maliyetleri de ortaya çıkmaktadır.
2. Projelerde mevcut kaynaklardan daha fazla bir günlük kaynak ihtiyacına gerek olduğu zamanlarda ağır makineler gibi yüksek kira, bakım ve nakliye maliyeti içeren kaynaklar açısından kaynak kullanımları verimli olmamaktadır.



Şekil 3.3 : Kaynak kullanımı: Dalgalı (a); Sabit (b); Değişken (c), Senouci ve Eldin (2004, s. 870).

Günümüze kadar, kaynak dengeleme amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler kesin algoritmalar, sezgisel yöntemler, meta sezgisel yöntemler olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Bu yöntemlerin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Kesin algoritmalar ve doğrusal programlama gibi çözümü yinelemeli olarak veya belirli bir adımda optimuma yaklaştırarak çalışır. Bu tür algoritmalar küçük kapsamlı problemler için faydalı olabilseler de büyük kapsamlı projelerde en iyi çözüme ulaşmak için çok fazla zaman harcayacaklarından verimsiz çalışabilirler. Diğer yandan sezgisel yöntemler, büyük kapsamlı projelerde çözüme ulaşma sürecini hızlandırabilseler de en iyi çözümü garanti etmezler. Karmaşık problemlerde çözüme ulaşmak için genetik algoritmalar gibi meta sezgisel yöntemler kullanılabilmektedir (Damcı ve Polat, 2014).

Kaynak dengeleme yönteminin ana işleyişi daha düzgün bir seviyeye sahip olmak için mevcut kaynaklar üzerinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın kritik olmayan proje aktivitelerinin izin verilen toplam bolluk miktarları doğrultusunda erken başlama sürelerinin kaydırılmasıdır. Kaynak dengeleme süresince proje süresi sabittir ve dengeleme sonrasında değişmez. Kaynak dengelemede aktivitelerin başlaması ve devam etmesi için kaynakların yeterli olduğu kabulü yapılmaktadır.

Kaynak dengelemesi sürecinde ilk olarak, kaynak kullanım kısıtı olmadan, iş programı oluşturulur. Ardından, dengeleme öncesi kaynak histogramı hazırlanır. Bu histogram, projede belirli bir zamanda (genelde günlük) hangi kaynaklara ne kadar ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Proje süresince talep edilen kaynak miktarı dikkate alınır. Kaynak dengelemesi ile aktivitelerin başlangıç zamanları bolluk miktarları doğrultusunda değiştirilerek kaynak kullanımı optimize edilmeye çalışılmaktadır. Kaynak dengeleme sonrasında, değişikliklerin etkilerini gözlemlemek için yeni bir kaynak histogramı oluşturulur. Kaynak histogramı oluşturulurken şu durumlar dikkate alınmaktadır:

- Histogramda x eksenini zaman değerlerini ve y eksenini ihtiyaç duyulan kaynak miktarlarını göstermektedir. Projenin her günü için kaynak ihtiyaçları gösterilmektedir.
- Her gün için ihtiyaç duyulan kaynak miktarı bir çubuk ile kaynak histogramında temsil edilmektedir.

- Bir proje gününde gerçekleşen aktivitelerin toplam kaynak ihtiyaçları, o gün için ihtiyaç duyulan toplam kaynak miktarını belirtmektedir.
- Proje süresince toplam kaynak ihtiyacı histogramda yer alan çubukların alanlarının toplamı ile belirlenmektedir.
- Aktivitelere ait başlangıç ve bitiş zamanları kaynak ihtiyacının eşit dağılacığı şekilde değiştirilir. İş programına bu esnekliği sağlayan aktivitelerin toplam bolluk miktarlarıdır.
- Aktivitelerin başlangıç ve bitiş zamanlarında değişiklik yapılırken proje tamamlanma süresinin, aktiviteler arasındaki mantıksal ilişkilerin ve toplam kaynak sayısının değişmemesi gerekmektedir.
- Kritik aktivitelerin başlangıç ve bitiş süreleri toplam bollukları olmadığı için değiştirilmemelidir.
- Kaynak dengeleme sonrasında yeni kaynak histogramı oluşturulmaktadır.

Kaynak dengeleme hakkındaki literatür araştırmaları dengelenmiş bir kaynak histogramı elde etmek için farklı amaç fonksiyonlarından yararlanılabileceğini göstermektedir. Kaynak dengeleme temelde matematiksel bir optimizasyon problemidir. Dolayısıyla, etkili kaynak dengelemesi, hem amaç fonksiyonunu hem de kısıtlamaları doğru bir şekilde tanımlamaya dayanır. Bu bağlamda, kısıtlamalar genellikle CPM ağının oluşturulması sırasında kurulan öncelik ilişkilerinin yanı sıra kritik yol yöntemi hesaplamalarından elde edilen kritik olmayan aktivitelerin toplam bolluk süreleriyle de ilişkilidir (Damcı ve Polat, 2014). Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde literatürde tanımlanan ve üzerinde çalışmalar olan amaç fonksiyonları yardımıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır. Dengeleme sonuçlarına göre bir karar verme yaklaşımı sunulmuştur.

İnşaat projelerinde kaynak dengelemeye ilişkin literatür incelendiğinde, araştırmacılar tarafından farklı amaç fonksiyonlarının kullanıldığı gözlemlenmektedir. Farklı amaç fonksiyonlarının kullanılması, kaynak dengeleme sürecinde yönetim ekiplerine kaynakların verimli kullanımı konusunda farklı bir bakış açısı sağlayabilir. Tüm bu amaç fonksiyonlarının temel hedefi, orijinal proje süresini değiştirmeden dengeli bir kaynak histogramı elde etmektir. Bir başka ifadeyle, amaç fonksiyonları ile kaynak dengelemenin amacı, kaynak kullanımını mümkün olduğunca dengeli hale getirmek

veya belirli bir düzensiz kaynak dağılımını, kaynak türüne ve projenin ile yüklenicinin ihtiyaçlarına göre optimize etmektir (Damcı ve Polat, 2014).

Fakat amaç fonksiyonlarının kendi içinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Farklı amaçlara odaklanan her bir fonksiyon, farklı parametreler üzerinde çalışır ve sonuç olarak çeşitli kaynak kullanımı histogramları üretmektedir. Bu çeşitli histogramlar, farklı amaç fonksiyonlarının ve optimizasyon hedeflerinin projeye özgü gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Planlama mühendisleri bu nedenle, projenin özel gereksinimlerini karşılayan kaynak kullanım histogramını sağlayan fonksiyonu dikkatlice seçmeli ve olası sonuçlarının farkında olmalıdırlar. Literatür incelendiğinde, on farklı amaç fonksiyonu çeşitli araştırmacılar tarafından kaynak dengelemesi için kullanılmıştır (Damcı ve Polat, 2014). Bu amaç fonksiyonları ile ağ tabanlı iş programı oluşturma yöntemleri ve doğrusal iş programı oluşturma yöntemlerinin kaynak dengeleme üzerine yapılan bazı çalışmalar Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Amaç fonksiyonları ile kaynak dengeleme çalışmaları,
Damcı ve Polat (2014, s. 59) çalışmasından uyarlanmıştır.

No	Ağ tabanlı iş programı oluşturma yöntemlerinde kaynak dengeleme için kaynak(lar)	Doğrusal iş programı oluşturma yöntemlerinde kaynak dengeleme için kaynak(lar)
Z1	Wagner ve diğ. (1964), Ahuja (1976), Easa (1989)	Mattila and Abraham (1998), Yen (2005), Georgy (2008)
Z2	Wagner ve diğ (1964)	-
Z3	Wagner ve diğ (1964), Leu ve diğ. (2000), Doulabi ve diğ. (2011), Easa (1989)	Elwany ve diğ. (1998), Mattila ve Abraham (1998), Georgy (2008)
Z4	Wagner ve diğ (1964)	-
Z5	Wagner ve diğ (1964)	-
Z6	Popescu (1976)	-
Z7	Burgess ve Killebrew (1962), Ahuja (1976), Harris (1978), Harris (1990), Son ve Skibniewski (1999), Hiyassat (2000), Hegazy ve Ersahin (2001), Hiyassat (2001), Christodoulou ve diğ. (2009)	Dubey (1993), Lucko (2011)
Z8	Popescu (1976)	-
Z9	Popescu (1976)	-
Z10	Jun ve El-Rayes (2009)	

Amaç fonksiyonu 1 (Z1): Belirli bir zaman aralığında (gün, hafta vb.) kaynak kullanımındaki mutlak sapmaların toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T |Rdev_i| \quad (3.7)$$

Burada $\min$ =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $Rdev_i=i$ ve $i+1$ günlerinde gereken kaynaklar arasındaki sapma.

Amaç fonksiyonu 2 (Z2): Belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımındaki tek artışların toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T |Rinc_i| \quad (3.8)$$

Burada $\min$ =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $Rinc_i=i$ ve $i+1$ günlerinde gereken kaynaklar arasındaki artış.

Amaç fonksiyonu 3 (Z3): Belirlenen bir zaman aralığındaki (gün, hafta vb.) kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki mutlak sapmaların toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T |R_i - A_{rr}| \quad (3.9)$$

Burada $\min$ =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $R_i=i$. günde gereken kaynak miktarı, A_{rr} =ortalama kaynak kullanımı.

Amaç fonksiyonu 4 (Z4): Belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için maksimum kaynak kullanımının en aza indirilmesi.

$$Z = \min[\max(R_i)] \quad (3.10)$$

Burada $\min$ =minimize, $\max$ =maksimum, i =dikkate alınan gün, $R_i=i$. günde gereken kaynak miktarı.

Amaç fonksiyonu 5 (Z5): Belirlenen bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımındaki maksimum sapmanın en aza indirilmesi.

$$Z = \min[\max(Rdev_i)] \quad (3.11)$$

Burada min =minimize, max =maksimum, i =dikkate alınan gün, $R_{dev_i}=i$ ve $i+1$ günlerinde gereken kaynaklar arasındaki sapma.

Amaç fonksiyonu 6 (Z6): Belirlenen bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki maksimum mutlak sapmanın en aza indirilmesi.

$$Z = \min[\max |R_i - A_{rr}|] \quad (3.12)$$

Burada min =minimize, max =maksimum, i =dikkate alınan gün, $R_i=i$ günde gereken kaynak miktarı, A_{rr} =ortalama kaynak kullanımı.

Amaç fonksiyonu 7 (Z7): Belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımının karesinin toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2 \quad (3.13)$$

Burada min =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $R_i=i$ günde gereken kaynak miktarı.

Amaç fonksiyonu 8 (Z8): Belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımındaki sapmaların karelerinin toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_{dev_i})^2 \quad (3.14)$$

Burada min =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $R_{dev_i}=i$ ve $i+1$ günlerinde gereken kaynaklar arasındaki sapma.

Amaç fonksiyonu 9 (Z9): Belirlenen bir zaman aralığındaki (gün, hafta vb.) kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki sapmaların karelerinin toplamının minimize edilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2 \quad (3.15)$$

Burada min =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, $R_i=i$ günde gereken kaynak miktarı, A_{rr} = ortalama kaynak kullanımı.

Amaç fonksiyonu 10 (Z10): Tüm proje süresi boyunca âtil ve üretken olmayan kaynak günlerinin toplamının en aza indirilmesi.

$$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i] \quad (3.16)$$

Burada $\min$ =minimize, i =dikkate alınan gün, T =proje süresi, R_i = i . günde gereken kaynak miktarı, A =maksimum ($R_1, R_2, \dots, R_i$), B =maksimum ($R_i, R_{i+1}, \dots, R_T$).

3.3 Kaynak Dengeleme için Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı

Bu bölümde minimum moment algoritması yaklaşımı hakkında bilgi verilerek, tez kapsamında kullanılan minimum moment algoritması yaklaşımı adımları açıklanmıştır.

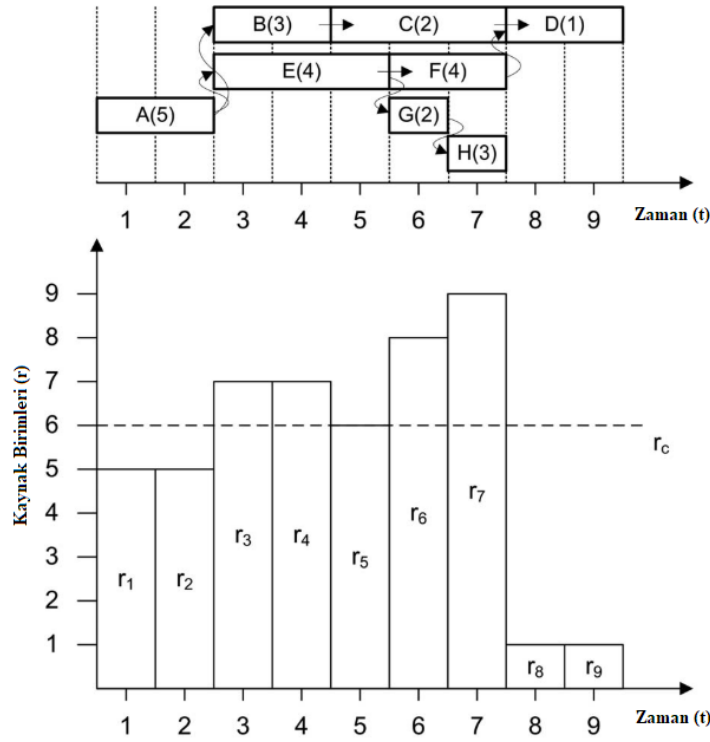
Minimum moment algoritması yaklaşımı, proje yönetiminde sıklıkla kullanılan ve Harris tarafından 1978'de ortaya atılan önemli bir yaklaşımdır. Harris (1978) bir grup eleman belirli bir aralık seti boyunca bir histogram şeklinde organize edildiğinde, elemanların minimum momentinin, histogramın sabit aralıklar üzerinde bir dikdörtgen oluşturulduğu durumda elde edileceğini belirtmiştir. Minimum moment algoritması yaklaşımına göre, bir projenin kaynak talebindeki günlük dalgalanmaları azaltmanın önemli bir yolu, kritik olmayan aktiviteleri serbest bolluk miktarları sınırları içinde orijinal konumlarından başka bir konuma kaydırmaktır.

Bu yaklaşıma göre, kaynak dengeleme süreci, projenin bitiminden başlayarak ve sistematik bir "geriye dönüş" mantığıyla ilerleyerek projenin başlangıcına kadar devam eder.

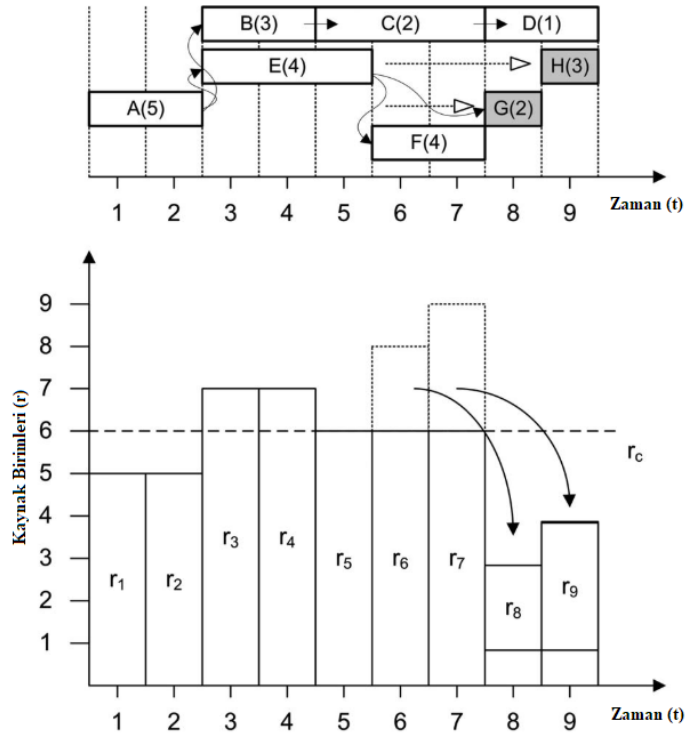
Bu yaklaşım için birkaç varsayım yapılmaktadır ve şu şekildedir:

1. Aktivite başladıktan sonra tamamlanana kadar herhangi bir kesinti beklenmemektedir.
2. Her bir aktiviteye uygulanan kaynaklar, aktivitelerin tamamlanması boyunca sabit kalır.
3. Her bir aktivitenin süresi sabit kalır.
4. Aktiviteler arasındaki mantıksal ilişkiler değişmez.
5. Projenin tamamlanma süresi sabittir.

Minimum moment algoritması yaklaşımı, kaynak histogramındaki tepe ve dip arasındaki farkları mümkün olduğunca azaltmayı amaçlar (bkz. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.4 : Örnek moment hesaplamaları-dengelenmemiş günlük kaynak histogramı, Christodoulou ve diğ. (2010, s. 520).



Şekil 3.5 : Örnek moment hesaplamaları-dengelenmiş günlük kaynak histogramı, Christodoulou ve diğ. (2010, s. 520).

Minimum moment algoritması yaklaşımının uygulama sürecinde aşağıdaki adımlar izlenir;

Adım 1: Sıralama adımında bulunan aktiviteler incelenir ve bu adımda, gözden geçirilen gün içinde planlanan tüm aktiviteler dikkate alınır. Sıralama Adımı (Sequence Step), aktivitenin mantıksal ilişkilerini korurken işgal edebileceği en erken mantıksal konumu temsil eder (Harris, 1978).

- a. Sıralama adımında yer alan aktivitenin serbest bolluğu sıfır ise o aktivite değerlendirme dışı bırakılır.
- b. Sıralama adımında bulunan aktiviteler arasında kaynak ihtiyacı sıfır olanların başlangıç zamanları, öncel aktivitelerin başlangıç zamanlarının ötelenmesine olanak sağlamak için serbest bolluk miktarının tamamını kullanacak şekilde ertelenir.
- c. Sıralama adımında bulunan aktivitelerden kaynak ihtiyacı ve serbest bolluğu bulunan her bir aktivite için iyileştirme faktörü (bkz. Denklem 3.17) hesaplanır. Bu iyileştirme faktörü, serbest bolluk miktarı içinde her bir gün için hesaplanır. Örneğin, bir aktivitenin serbest bolluğunun 2 gün kabul edilirse, serbest bolluğun bir gün kullanılması ve iki gün kullanılması durumlarının her biri için ayrı ayrı iyileştirme faktörü hesaplanır.

Adım 2: Bir numaralı adımda hesaplanan iyileştirme faktörleri değerlerinden en büyüğüne sahip olan aktivite seçilir.

- a. Eğer bu iyileştirme faktörü değeri negatifse, aktivitenin başlangıç zamanı için herhangi bir öteleme işlemi gerçekleştirilmez. Bu durumda bir sonraki sıralama adımında yer alan aktiviteler için bir numaralı adım yeniden uygulanır.
- b. Birden fazla aktivite en büyük iyileştirme faktörü değerine sahip olabilir, bu durumda:
 - Kaynak ihtiyacı daha fazla olan aktiviteye öncelik verilir.
 - Eğer aktivitelerin kaynak ihtiyaç değerleri de aynı ise, en büyük serbest bolluk değerine sahip olan aktivite öncelikli olarak seçilir.
 - Serbest bolluk değerinde de eşitlik olursa, başlama zamanı en geç olan aktiviteye öncelik verilir.

- Tüm bu kıstaslardan sonra aktiviteler arasındaki beraberlik devam ediyorsa, sıralamada yer alan ilk aktivite seçilir.

$$IF(A, N) = R * (R_v - R_0 - (R * N_r)) \quad (3.17)$$

Burada A = aktivite tanımı; N = serbest bolluk dahilinde kullanılan bolluk değeri (gün); R = günlük kaynak ihtiyacı miktarı; R_v = aktivitenin başlangıç zamanı ötelendiğinde, boşaltılan günlere ait toplam kaynak ihtiyacı miktarı; R_0 = aktivitenin başlangıç zamanı ötelendiğinde, doldurulan günlere ait toplam kaynak ihtiyacı miktarı; ve N_r = kullanılan serbest bolluk miktarı ile aktivite süresi değerlerinin en küçük olanı.

Adım 3: İyileştirme faktörünün hesaplanması, kaynak dengeleme sürecinde alınacak kararların esasını teşkil eder. Aşağıda açıklanan koşullara bağlı olarak seçilen aktivite ötelenir.

- a. Bir aktivite için hesaplanan en büyük iyileştirme faktörü değeri kullanılacak serbest bolluk miktarını belirler. Söz konusu en büyük iyileştirme faktörü sıfır veya pozitif değere sahipse, seçilen aktivite iyileştirme faktörü dikkate alınarak belirlenen serbest bolluk miktarı kadar ötelenirken günlük kaynak ihtiyaçları güncellenir.
- b. Bir aktivitenin farklı serbest bolluk kullanım miktarları için hesaplanan iyileştirme faktörü değerlerinde eşitlik olması durumunda, aktivitenin sahip olduğu en büyük serbest bolluk değeri için öteleme işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde diğer aktivitelerin ötelenebilmesi için mümkün olan en fazla alanın yaratılması hedeflenmektedir.

Adım 4: Eğer üç numaralı adımda bir aktivitenin başlama zamanı ötelendiyse, ağ diyagramı tekrar çözülerek güncellenir.

Adım 5: İnceleme altında olan sıralama adımında bulunan aktiviteler yeniden gözden geçirilir. Aktiviteler için mümkün olan tüm öteleme işlemleri tamamlanana kadar 1, 2, 3 ve 4 numaralı adımlar sırasıyla tekrarlanır.

Adım 6: Bir sonraki sıralama adımında bulunan aktiviteler incelenir. Aktiviteler için 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı adımlar sırasıyla tekrarlanır. Tüm aktiviteler değerlendirmeye alınana ve her bir sıralama adımındaki aktiviteler için tüm olası öteleme işlemleri gerçekleştirilene kadar bu süreç devam eder.

Adım 7: 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı adımlar, aktiviteler için öteleme imkanı kalmayana kadar tekrarlanır. Aktiviteler için öteleme imkanı kalmadığı durumda geriye dönüşün sonlandırılır.

Adım 8: Bir aktivitenin başlama zamanı ötelenirse, sahip olduğu serbest bolluk miktarı azalır. Fakat, aktivite hala daha erken bir başlama zamanına sahip olma esnekliğine sahiptir. Bu esneklik, genellikle ters bolluk (back float) olarak adlandırılır (bkz. Denklem 3.18). Bir aktivitenin serbest bolluk miktarının 4 gün olduğunu ve söz konusu aktivitenin başlama zamanı 2 gün ötelendiği kabul edilirse, bu aktivitenin artık sahip olduğu serbest bolluk miktarı 2 gün, ters bolluk miktarı da 2 gün olarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Aktivite } A' \text{nin Ters Bolluğu} = EB_A - ET_{\text{öncel}} \quad (3.18)$$

Burada EB_A = incelemede olan aktivitenin en erken başlama zamanı; ve $ET_{\text{öncel}}$ = bitişik öncel aktivitelerin en erken tamamlanma zamanlarından en geç olan değer. Aktivitelerin serbest bolluklarının kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek için yapılan hesaplamalara ek olarak, aktivitelerin ters bolluklarının kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek için benzer hesaplamalar yapılmalıdır. İlk sıralama adımından başlayarak son sıralama adımına doğru ilerlerken, serbest bolluk değerleri yerine ters bolluk değerleri kullanılır. Daha önce tanımlanan 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı adımlar, tüm aktiviteler incelenerek mümkün olan öteleme işlemleri tamamlanana kadar tekrar edilir.

Sonuç olarak yaklaşımın özü, projenin belirli bir eleman kümesinin zaman içindeki dağılımını optimize etmek ve kaynakların etkin kullanımını sağlamaktır. Bu, projenin başarı şansını artırmak için önemlidir. Ancak, pratikte minimum moment algoritmasının uygulanması, projenin karmaşıklığı ve kaynakların kısıtlılığı gibi faktörlerle mücadele etmeyi gerektirebilir (Tawalare ve Lalwani, 2012; Hiyassat, 2000, 2001; Christodoulou ve diğ., 2010; Baviskar ve Bhangale, 2014).



4. ÖNERİLEN KAYNAK DENGELEME MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Kaynak dengeleme için kullanılan model, JavaScript, HTML ve CSS kullanılarak web ortamında geliştirilmiştir. Mantık için JavaScript, stil için CSS ve yapı için HTML kullanımı, kullanıcıların kaynakları etkili bir şekilde görselleştirmesine ve yönetmesine olanak tanımaktadır. Böylece kullanıcı dostu bir ara yüz sunmak mümkün olmaktadır. Bu model, kritik yol yöntemi yardımıyla oluşturulan iş programı alternatiflerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamaktadır. Model, üç ayrı modülden oluşmaktadır:

1. İş programı modülü
2. Kaynak dengeleme modülü
3. Karar verme modülü

Sonraki bölümlerde, her modülün amaçları, bileşenleri ve işlevleri tanımlanmaktadır. Geliştirilen model ile birlikte önerilen karar verme yaklaşımı bu bölümün devamında açıklanmıştır.

4.1 İş Programı Modülü

İş programı modülünün temel amacı, kaynak kullanım kısıtı olmadan, ileri ve geri geçişleri kapsayan kritik yol yöntemi hesaplamalarını yürütmek ve böylece kaynak dengeleme modülünü, çıktılarından elde edilen gerekli girdilerle beslemektedir. İş programı modülü iki adımdan oluşur.

Adım 1: Bu modülü çalıştırmadan önce, genellikle bir planlama mühendisi olan kullanıcı, modüle aktivitelerin ön bilgilerini (örn., aktivite adları/kodları, aktivite süreleri, öncül-ardıl ilişkileri ve her aktivite için kaynak ihtiyacı miktarı) girer.

Adım 2: Bilgilerin modüle girişi tamamlandıktan sonra, iş programı modülü çalıştırılır. Modül, çalıştırıldığında aktivitelerin erken başlangıç/bitiş zamanlarını, geç başlangıç/bitiş zamanlarını ve toplam/serbest bolluk miktarlarını otomatik olarak

hesaplar. Ardından, modül, her bir aktivitenin günlük kaynak ihtiyaçlarına dayalı bir kaynak histogramının oluşturulmasını içeren işlemi tamamlar.

İş programı modülü tarafından üretilen çıktılar, kaynak dengeleme modülü için girdi olarak işlev görür. Diğer bir ifadeyle, iş programı modülü, kaynak dengeleme modülü için girdi sağlayıcısı rolünü üstlenmektedir. İki modül, temel işlevlerini yerine getirmek ve etkileşimlerini sağlamak üzere uyumlu bir şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra, kaynak dengeleme modülü, iş programı modülü tarafından sağlanan girdileri kullanarak algoritmik süreçlerini yürütmektedir.

4.2 Kaynak Dengeleme Modülü

Birinci modül tarafından oluşturulan ilk iş programı verileriyle birlikte çalışan kaynak dengeleme modülü, modelin ikinci aşamasını oluşturmaktadır. Kaynak dengeleme, aktivitelerin erken başlangıç zamanlarını toplam bolluk miktarlarına göre kaydırarak yürütülmektedir. Kaynak dengeleme modülü iki aşamadan oluşur:

1. İş programı kombinasyonlarının oluşturulması
2. İş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi

Planlama mühendisi tarafından etkinleştirildikten sonra, bu modül tüm hesaplamaları ve süreçleri bağımsız olarak yürütmektedir.

4.2.1 İş programı kombinasyonlarının oluşturulması

Kaynak dengeleme modülünün ilk aşamasının işlevselliğine rehberlik eden temel ilkeler şu kriterleri kapsar:

- İş programındaki kritik olmayan aktivitelerin belirlenmesi
- Kritik olmayan aktivitelerin erken başlangıç zamanlarının toplam bolluk miktarlarına göre kaydırılması
- Kaydırma sürecinde öncelik ilişkilerinin korunması
- Her kaydırma işleminden sonra kritik yol yöntemi hesaplamalarının tekrar edilmesi

İş programı kombinasyonları oluşturma aşaması üç döngüsel adımdan oluşmaktadır:

1. İlk iş programından başlayarak, modülün birinci adımı, kritik olmayan aktiviteleri toplam bolluk miktarlarına göre kaydırır.
2. İkinci adım, kritik yol yöntemi hesaplamalarını uygular.
3. Üçüncü adım, güncellenen iş programını Adım 1 ile tekrar sürece sokulması için hazırlar.

Bu yinelemeli döngü, kritik olmayan tüm aktiviteler ele alınana kadar devam etmektedir. Modülün ilk aşaması olan iş programı kombinasyonları oluşturma süreci daha ayrıntılı olarak incelendiğinde:

Adım 1: Birinci adım, oluşturulan ilk iş programına ait verilerinin gözden geçirilmesini içermektedir. İlk iş programına bir ID (IDC_a) numarası atanır ($a = 0, 1, 2, \dots, n$, burada a , ID sırasını belirtir ve n , toplam ID sayısını temsil eder). Bunu takiben modül, söz konusu iş programındaki kritik olmayan aktiviteler tanımlandıktan sonra ilgili iş programı ile aynı kimlik numarasına (IDS_a) sahip "kaydırma dizisi" adlı bir dizide saklanır. Daha sonra, modül dizi içindeki bir aktiviteyi seçer. Aynı kaydırma dizisi kimlik numarasına sahip iş programında ($IDC_a = IDS_a$), kritik olmayan aktivitelerin en erken başlangıç zamanlarını ($ESN_{b,c}$) denklem 4.1'de gösterildiği gibi toplam bolluk miktarlarına ($TFN_{b,c}$) göre "1" gün kaydırır.

$$ESY_{b,c} = ESN_{b,c} + 1 \mid TFN_{b,c} > 0 \mid (b = 1, 2, \dots, m) \mid (c = IDS_a) \quad (4.1)$$

Burada $ESY_{b,c}$ =Seçilen kritik olmayan aktivitenin yeni en erken başlangıcı, b =Seçilen kritik olmayan aktivitenin sırası, m =Değişen dizideki kritik olmayan aktivitelerin sayısı.

Adım 2: Adım 1'de yürütülen kaydırma sürecinin bir sonucu olarak, iş programı (ID değeri IDC_a olan) yeniden analiz edilir. Bu işlemler, kaydırma dizisi içindeki tüm kritik olmayan aktiviteler için tekrarlanır. Her tekrarda kimlik numarası, denklem 4.2'de gösterildiği gibi sırayla artar. Böylece yeni iş programlarının oluşması sağlanır.

Adım 3: Adım 2 sonucunda oluşan yeni iş programını, Adım 1 için girdi olacak şekilde tekrar hazırlanır.

Bu üç aşamayı daha iyi açıklamak için, örneğin;

- İlk iş programına "0" kimlik numarası ($IDC_0 = 0$) atanır.

- Modül, bu iş programındaki kritik olmayan aktiviteleri tanımlar ve bunları "0" kimlik numarasıyla ($IDS_0 = 0$) kaydırma dizisinde saklar.
- Modül bu dizi içinde bir aktiviteyi seçer.
- "0" kimlik numaralı ($IDC_0 = 0$) iş programında, kritik olmayan aktivitelerin en erken başlama zamanlarını toplam bolluk miktarlarına göre "1" gün kaydırır.
- Bu kaydırma sürecinin sonucunda, iş programı yeniden analiz edilir ve yeni oluşturulan iş programına "1" ID değeri ($IDC_1 = IDC_0 + 1 = 1$) atanır.

Söz konusu işlemler, kaydırma dizisi içindeki tüm aktiviteler için tekrarlanır ve her seferinde kimlik numarası sırayla artarak yeni iş programlarının oluşması sağlanır. Yeni bir iş programı oluşturulduktan sonra, kritik olmayan aktiviteler, karşılık gelen iş programı ile aynı kimlik numarasına sahip değişen bir dizide saklanır. Tüm bu süreçler, aktivitelerinin tümü kritik olan bir iş programı oluşana kadar devam eder. Bu modüldeki kilit noktalardan biri, kaydırma dizisi içindeki aktivitelerin, kaydırma dizisi kimliği (IDS_a) ile eşleşen iş programı kimliğine (IDC_a) karşılık gelen iş programı içerisinde kaydırılmasıdır.

$$IDC_0 = 0; IDC_1 = IDC_0 + 1; \dots \dots; IDC_n = IDC_{n-1} + 1 \quad (4.2)$$

Kaynak dengeleme işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir nokta, kritik olmayan bir aktivitenin toplam bolluk miktarının aynı yol üzerindeki diğer kritik olmayan aktivitelerle paylaşılmasıdır. Bir planlama mühendisinin toplam bolluk miktarı tahsisini göz ardı etmesi durumunda, öncelik ilişkisi ihlalleri riski oluşmaktadır. Sonuç olarak, bir aktivitenin başlangıç zamanını değiştirmek için toplam bolluk miktarı kullanılırken, kaynak dengeleme modülünün aktiviteler arasındaki öncelik ilişkilerinin korunduğunu doğrulaması zorunludur (Damcı ve diğ., 2019). İş programı için her kaydırmadan sonra kritik yol yöntemi hesaplamalarının yeniden yapılması, öncelik ilişkisinin ve toplam bolluk dağılımının korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca modül, tüm bu kısıtlamaları ve hesaplamaları doğrulamak için kontrol noktaları içerir:

1. Geçiş işlemi sırasında öncelik ilişkisinin korunması kontrol edilir.
2. Yeni iş programı daha önceden oluşturulmuşsa, iş programının ID numarasını atamadan siler.

Modülün ilk aşaması, aktivitelerinin tümü kritik olan iş programına ulaşıldığında sona ermektedir. Kaynak dengeleme modülünün ilk aşamasının amacı, başlangıç iş programından oluşan ve kaynak dengeleme işlemine tabi tutulan tüm iş programı kombinasyonlarına ulaşmaktır. Sonuç olarak, bu yinelemeli süreç, her biri ilk iş programından türetilen birden çok iş programı kombinasyonunu oluşturmaktadır.

4.2.2 İş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi

Kaynak dengeleme modülünün ilk aşaması tamamlandıktan sonra, kaynak dengeleme modülünün sonraki aşaması, iş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesidir. Literatür taraması, kaynak dengeleme için on farklı amaç fonksiyonunun kullanıldığını göstermektedir (Popescu, 1976; Easa, 1989; Mattila ve Abraham, 1998, Damcı ve Polat, 2014). Bu tez kapsamında öncelikle odaklanılan amaç fonksiyonu, belirli bir zaman aralığı (gün, hafta vb.) için kaynak kullanımı arasındaki mutlak sapmaların toplamının en aza indirilmesidir. Söz konusu amaç fonksiyonunun formülü Bölüm 3.2 içerisinde denklem 3.9'da sunulmuştur. Bu amaç fonksiyonu ile beraber iş programlarına ait Bölüm 3.2'de belirtilen diğer amaç fonksiyonlarının hesaplamaları karar verme bölümü için yapılmıştır. Sonuç olarak, modülün bu aşaması çalıştırıldıktan sonra, tüm iş programı kombinasyonlarının amaç fonksiyonları hesaplanır.

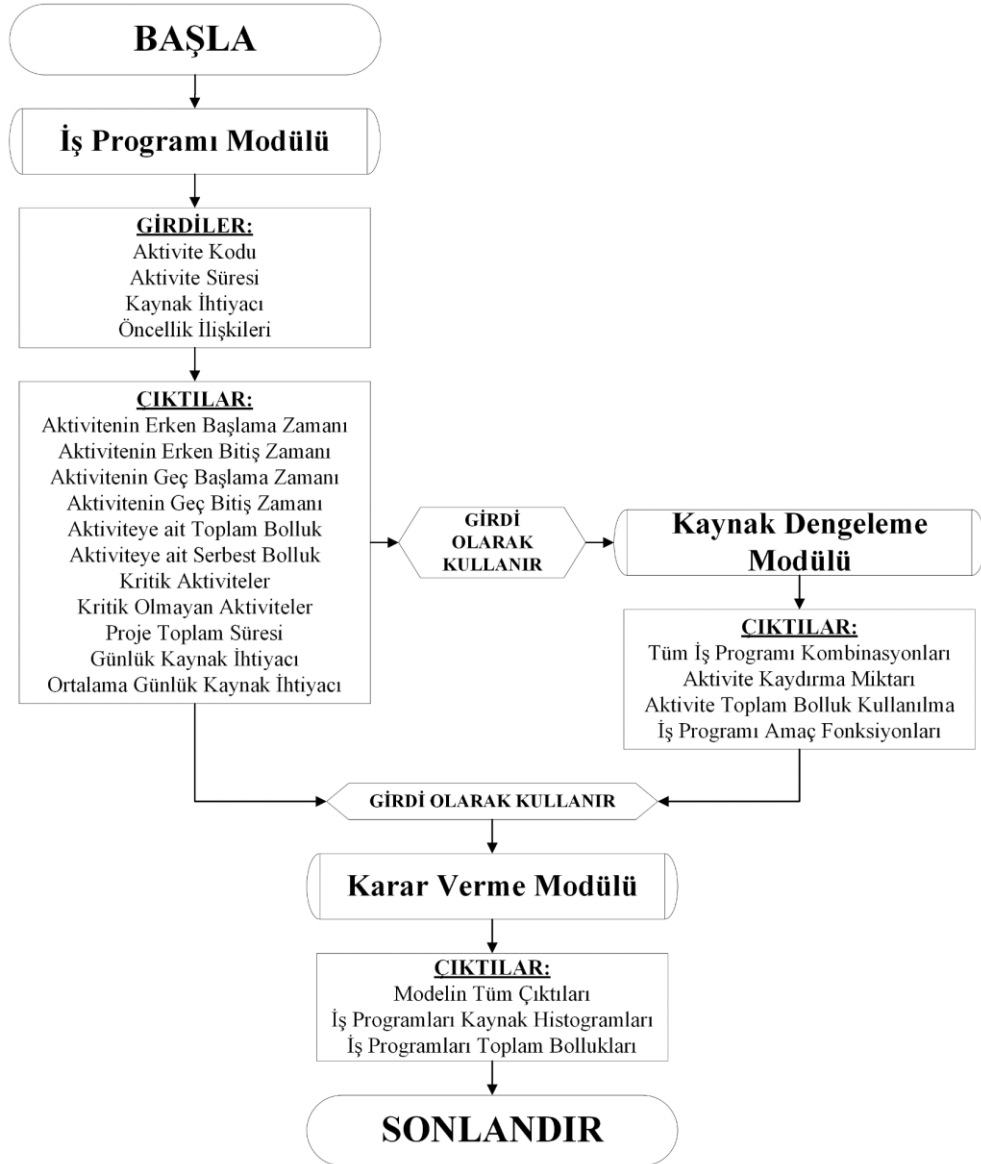
4.3 Karar Verme Modülü

Modelin ilk iki modülü çalıştırıldıktan sonra, model planlama mühendisine bir karar verme modülü sunmaktadır. Karar verme modülü, planlama mühendisine şu verileri sağlar:

- İlk iş programının yanı sıra, kaynak dengeleme sürecinden geçen her iş programı için tüm aktivitelerin bilgilerini,
- İş programlarının kaynak histogramlarını,
- İş programları içindeki mevcut tüm aktivitelerinin toplam bolluk miktarlarının toplamı,
- Kaynak dengeleme sırasında gerçekleşen kaydırma sürecine ilişkin bilgileri,
- İş programı kombinasyonları için amaç fonksiyonları değerleri.

Modelin çalışması sırasında toplam proje süresi, öncelik ilişkileri ve aktivite süreleri değişmeden kalmaktadır. Karar verme modülü ayrıca verdiği tüm bilgilerin karşılaştırması bağlamında kolaylık sağlayacak bir ara yüze sahiptir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde kullanılmak üzere olan girdiler, modele ait modüllerin çalışması ile elde edilen ara çıktılar ve modelin çalışmasının sonlanması ile elde edilen son çıktılar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Tez kapsamında geliştirilen modelin girdileri ve çıktıları.

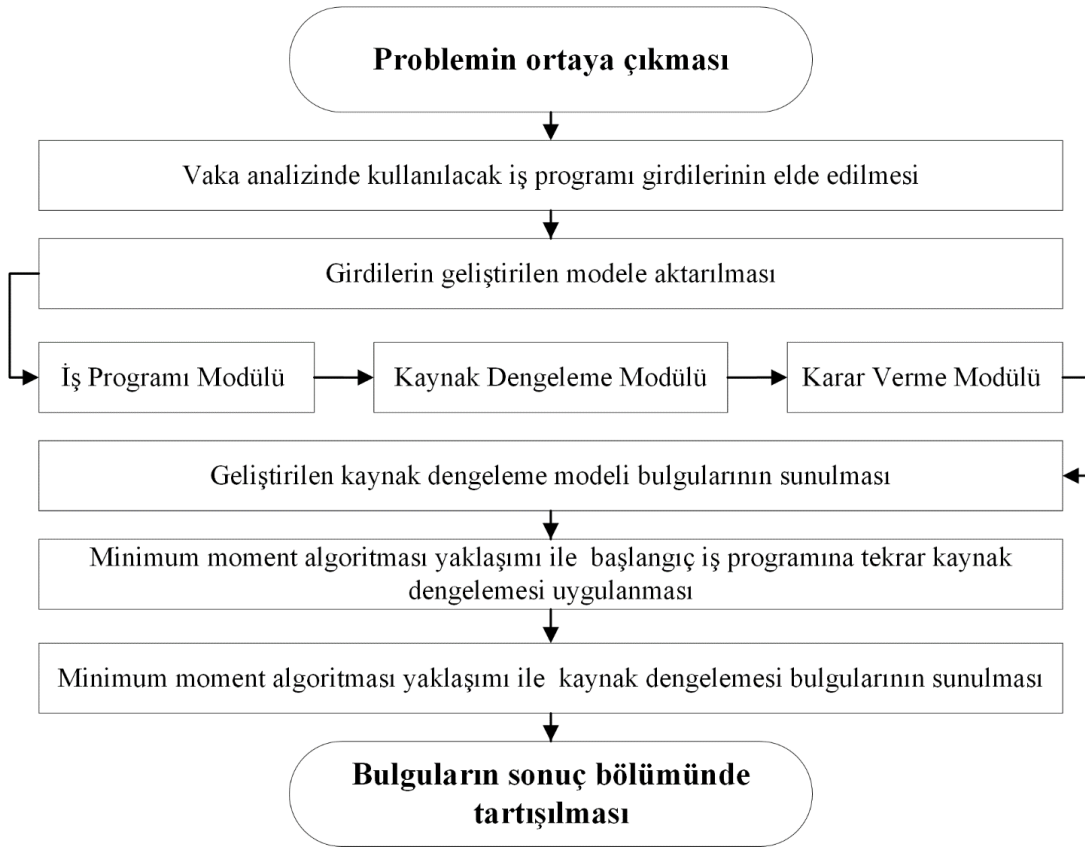
Bu tez kapsamında, kaynak dengeleme sonrası oluşturulan iş programları arasından en uygun programın belirlenmesi için önerilen yaklaşım, amaç fonksiyonlarının değerleri de göz önünde bulundurularak, aktiviteler için en yüksek toplam bolluk miktarına sahip iş programının seçilmesidir.

5. ÖNERİLEN MODELİN ÖRNEK BİR VAKA ÇALIŞMASINDA UYGULANMASI

İnşaat sektöründe, kaynak dengeleme; proje süresi boyunca kaynakların (işgücü, ekipman vb.) dengeli bir şekilde dağıtılması ve optimum kullanımının sağlanması için yapılan planlama sürecidir. Böylece kaynakların en etkin şekilde kullanılması sağlanabilir. Literatür taraması, kaynak dengeleme konusunda birçok çalışma ve yaklaşım olduğunu göstermektedir. Ancak, kaynak dengeleme işleminin ardından elde edilen iş programları arasında en uygun olanının belirlenmesi için yürütülen bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu eksikliği gidermek için, olası tüm iş programı kombinasyonlarını oluşturabilen ve analiz edebilen web tabanlı bir kaynak dengeleme modeli geliştirilmiş ve bir karar verme yaklaşımı önerilmiştir.

Bölüm 3'te açıklanan metodoloji kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengeleme sonrasında oluşabilecek tüm iş programı kombinasyonlarına ulaşmak ve elde edilen iş programları arasından hangisinin en uygun iş programı olduğuna karar vermek amacıyla uygulanmıştır. Tez kapsamında önerilen model literatürden örnek alınarak uyarlanan bir iş programı ve başlangıç girdileri üzerinden çalıştırılmıştır. Literatürden örnek alınarak uyarlanan iş programı girdileri kaynak dengeleme modeline girilmiştir. Kaynak dengeleme süreci sonucunda birçok iş programı kombinasyonu oluşturulmuştur. Problem kapsamında bu oluşan iş programları arasından hangisinin daha uygun bir iş programı olduğuna karar vermek amacıyla bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım en son olarak minimum moment algoritması yaklaşımı ile desteklenmiştir.

Tez kapsamında yapılan vaka analizinde izlenen adımlar Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Vaka analizinde kullanılan modelin geliştirilme ve uygulama aşamaları Bölüm 4'te açıklanmıştır.



Şekil 5.1 : Vaka analizinde izlenen adımlar.

5.1 Geliştirilen Kaynak Dengeleme Modelinde Vaka Analizi

Tez çalışması kapsamında vaka çalışması olarak kullanılan iş programı ve girdileri literatürden örnek alınarak uyarlanmıştır (Hegazy, 1999). Kullanılan bu iş programı 20 aktiviteden oluşmaktadır. Söz konusu iş programını oluşturan aktivitelerin aktivite kodları, süreleri, ilişkileri ve günlük kaynak ihtiyaçları Çizelge 5.1’de sunulmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen kaynak dengeleme modeli Bölüm 4’te açıklandığı gibi üç modülden oluşmaktadır:

1. İş programı modülü: İş programının oluşturulmasını ve kritik yol yönteminin temel işlemlerini içermektedir.
2. Kaynak Dengeleme Modülü: İş programına ait mevcut kaynakların etkin ve dengeli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Kaynak dengeleme sonrası olası bütün iş programı kombinasyonlarını oluşturmaktadır.
3. Karar Verme Modülü: Oluşturulan iş programlarının analiz edilmesini ve sonuçların değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 5.1 : Vaka analizinde kullanılan iş programının girdileri.

Aktivite Kodu	Süre (gün)	Öncülleri	Kaynak İhtiyacı
Başlangıç	0	-	0
A	6	Başlangıç	2
B	3	Başlangıç	3
C	4	A	2
D	6	Başlangıç	5
E	7	A, B	3
F	5	C	9
G	2	D	3
H	2	A, B	0
I	2	G, H	3
J	6	F	6
K	1	C, E	4
L	2	E, G, H	8
M	4	I, K	2
N	2	F, L	3
O	3	J	6
P	5	J, M, N	4
Q	8	O	2
R	2	D, O	3
S	6	P, R	2
T	2	Q	7
Bitiş	0	S, T	0

Çizelge 5.1'de girdileri sunulan iş programı, geliştirilen kaynak dengeleme modelinde yukarıda açıklanan modüller üzerinden kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengeleme ve analiz sürecine tâbi tutulmuştur. Bu süreçlerin sonucunda oluşan iş programları arasından seçim yapmak için bir karar verme yaklaşımı önerilmiş ve bu yaklaşım elde edilen sonuçlarla birlikte kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır.

5.1.1 İş programı modülü

İş programı modülü, iş programının oluşturulması ve temel hesaplamaların yapılmasını içermektedir. Kullanıcı, aktivitelerle ilgili bilgileri girer: adlar/kodlar, süreler, öncül-ardıl ilişkileri ve kaynak ihtiyaçları. Modül, aktivitelerin erken/geç başlangıç/bitiş zamanlarını ve bolluk miktarlarını hesaplamaktadır. Sonrasında, iş programına ilişkin veriler sunmaktadır. Kaynak ihtiyaçlarına dayalı bir kaynak histogramı oluşturmaktadır. Bu çıktılar, kaynak dengeleme modülü için girdi olarak

kullanılmaktadır. Kaynak dengeleme modülü, iş programı modülünden gelen girdilerle hesaplamaları yapmaktadır.

Adım 1: Modelin iş programı modülüne iş programına ait bilgiler girilmiştir.

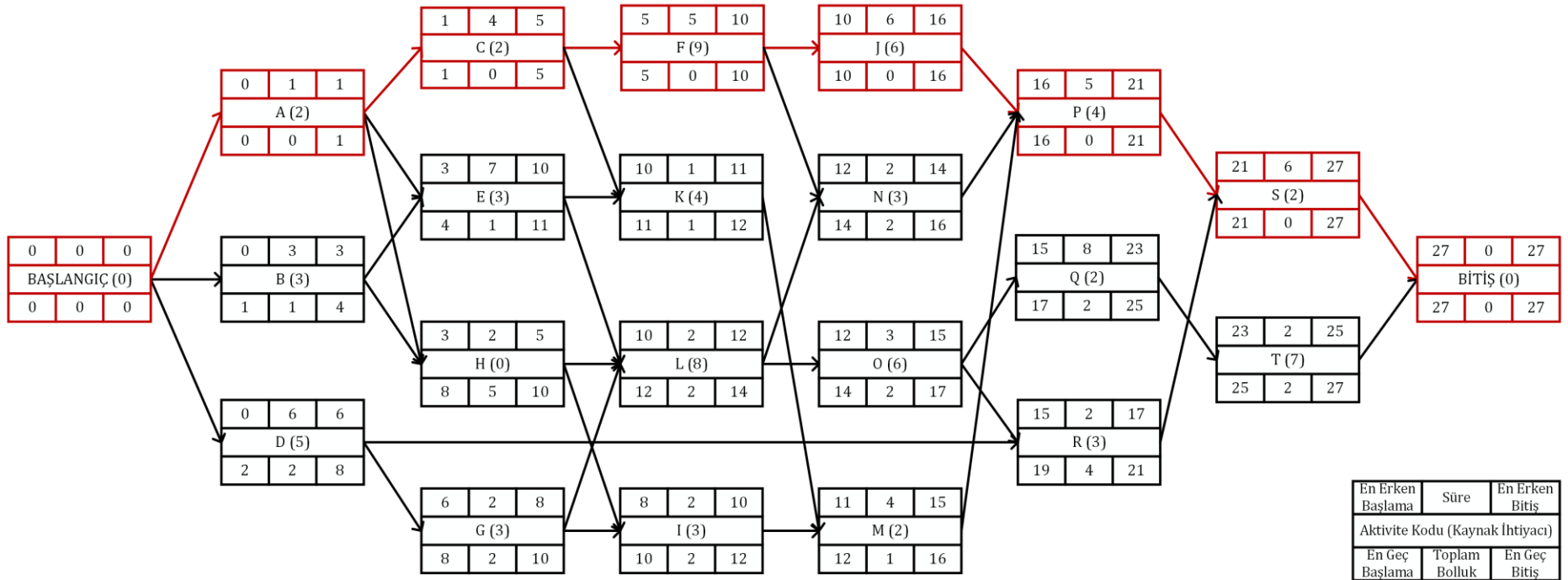
Söz konusu iş programına ilişkin girdi bilgileri daha önce Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Adım 2: Modülün çalıştırılması ile iş programını oluşturan aktivitelerin erken/geç başlangıç/bitiş zamanları ve bolluk miktarları hesaplanmıştır.

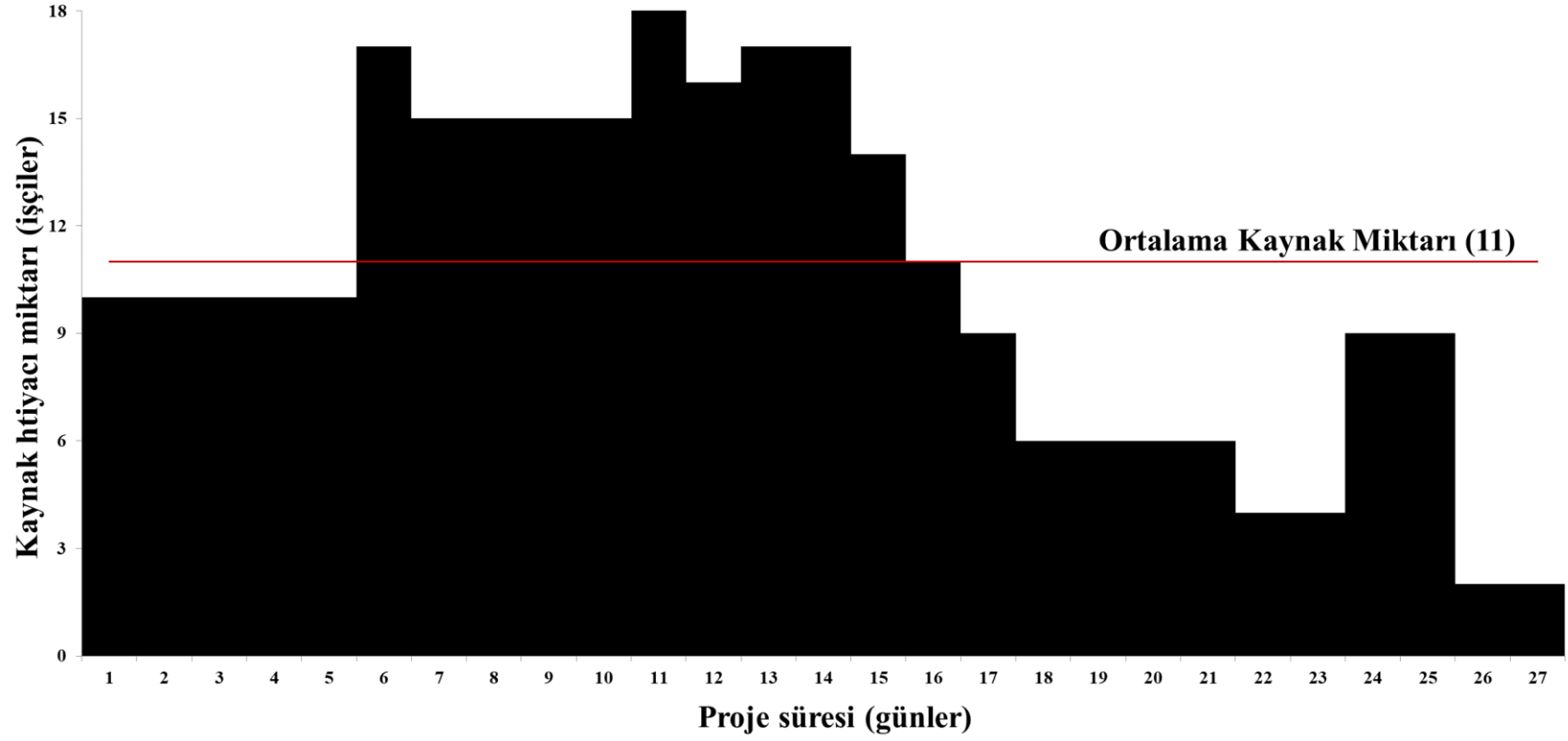
İş programı ve kaynak histogramı Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Hesaplamalar sonucunda toplam proje süresi 27 gün olarak bulunmuştur. Toplam proje süresi hesaplanırken başlangıç günü “0” olarak kabul edilmiştir. İş programında bulunan kritik aktiviteler (kırmızı yazı fontu) ve kritik olmayan aktiviteler özellikleri ile birlikte ayrıntılı olarak Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 : Kaynak dengelemesi öncesinde aktivitelere ait bilgiler.

Aktivite Adı	Süre	Kaynak İhtiyacı	Öncüller	Ardıllar	ES	EF	LS	LF	TF	FT
Başlangıç	0	0	-	A, B, D	0	0	0	0	0	0
A	1	2	Başlangıç	C, E, H	0	1	0	1	0	0
B	3	3	Başlangıç	E, H	0	3	1	4	1	0
C	4	2	A	F, K	1	5	1	5	0	0
D	6	5	Başlangıç	G, R	0	6	2	8	2	0
E	7	3	A, B	K, L	3	10	4	11	1	0
F	5	9	C	J, N	5	10	5	10	0	0
G	2	3	D	I, L	6	8	8	10	2	0
H	2	0	A, B	I, L	3	5	8	10	5	3
I	2	3	G, H	M	8	10	10	12	2	1
J	6	6	F	P	10	16	10	16	0	0
K	1	4	C, E	M	10	11	11	12	1	0
L	2	8	E, G, H	N, O	10	12	12	14	2	0
M	4	2	I, K	P	11	15	12	16	1	1
N	2	3	F, L	P	12	14	14	16	2	2
O	3	6	L	Q, R	12	15	14	17	2	0
P	5	4	J, M, N	S	16	21	16	21	0	0
Q	8	2	O	T	15	23	17	25	2	0
R	2	3	D, O	S	15	17	19	21	4	4
S	6	2	P, R	Bitiş	21	27	21	27	0	0
T	2	7	Q	Bitiş	23	25	25	27	2	2
Bitiş	0	0	S, T	-	27	27	27	27	0	0



Şekil 5.2 : Kaynak dengelemesi öncesi iş programı.



Şekil 5.3 : Kaynak dengelemesi öncesi iş programına ait kaynak histogramı.

Çizelge 5.2’de kırmızı renk ile gösterildiği üzere çözülen iş programında A, C, F, J, P ve S aktiviteleri kritik aktivite olarak bulunmuştur. Ayrıca, iş programında bir adet kritik yol oluşmuştur. Başlangıç-A-C-F-J-P-S-Bitiş aktiviteleri kritik yolu oluşturmaktadır. Ek olarak, iş programını oluşturan aktivitelerin toplam bolluk miktarı, 29 olarak hesaplanmıştır.

5.1.2 Kaynak dengeleme modülü

Bölüm 5.1.1’de açıklanan modül ile kaynak dengeleme öncesindeki iş programı ve kaynak histogramı oluşturulmuştur. İş programının oluşturulması ve kaynak histogramının çizilmesinin ardından, ikinci modül olan kaynak dengeleme modülüne geçilmiştir.

Kaynak dengeleme modülü, ilk modül tarafından oluşturulan iş programının verilerini temel alarak aktivitelerin erken başlangıç değerlerini, toplam bolluk miktarlarına göre kaydırarak kaynak dengeleme sürecini gerçekleştirir. Bu modül, Bölüm 4.2’de açıklandığı gibi iki temel aşamadan oluşmaktadır:

1. İş programı kombinasyonlarının oluşturulması
2. İş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi

Planlama mühendisi tarafından devreye alındıktan sonra, söz konusu modül tüm hesaplamaları ve süreçleri otomatik olarak gerçekleştirmektedir.

İş programı kombinasyonlarının oluşturulması aşamasında Bölüm 4.2.1’de belirtildiği üzere üç döngüsel adım uygulanmaktadır.

Adım 1: İlk iş programından başlayarak, modülün ilk aşaması kritik olmayan aktivitelerin erken başlama zamanlarını, aynı aktivitenin toplam bolluk miktarına göre 1 (bir) gün ötelenir.

Adım 2: Ardından iş programını güncelleyerek kaydırma işlemini tekrar yürütür.

Adım 3: Güncellenen iş programı, Adım 1 ile tekrar kaynak dengeleme sürecine girmesi için hazırlanır.

Bu yinelemeli döngü, kritik olmayan tüm aktiviteler ele alınana kadar devam etmektedir. Kaynak dengeleme modülünün ilk aşamasında, kritik olmayan her bir

aktivitenin erken başlama zamanlarının döngüsel olarak 1 (bir) gün ötelenmesinin amacı, ilk iş programından doğan tüm potansiyel kombinasyonları elde etmektir.

İlk iş programını kullanan modül aşaması, Bölüm 4.2.1’de belirtilen süreçlere uygun olarak kaynak dengeleme sürecini gerçekleştirmektedir. Kontrol noktalarının uygulanmasıyla, sürecin geçerli olan herhangi bir kısıtlamayı ihlal etmemesi sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, kaynak dengeleme modülünün yürütülmesinin ilk aşaması sonucunda, ilk iş programından doğan toplam 24971 farklı iş programı oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan her bir iş programında, kaynak dengeleme için bir aktivitenin ne kadar ötelendiği ve kaynak dengeleme sonucunda aktivitelerin toplam bolluk miktarının ne kadar değiştiği bilgisi ayrıca modül tarafından hesaplanmıştır.

Kaynak dengeleme modülünün ilk aşaması tamamlandıktan sonra, ikinci aşama iş programlarına ait amaç fonksiyonları değerlerini hesaplamaktır. Tez kapsamında, Bölüm 3.2’de açıklanan amaç fonksiyonları değerlerinin tümü, analiz bölümünde her bir iş programı için hesaplanmıştır. Ancak, önerilen karar verme yaklaşımı için özellikle denklem (3.9)’da belirtilen "belirli bir zaman aralığındaki (gün, hafta vb.) kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki mutlak sapmaların toplamını en aza indirme" amacıyla kullanılan amaç fonksiyonu öncelikle dikkate alınmıştır.

Kaynak dengeleme modülünün bu aşamasında, tüm iş programı kombinasyonlarının amaç fonksiyonları Bölüm 3.2’de belirtilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Modülün yürütülen bu aşamasının tamamlanması ile birlikte ilk iş programının kaynak dengeleme süreci tamamlanmıştır. Elde edilebilecek tüm iş programı kombinasyonları amaç fonksiyon değerleri ile birlikte hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonuçları ve analizleri Bölüm 5.4’te açıklanmaktadır.

5.1.3 Karar verme modülü

Modelin ilk iki modülünün çalışmasının tamamlanmasından sonra, aşağıdaki veriler karar verme modülü tarafından sunulmuştur:

- İlk iş programının yanı sıra, kaynak dengeleme sürecinden geçen her iş programı kombinasyonu için aktivitelerle ilgili tüm bilgiler
- İş programlarının kaynak histogramları

- İş programları içindeki mevcut tüm aktivitelerinin toplam bolluk miktarlarının toplamı
- Kaynak dengeleme sırasında gerçekleşen öteleme sürecine ilişkin bilgiler
- İş programı kombinasyonları için amaç fonksiyonları değerleri

Modelin çalışması sırasında toplam proje süresi, öncül-ardıl ilişkileri ve aktivite süreleri değişmeden kalmıştır. Karar verme modülünde sağlanan veriler doğrultusunda sonuçlar analiz edilmiştir ve Bölüm 5.4'te kapsamlı olarak açıklanmaktadır.

5.2 Geliştirilen Kaynak Dengeleme Modeli Analizi ve Bulguları

Bu tez çalışması kapsamında, inşaat projelerinde kaynak dengelemesini takiben en uygun iş programını seçmek için bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşımın bir parçası olarak, kaynak dengelemesi sonucunda ortaya çıkan iş programları arasından en uygun olanını belirlemek için planlama mühendislerine karar vermede yardımcı olacak bir model geliştirilmiştir. Bir vaka üzerinde bu model (bkz. Bölüm 5.3) uygulanmıştır.

Model literatürden örnek alınarak uyarlanan bir iş programı için çalıştırıldığında, projenin toplam süresi 27 gün olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, projenin toplam kaynak ihtiyacı miktarı 283 olarak, iş programını oluşturan aktivitelerin toplam bolluk miktarı 29 olarak ve ortalama günlük kaynak ihtiyacı 11 olarak belirlenmiştir.

Model üzerinde kaynak dengeleme süreci uygulanan vaka için ilk iş programından oluşan toplam 24971 farklı iş programı oluşmuştur. Söz konusu iş programlarının her birinin on farklı amaç fonksiyon değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda, iş programları içindeki mevcut tüm aktivitelerinin toplam bolluk miktarlarının toplamı da ayrıca hesaplanmıştır.

Amaç fonksiyonlarının Bölüm 3.2'de açıklanan parametreler doğrultusunda tüm iş programları dikkate alındığında hesaplanan minimum amaç fonksiyon değerleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Tüm iş programları içerisinde elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerleri.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Denklemi	Minimum Değeri
Z1 (Denklem 3.7)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rdev_i $	33
Z2 (Denklem 3.8)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rinc_i $	16
Z3 (Denklem 3.9)	$Z = \min \sum_{i=1}^T R_i - A_{rr} $	90
Z4 (Denklem 3.10)	$Z = \min[\max(R_i)]$	17
Z5 (Denklem 3.11)	$Z = \min[\max(Rdev_i)]$	7
Z6 (Denklem 3.12)	$Z = \min[\max R_i - A_{rr}]$	7
Z7 (Denklem 3.13)	$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2$	3395
Z8 (Denklem 3.14)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (Rdev_i)^2$	135
Z9 (Denklem 3.15)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2$	436
Z10 (Denklem 3.16)	$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i]$	8

Başlangıç iş programına (kaynak dengelemeden önce) ait amaç fonksiyon değerleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : Başlangıç iş programına ait amaç fonksiyonu değerleri.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Denklemi	Değeri
Z1 (Denklem 3.7)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rdev_i $	40
Z2 (Denklem 3.8)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rinc_i $	16
Z3 (Denklem 3.9)	$Z = \min \sum_{i=1}^T R_i - A_{rr} $	112
Z4 (Denklem 3.10)	$Z = \min[\max(R_i)]$	18
Z5 (Denklem 3.11)	$Z = \min[\max(Rdev_i)]$	7

Çizelge 5.4 (Devam) : Başlangıç iş programına ait amaç fonksiyonu değerleri.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Denklemi	Değeri
Z6 (Denklem 3.12)	$Z = \min[\max R_i - A_{rr}]$	9
Z7 (Denklem 3.13)	$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2$	3591
Z8 (Denklem 3.14)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (Rdev_i)^2$	176
Z9 (Denklem 3.15)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2$	632
Z10 (Denklem 3.16)	$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i]$	16

Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 incelendiğinde görülmektedir ki kaynak dengelemeden önceki iş programı, Z2 ve Z5 amaç fonksiyon değerleri için minimum amaç fonksiyon değerlerini vermektedir. 24971 iş programı arasından Çizelge 5.3'te sunulan minimum amaç fonksiyon değerlerini veren iş programı sayıları Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Minimum amaç fonksiyon değerlerini veren iş programı sayıları.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Denklemi	İş Programı Sayısı
Z1 (Denklem 3.7)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rdev_i $	8
Z2 (Denklem 3.8)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rinc_i $	27
Z3 (Denklem 3.9)	$Z = \min \sum_{i=1}^T R_i - A_{rr} $	348
Z4 (Denklem 3.10)	$Z = \min[\max(R_i)]$	2907
Z5 (Denklem 3.11)	$Z = \min[\max(Rdev_i)]$	9790
Z6 (Denklem 3.12)	$Z = \min[\max R_i - A_{rr}]$	3324
Z7 (Denklem 3.13)	$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2$	30
Z8 (Denklem 3.14)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (Rdev_i)^2$	8
Z9 (Denklem 3.15)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2$	30
Z10 (Denklem 3.16)	$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i]$	2907

Bu iş programlarına ait minimum amaç fonksiyon değerlerinin iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı Çizelge 5.6, Çizelge 5.7, Çizelge 5.8, Çizelge 5.9, Çizelge 5.10, Çizelge 5.11, Çizelge 5.12, Çizelge 5.13, Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15'te sunulmuştur.

Çizelge 5.6 : $Z1_{\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T Rdev_i $ (Denklem 3.7)	$Z1_{\min} = 33$	25	1
		24	1
		23	2
		22	2
		21	1
		20	1
		Toplam	8

Çizelge 5.6'ya göre, 24971 iş programından 8 adedi $Z1_{\min}=33$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.7 : $Z2_{\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T Rinc_i $ (Denklem 3.8)	$Z2_{\min} = 28$	28	1
		27	3
		26	4
		25	5
		24	5
		23	4
		22	3
		21	1
		20	1
		Toplam	27

Çizelge 5.7'ye göre, 24971 iş programından 27 adedi $Z2_{\min}=28$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.8 : $Z_{3\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T R_i - A_{rr} $ (Denklem 3.9)	$Z_{3\min} = 90$	21	1
		20	4
		19	10
		18	19
		17	30
		16	41
		15	48
		14	50
		13	46
		12	38
		11	28
		10	18
		9	10
		8	4
		7	1
		Toplam	348

Çizelge 5.8'e göre, 24971 iş programından 348 adedi $Z_{3\min}=90$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.9 : $Z_{4\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min[\max(R_i)]$ (Denklem 3.10)	$Z_{4\min} = 17$	23	1
		22	6
		21	19
		20	44
		19	82
		18	130
		17	182
		16	230
		15	266
		14	285
		13	285
		12	271
		11	245
		10	213

Çizelge 5.9 (Devam) : $Z_{4\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min[\max(R_i)]$ (Denklem 3.10)	$Z_{4_{\min}} = 17$	9	177
		8	143
		7	111
		6	83
		5	58
		4	38
		3	22
		2	11
		1	4
		0	1
		Toplam	2907

Çizelge 5.9'a göre, 24971 iş programından 2907 adedi $Z_{4\min}=17$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.10 : $Z_{5\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min[\max(Rdev_i)]$ (Denklem 3.11)	$Z_{5\min} = 7$	28	6
		27	21
		26	53
		25	111
		24	200
		23	322
		22	472
		21	632
		20	783
		19	901
		18	972
		17	980
		16	929
		15	820
		14	680
		13	527
		12	389
		11	277
		10	199
		9	148
		8	113
		7	86

Çizelge 5.10 (Devam) : Z_{5min} için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min[\max(Rdev_i)]$ (Denklem 3.11)	$Z_{5\min} = 7$	6	64
		5	46
		4	30
		3	17
		2	8
		1	3
		0	1
		Toplam	

Çizelge 5.10'a göre, 24971 iş programından 9790 adedi $Z_{5min}=7$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.11 : Z_{6min} için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min[\max R_i - A_{rr}]$ (Denklem 3.12)	$Z_{6\min} = 7$	25	1
		24	4
		23	11
		22	23
		21	42
		20	69
		19	103
		18	145
		17	191
		16	240
		15	285
		14	321
		13	338
		12	335
		11	307
		10	262
		9	208
		8	157
		7	111
		6	75
		5	48
		4	28
		3	14
		2	5
		1	1
		Toplam	3324

Çizelge 5.11'e göre, 24971 iş programından 3324 adedi $Z_{6min}=7$ değerini sağlar.

Çizelge 5.12 : $Z7_{\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2$ (Denklem 3.13)	$Z7_{\min} = 3395$	17	1
		16	3
		15	5
		14	6
		13	6
		12	5
		11	3
		10	1
		Toplam	30

Çizelge 5.12'e göre, 24971 iş programından 30 adedi $Z7_{\min}=3395$ değerini sağlar.

Çizelge 5.13 : $Z8_{\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T (Rdev_i)^2$ (Denklem 3.14)	$Z8_{\min} = 135$	25	1
		24	1
		23	2
		22	2
		21	1
		20	1
		Toplam	8

Çizelge 5.13'e göre, 24971 iş programından 8 adedi $Z8_{\min}=135$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.14 : $Z9_{\min}$ için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2$ (Denklem 3.15)	$Z9_{\min} = 436$	17	1
		16	3
		15	5
		14	6
		13	6
		12	5
		11	3
		10	1
		Toplam	30

Çizelge 5.14'e göre, 24971 iş programından 30 adedi $Z9_{\min}=436$ değerini sağlamaktadır.

Çizelge 5.15 : Z10_{min} için iş programlarının toplam bolluğuna göre dağılımı.

Amaç Fonksiyonu Formülü	Minimum Amaç Fonksiyonu Değeri	İş Programı Toplam Bolluk	İş Programı Sayısı
$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i]$ (Denklem 3.16)	$Z_{10\min} = 8$	23	1
		22	6
		21	19
		20	44
		19	82
		18	130
		17	182
		16	230
		15	266
		14	285
		13	285
		12	271
		11	245
		10	213
		9	177
		8	143
		7	111
		6	83
		5	58
		4	38
		3	22
		2	11
		1	4
		0	1
		Toplam	2907

Çizelge 5.15'e göre, 24971 iş programından 2907 adedi Z10_{min}=8 değerini sağlamaktadır.

Amaç fonksiyon değerlerinin iş programı toplam bolluk miktarlarına göre dağılımı çizelgelerinden elde edilen bulgular önemli bir gözlemin altını çizmektedir. Bu çizelgelere göre minimum amaç fonksiyon değerlerini veren ve en yüksek toplam bolluk miktarına sahip iş programı sayısı, genele bakıldığında zaman bir amaç fonksiyonu değeri (Z5_{min}=7) hariç diğer tüm amaç fonksiyonu değerlerinin her biri için yalnızca 1'dir. Bu iş programlarının ID numaraları ve tüm amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 5.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 : Minimum amaç fonksiyonu değerlerini veren ve en yüksek toplam bolluğa sahip iş programlarının tüm amaç fonksiyonu değerleri.

ID	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Toplam Bolluk
1	44	18	112	18	7	9	3591	204	632	9	28
2	42	17	112	18	7	9	3579	200	620	16	28
5	44	18	112	18	7	9	3591	206	632	16	28
6	44	18	112	18	7	9	3579	200	620	16	28
7	46	19	104	17	7	9	3507	236	548	8	23
9	52	22	112	21	7	10	3627	242	668	19	28
10	40	16	112	18	7	9	3591	176	632	16	28
40	33	16	112	18	7	7	3543	135	584	9	25
49	37	18	90	18	7	7	3411	147	452	9	21
1079	49	24	90	17	7	7	3395	205	436	8	17

Tez kapsamında, önerilen karar verme yaklaşımı için özellikle denklem (3.9)'da belirtilen ve Çizelge 5.8'de iş programı toplam bolluk miktarlarına göre dağılımı sunulan "belirli bir zaman aralığındaki (gün, hafta vb.) kaynak kullanımı ile ortalama kaynak kullanımı arasındaki mutlak sapmaların toplamını en aza indirme" amacıyla kullanılan amaç fonksiyonu öncelikle dikkate alınmıştır.

İlk iş programının denklem (3.9)'da sunulan amaç fonksiyonu değeri 112 olarak hesaplanmıştır. Kaynak dengeleme işleminden sonra aynı proje için bu amaç fonksiyonu değerinin 90'a düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç, kaynak dengeleme sonrasında iş programında kaynak dalgalanması açısından %20'lik bir iyileşme olduğu anlamına gelmektedir.

Bu tez kapsamında, kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengeleme sonrasında oluşturulan iş programları arasından en uygun olanının belirlenmesi için önerilen yaklaşım, amaç fonksiyonlarının değerlerinin göz önünde bulundurulmasıyla iş programlarındaki aktiviteler için en yüksek toplam bolluk miktarına sahip olan iş programının seçilmesidir. Toplam bolluk miktarı en yüksek olan iş programının tercih edilmesinin sebebi, amaç fonksiyon değerini en aza indirirken aynı zamanda projenin esnekliğini en üst düzeyde tutmaktır. Bir başka ifadeyle, aktivitelerin toplam bolluk miktarlarının fazla olması, projenin esnekliğini artırır ve beklenmedik durumlara karşı bir tampon oluşturur.

Su ve diğ. (2015), toplam bolluk miktarının, projedeki aktivitelerin gecikmeden planlanabilmesi için bir esneklik ölçüsü sağladığını ve bu şekilde program esnekliğine önemli bir katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Tran ve Long (2018), toplam bolluk miktarının, proje süresini etkilemeden potansiyel gecikmeleri önleyebilmek için projenin tamamlanma süresinin gecikme olasılığını azalttığını ifade etmektedir.

İş programının esnekliğinin, proje hedeflerinin kabul edilebilir sınırlar içinde karşılanmasını sağlamakta etkili olduğu düşünülmektedir. Bu esneklik, projenin başarıyla tamamlanmasını sağlayabilmektedir. Projede çalışan ekipler, beklenmedik durumlarla daha iyi başa çıkabilir ve proje sürecini daha verimli bir şekilde yönetebilir. Aynı zamanda, toplam bolluk miktarının fazla olması, proje ekibine beklenmedik durumlar için bir hazırlık süreci sunabilmektedir ve kriz durumlarında daha hızlı ve etkili bir şekilde hareket etmelerini sağlayabilmektedir.

Toplam bolluk miktarının fazla olması ayrıca proje yöneticilerine daha fazla kontrol ve yönetim imkanı sağlayabilir. Planlama sürecinde, proje ekibi herhangi bir riski veya belirsizliği daha iyi değerlendirebilir ve uygun stratejiler geliştirebilir. Bu durum projenin başarıyla tamamlanması için önemli bir avantaj sağlayabilmektedir. Bir projedeki iş programı esnekliğinin kapsamı, toplam bolluk miktarı büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, daha fazla toplam bolluk miktarına sahip bir iş programı, doğası gereği daha yüksek derecede iş programı esnekliğine sahiptir. Toplam bolluk miktarının fazla olmasının sağladığı bazı avantajlar şu şekilde açıklanabilir:

1. Risk Yönetimi: Projede beklenmedik gecikmeler veya değişiklikler olması durumunda riskleri azaltabilir. Planlı olmayan durumlar için bir tampon görevi üstlenebilir.
2. Esneklik: Planlama aşamasında olası gecikmeler veya değişiklikler için hazır olunmasını sağlayabilir.
3. Optimizasyon: Kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Bu durum, proje yöneticilerinin kaynakları optimize etmesi ve verimliliği artırması için daha fazla esneklik sağlayabilir.
4. Karar Verme Süreci: Proje yöneticilerine karar verme sürecinde daha fazla zaman tanıyabilir. Bu durum, olası riskleri değerlendirmek ve uygun stratejiler geliştirmek için ek zaman sağlayabilir.

5. Yeniden Planlama Kolaylığı: Projenin yeniden planlanmasını kolaylaştırabilir. Planlama değişiklikleri yapılırken, diğer aktivitelerin süreçlerini etkilemeden öncelikli aktivitelere odaklanma imkanı sağlayabilir.
6. Müşteri Memnuniyeti: Projenin zamanında ve sorunsuz bir şekilde tamamlanmasını sağlayabilir. Bu durum müşteri memnuniyetini arttırabilir.
7. Maliyet Kontrolü: Proje maliyetlerinin kontrolünü kolaylaştırabilir. Beklenmedik gecikmeler veya değişiklikler durumunda, ek maliyetlerin azaltılması için zaman ve esneklik sağlayabilir.
8. Kaynak Tahsis Optimizasyonu: Kaynakların daha etkin bir şekilde tahsis edilmesini sağlayabilir. Bu durum, iş gücü, malzeme ve ekipmanın optimum kullanımını sağlayabilir ve ekstra doğacak maliyetleri azaltabilir.
9. Süreç İyileştirmesi: Süreç iyileştirmesi için fırsatlar sunabilir. Proje yöneticileri, sürekli olarak iş programını gözden geçirerek ve iyileştirerek gelecekteki projeler için en iyi uygulamaları belirleyebilir.
10. Stresin Azaltılması: Proje ekibindeki stresi azaltabilir. Beklenmedik olaylar veya gecikmeler durumunda, proje ekibi daha rahat bir şekilde krizleri yönetebilir ve sorunları çözebilir.
11. İşveren ve Yüklenici İlişkilerinin Güçlendirilmesi: İşveren ile yüklenici arasında projenin zamanında ve bütçe içinde tamamlanmasını sağlamak için işbirliği fırsatları yaratabilir.
12. Uzun Vadeli Planlama: Uzun vadeli planlama ve stratejik karar alma süreçlerini destekleyebilir. Proje yöneticileri, gelecekteki projeler için daha iyi bir şekilde planlama yapabilir ve kaynakları daha verimli bir şekilde tahsis edebilirler.

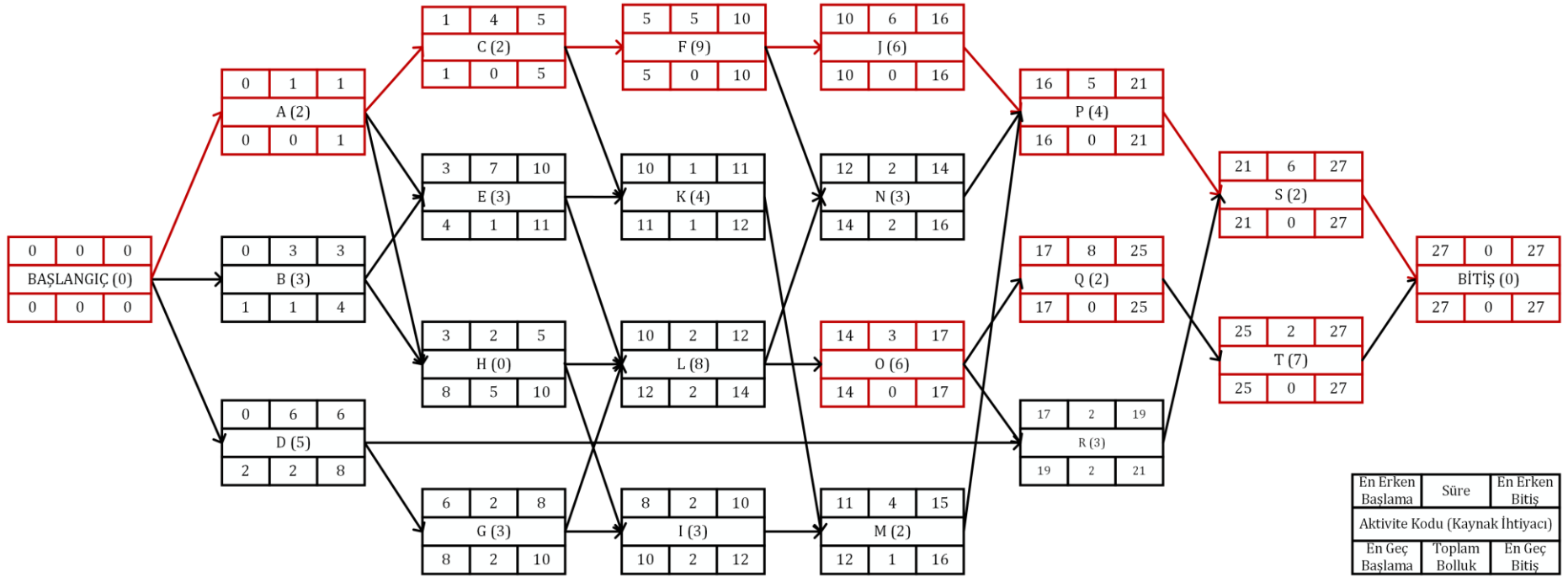
Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında, aktivitelerin toplam bolluk miktarlarının fazla olmasının inşaat sektöründe projelerin başarılı bir şekilde yönetilmesini sağladığı söylenebilir. Bu durum, beklenmedik durumlarla daha iyi başa çıkmayı, projenin esnekliğini artırmayı ve sonuçta müşteri memnuniyetini sağlamayı mümkün kılabilir. Bu nedenle, iş programındaki aktivitelerin toplam bolluk miktarlarının doğru ve verimli bir şekilde kullanılması projelerin başarılı bir şekilde tamamlanması için kritik bir rol üstlenebilmektedir. Dolayısıyla, inşaat sektöründeki

paydaşlar için, aktivitelerin toplam bolluk miktarlarının fazla olmasını sağlamak ve bu durumun avantajlarından en iyi şekilde yararlanmak önemli bir stratejik yaklaşım olabilmektedir.

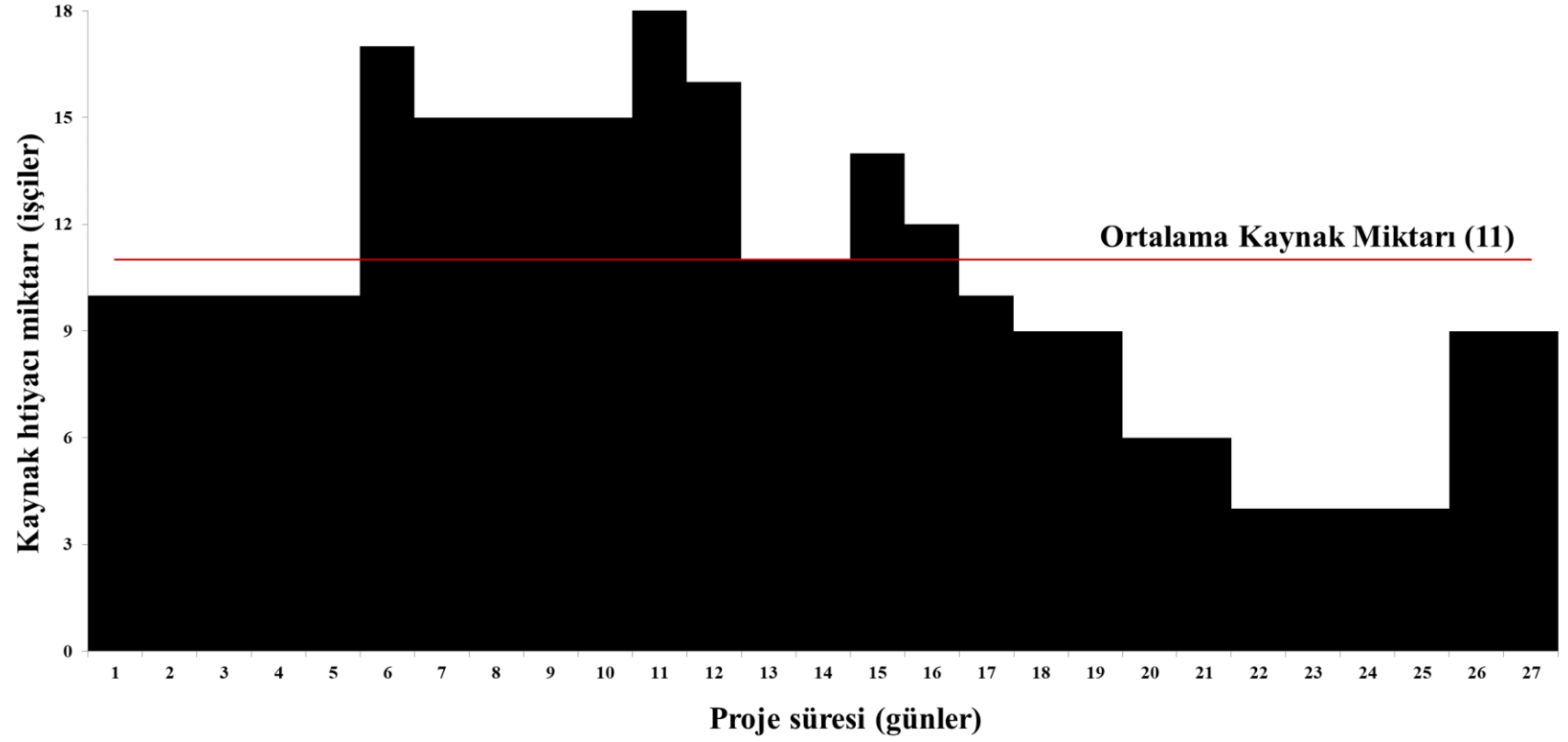
Sonuç olarak bu bölümde açıklanan tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurularak, kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengeleme sonrası en uygun iş programı olarak Çizelge 5.8'de ve Çizelge 5.16'da gösterildiği üzere toplam bolluk miktarı 21 ve ID numarası 49 olan iş programı tercih edilmiştir. Söz konusu iş programında bulunan kritik aktiviteler (kırmızı yazı fontu) ve kritik olmayan aktiviteler özellikleri ile birlikte ayrıntılı olarak Çizelge 5.17'de sunulmuştur. Söz konusu iş programı ve iş programına ait kaynak histogramı Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te sunulmuştur. Şekil 5.4 incelendiğinde O, Q ve T aktivitelerinin, kritik aktiviteye döndüğü görülmektedir.

Çizelge 5.17 : $Z3_{min}$ değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programına ait aktivitelerin bilgileri.

Aktivite Adı	Süre	Kaynak İhtiyacı	Öncüller	Ardıllar	ES	EF	LS	LF	TF	FT
Başlangıç	0	0	-	A, B, D	0	0	0	0	0	0
A	1	2	Başlangıç	C, E, H	0	1	0	1	0	0
B	3	3	Başlangıç	E, H	0	3	1	4	1	0
C	4	2	A	F, K	1	5	1	5	0	0
D	6	5	Başlangıç	G, R	0	6	2	8	2	0
E	7	3	A, B	K, L	3	10	4	11	1	0
F	5	9	C	J, N	5	10	5	10	0	0
G	2	3	D	I, L	6	8	8	10	2	0
H	2	0	A, B	I, L	3	5	8	10	5	3
I	2	3	G, H	M	8	10	10	12	2	1
J	6	6	F	P	10	16	10	16	0	0
K	1	4	C, E	M	10	11	11	12	1	0
L	2	8	E, G, H	N, O	10	12	12	14	2	0
M	4	2	I, K	P	11	15	12	16	1	1
N	2	3	F, L	P	12	14	14	16	2	2
O	3	6	L	Q, R	14	17	14	17	0	0
P	5	4	J, M, N	S	16	21	16	21	0	0
Q	8	2	O	T	17	25	17	25	0	0
R	2	3	D, O	S	17	19	19	21	2	2
S	6	2	P, R	Bitiş	21	27	21	27	0	0
T	2	7	Q	Bitiş	25	25	25	27	0	0
Bitiş	0	0	S, T	-	27	27	27	27	0	0



Şekil 5.4 : $Z3_{\min}$ değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programı.



Şekil 5.5 : $Z_{3\min}$ değeri için toplam bolluğu 21 olan iş programının kaynak histogramı.

5.3 Minimum Moment Algoritması Yaklaşımı ile Kaynak Dengeleme

Bu tez kapsamında önerilen karar verme yaklaşımının performansını ölçmek amacıyla, kullanılan vakanın kaynak dengelemesi minimum moment algoritması yaklaşımı ile de gerçekleştirilmiştir. Minimum moment algoritmasının Bölüm 3.3'te anlatılan adımlarını uygulamak için ikinci bir model geliştirilmiştir. Bu model de JavaScript, HTML ve CSS kullanılarak web ortamında geliştirilmiştir. Söz konusu model Bölüm 3.3'te anlatılan minimum moment algoritması yaklaşımının çözüm adımlarını uygulayarak kaynak dengelemesini gerçekleştirmektedir.

Bölüm 3.3'te anlatılan adımlar takip edilerek, geliştirilen ikinci model yardımıyla minimum moment algoritması yaklaşımı çözümü ile vaka analizinde kullanılan ilk iş programının kaynak dengelemesi yapılmıştır.

Minimum moment algoritması modeli dört ayrı modülden oluşmaktadır: (1) iş programı modülü, (2) aktiviteleri ileri ve geri öteleme modülü, (3) amaç fonksiyonları modülü ve (4) karar verme modülü.

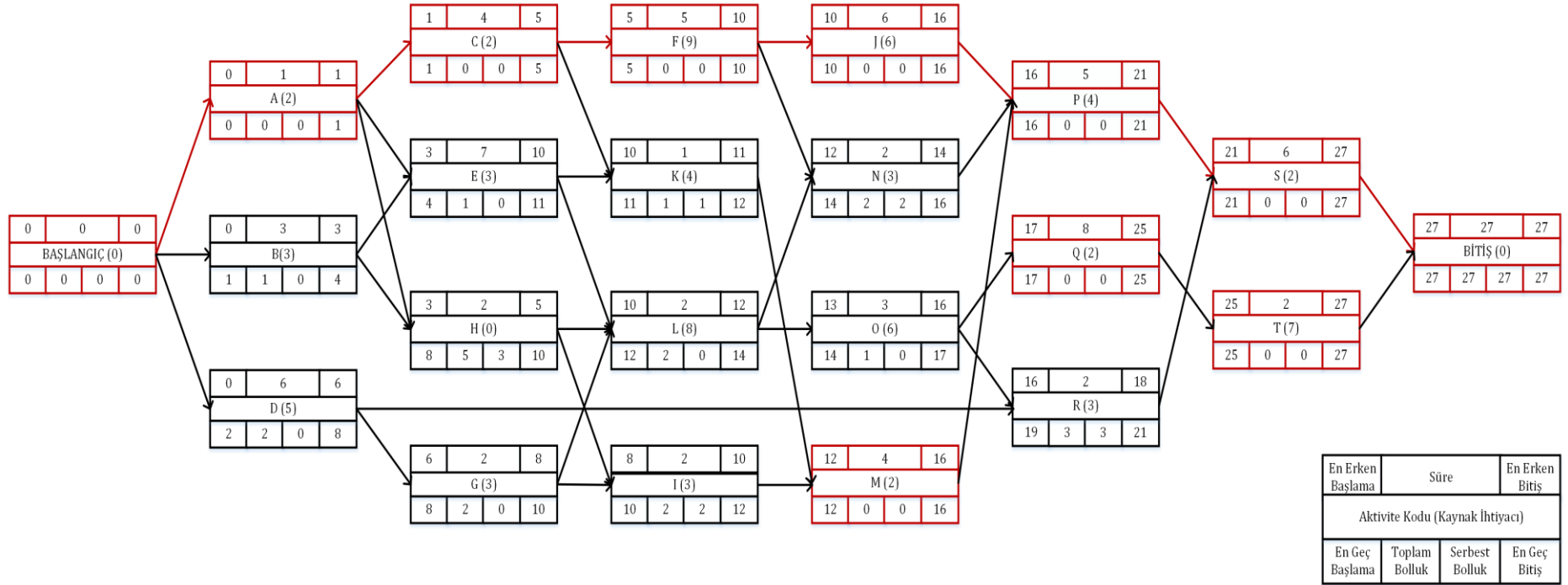
Modül 1: İş programı modülünde Çizelge 5.1'de girdi bilgileri verilen iş programı için temel kritik yol yöntemi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Modül 2: Bölüm 3.3'te anlatılan adımlara ve kurallara göre ilk önce ileri öteleme süreci uygulanmıştır. Ardından ters bolluk ile geri dönüş öteleme süreci gerçekleştirilmiştir. Aktivitelerin ileri ve geri ötelemelerinin tamamlanması ile kaynak dengeleme tamamlanmıştır.

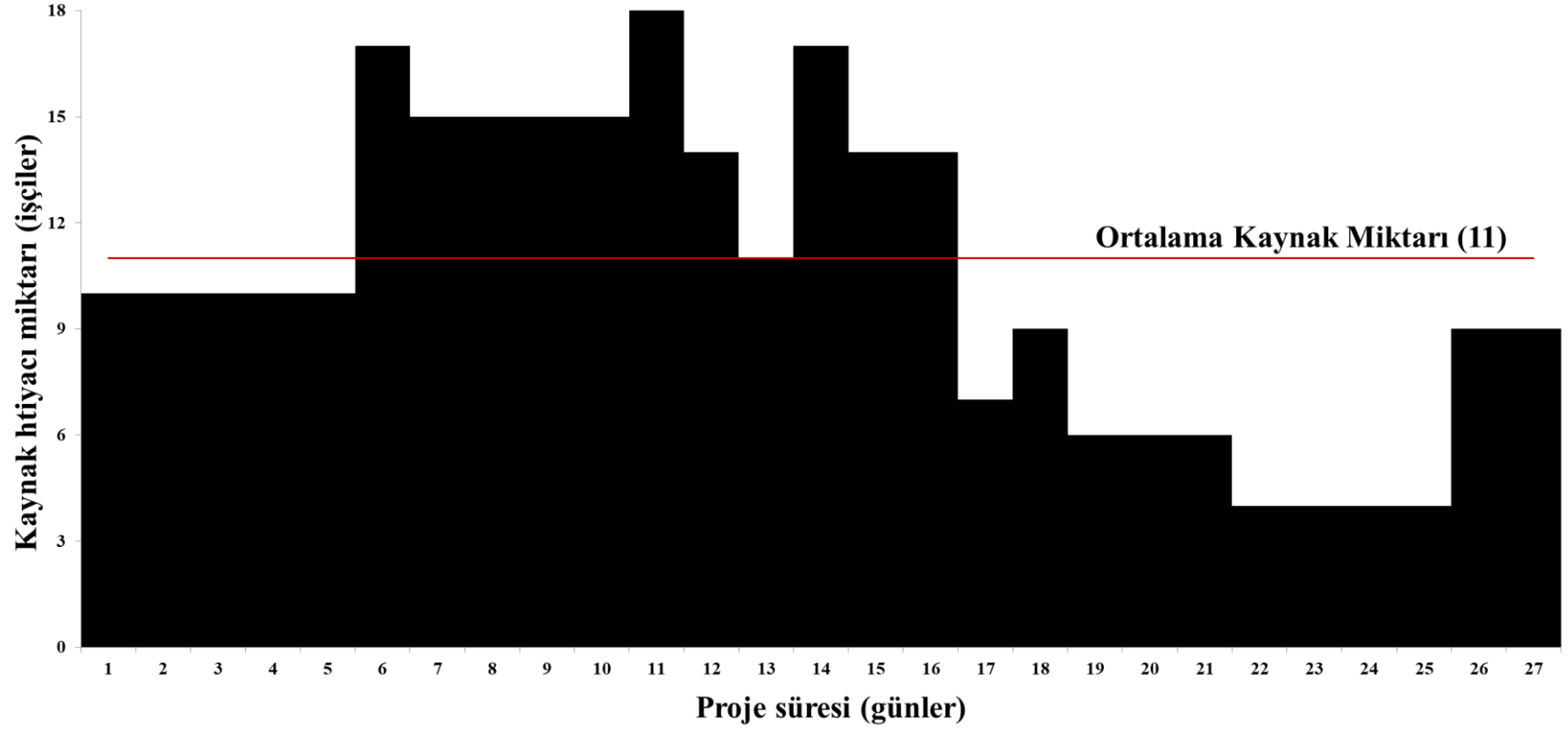
Modül 3: Kaynak dengelemesi yapılan iş programının amaç fonksiyonları Bölüm 3.2'de anlatılan ilgili denklemlerine göre hesaplanmıştır.

Modül 4: Diğer modüllerin tamamlanması ile birlikte elde edilen kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programına ilişkin detaylı veriler ve kaynak histogramı oluşturulmuştur.

Modelin tüm modüllerinin tamamlanması sonucunda kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programı Şekil 5.6'da ve iş programına ait kaynak histogramı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programı.



Şekil 5.7 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iř programına ait kaynak histogramı.

Kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programında bulunan kritik aktiviteler (kırmızı yazı fontu) ve kritik olmayan aktiviteler özellikleri ile birlikte ayrıntılı olarak Çizelge 5.18’de sunulmuştur.

Çizelge 5.18 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programına ait aktivitelerin bilgileri.

Aktivite Adı	Süre	Kaynak İhtiyacı	Öncüller	Ardıllar	ES	EF	LS	LF	TF	FT
Başlangıç	0	0	-	A, B, D	0	0	0	0	0	0
A	1	2	Başlangıç	C, E, H	0	1	0	1	0	0
B	3	3	Başlangıç	E, H	0	3	1	4	1	0
C	4	2	A	F, K	1	5	1	5	0	0
D	6	5	Başlangıç	G, R	0	6	2	8	2	0
E	7	3	A, B	K, L	3	10	4	11	1	0
F	5	9	C	J, N	5	10	5	10	0	0
G	2	3	D	I, L	6	8	8	10	2	0
H	2	0	A, B	I, L	3	5	8	10	5	3
I	2	3	G, H	M	8	10	10	12	2	2
J	6	6	F	P	10	16	10	16	0	0
K	1	4	C, E	M	10	11	11	12	1	1
L	2	8	E, G, H	N, O	10	12	12	14	2	0
M	4	2	I, K	P	12	16	12	16	0	0
N	2	3	F, L	P	12	14	14	16	2	2
O	3	6	L	Q, R	13	16	14	17	1	0
P	5	4	J, M, N	S	16	21	16	21	0	0
Q	8	2	O	T	17	25	17	25	0	0
R	2	3	D, O	S	16	18	19	21	3	3
S	6	2	P, R	Bitiş	21	27	21	27	0	0
T	2	7	Q	Bitiş	25	27	25	27	0	0
Bitiş	0	0	S, T	-	27	27	27	27	0	0

5.4 Minimum Moment Algoritması ile Kaynak Dengelemesi Bulguları

Kaynak dengelemesi sonucunda oluşan iş programları arasından en uygun olanını seçmek için önerilen yaklaşım, amaç fonksiyonlarının değerlerinin yanı sıra, aktiviteler için en fazla toplam bolluk miktarına sahip iş programının belirlenmesini içermektedir. Minimum moment algoritması yaklaşımı ile bu karar verme yaklaşımını destekleyecek bulgulara ulaşılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda tez kapsamında yapılan vaka analizi için minimum moment algoritması ile de kaynak dengelemesi için

bir model geliştirilmiştir. Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 5.19'de sunulmuştur.

Çizelge 5.19 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Denklemi	Değeri
Z1 (Denklem 3.7)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rdev_i $	47
Z2 (Denklem 3.8)	$Z = \min \sum_{i=1}^T Rinc_i $	23
Z3 (Denklem 3.9)	$Z = \min \sum_{i=1}^T R_i - A_{rr} $	102
Z4 (Denklem 3.10)	$Z = \min[\max(R_i)]$	18
Z5 (Denklem 3.11)	$Z = \min[\max(Rdev_i)]$	7
Z6 (Denklem 3.12)	$Z = \min[\max R_i - A_{rr}]$	7
Z7 (Denklem 3.13)	$Z = \min M_x = \sum_{i=1}^T (R_i)^2$	3475
Z8 (Denklem 3.14)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (Rdev_i)^2$	223
Z9 (Denklem 3.15)	$Z = \min \sum_{i=1}^T (R_i - A_{rr})^2$	516
Z10 (Denklem 3.16)	$Z = \min \sum_{i=1}^T [\min(A, B) - R_i]$	9

Kaynak dengelemesi sonrasında elde edilen iş programının toplam bolluk miktarı 22 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, karar verme yaklaşımı için asıl olarak dikkate alınan, denklem (3.9)'da belirtilen amaç fonksiyon değeri 102 olarak bulunmuştur. İlk iş programının aynı amaç fonksiyonu değeri 112 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, minimum moment algoritması yaklaşımı ile kaynak dengeleme işleminden sonra aynı proje için iş programında %8.92'lik bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.20'da minimum moment algoritması yaklaşımı ile kaynak dengelemesi sonrası elde

edilen iş programının vaka analizi sonucunda seçilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.20 : Minimum moment algoritması ile kaynak dengelemesi sonrası elde edilen iş programının vaka analizi sonucunda seçilen iş programının amaç fonksiyonu değerleri.

İş Programı	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Minimum Moment Algoritması	47	23	102	18	7	7	3475	223	516	9
Vaka Analizi Sonucunda Seçilen	37	18	90	18	7	7	3411	147	452	9



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, tez çalışmasından elde edilen bulgulara dayalı olarak çıkarılan sonuçlar özetlenmektedir. Önerilen kaynak dengeleme modeli ve minimum moment algoritması modeli üzerinden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Söz konusu çalışmanın ardından gelecekte yapılması muhtemel araştırma ve geliştirmeler için yol gösterici öneriler sunulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, kaynak kullanım kısıtı olmadan, kaynak dengelemesi sonrasında elde edilen iş programları arasından en uygun iş programını belirlemek için planlama mühendislerine karar vermede yardımcı olacak bir model geliştirilmiştir.

İnşaat projelerindeki belirsizlikler ve değişkenlikler, proje başarısı için kritiktir. Başarılı bir proje yönetimi için etkili kaynak yönetimi gerekli olan unsurlardan biridir. İşgücü, malzeme, ekipman, finansal kaynaklar ve zaman gibi sınırlı kaynakların verimli kullanımı projenin bütçe, zaman ve kalite hedeflerine ulaşmasını sağlar. İnşaat projelerinin dinamik doğası, kaynak yönetimini daha karmaşık hale getirmektedir. Sürekli değişen gereksinimler, kaynakların etkin bir şekilde planlanmasını ve yönetilmesini gerektirmektedir. Kaynak kullanımındaki dalgalanmalar, projeye birçok olumsuz etkiyi beraberinde getirebilmektedir. Bu dalgalanmaları en aza indirmek için planlama mühendisleri farklı yöntemler kullanarak kaynakları daha dengeli bir şekilde dağıtmayı hedeflemektedirler. Kaynak dengelemesi, kaynak kullanımındaki dalgalanmaları azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Literatür araştırması, kaynak dengeleme için birçok amaç fonksiyonunun kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, bu amaç fonksiyonu farklı iş programları için aynı sonucu üretebilmektedir. Bu durumda, planlama mühendisleri için en uygun iş programını seçmek zor bir karar olabilmektedir. Literatür incelendiğinde, kaynak dengelemeden sonra elde edilen iş programlarından hangisinin daha uygun olduğunu belirleme konusunda yürütülen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez kapsamında, söz konusu eksikliği gidermek için, kaynak kullanım kısıtı olmadan, ilk iş programından doğan tüm iş programı kombinasyonlarını oluşturabilen ve analiz edebilen web tabanlı bir kaynak dengeleme modeli geliştirilmiştir.

Geliştirilen modelin performansını görmek için bir vaka üzerinde uygulanmıştır. Yapılan analiz ile şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kaynak kullanım kısıtı olmadan, projenin toplam süresi 27 gün olarak hesaplanmıştır.
- Kaynak dengeleme sonucunda ilk iş programından oluşan toplam 24971 adet iş programı oluştuğu görülmüştür.
- Kaynak dengeleme sonrasında aynı minimum amaç fonksiyonu değeri veren birden fazla iş programı oluşmuştur.
- Minimum amaç fonksiyon değerlerini veren ve en yüksek toplam bolluk miktarına sahip iş programı sayısı, genele bakıldığında zaman bir amaç fonksiyonu değeri ($Z5_{min}=7$) hariç diğer tüm amaç fonksiyonu değerlerinin her biri için yalnızca 1'dir.
- Kaynak dengeleme işleminden sonra aynı proje için tez kapsamında asıl dikkate alınan ve denklem (3.9)'da sunulan amaç fonksiyonu değerinin 112'den 90'a düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç, kaynak dengeleme sonrasında iş programında %20'lik bir iyileşme olduğu anlamına gelmektedir.

Bu tez kapsamında, kaynak dengelemesi sonrasında oluşturulan iş programları arasından en uygun olanın belirlenmesi için önerilen yaklaşım, aktiviteler için en yüksek toplam bolluk miktarına sahip olan iş programının seçilmesi prensibine dayanmaktadır. Toplam bolluk miktarı en yüksek olan iş programının tercih edilmesinin sebebi, amaç fonksiyon değerini en aza indirirken aynı zamanda projenin esnekliğini en üst düzeyde tutmaktır. Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak, kaynak dengelemesi sonrası en uygun iş programı olarak, denklem (3.9)'da sunulan minimum amaç fonksiyonu değeri olan 90 sayısını veren ve toplam bolluk miktarı 21 olan iş programı tercih edilmiştir.

Önerilen karar verme yaklaşımının desteklenmesi açısından vaka analizinde kullanılan iş programına minimum moment algoritması yaklaşımı ile de kaynak dengelemesi uygulanmıştır. Kaynak dengeleme sonrasında elde edilen iş programının toplam bolluk miktarı 22 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, karar verme yaklaşımı için asıl olarak dikkate alınacak denklem (3.9)'da belirtilen amaç fonksiyon değeri 102

olarak hesaplanmıştır. Bu durum kaynak dengeleme sonrasında iş programında %8.92'lik bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda, tez kapsamında geliştirilen modelin, denklem (3.9)'daki amaç fonksiyonu için, minimum moment algoritması yaklaşımı ile elde edilen iş programından daha fazla iyileşme sunduğu görülmüştür. Aynı zamanda önerilen karar verme yaklaşımı sonucunda seçilen, iş programı toplam bolluk miktarı 21 olan iş programının minimum moment algoritması yaklaşımı ile elde edilen iş programının toplam bolluk miktarına çok yakın olduğu görülmüştür.

Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, önerilen karar verme yaklaşımının, sorunsuz bir kaynak histogramı sağlarken aynı zamanda iş programı esnekliğini koruduğu anlaşılmıştır. İnşaat profesyonelleri için iş programı esnekliği, beklenmedik durumlarla karşılaşıldığında proaktif karar verme ve kaynak yönetimi sağlayarak proje hedeflerini korurken gereken ayarlamaların yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, kaynak dengeleme sonrası iş programlarının toplam bolluk miktarlarına ve minimum amaç fonksiyonuna göre planlanması, planlama mühendislerine uygun iş programı seçimi için karar verme sürecini kolaylaştıracaktır. Bu tez kapsamında sunulan karar verme yaklaşımı, planlama mühendislerine en uygun iş programını seçme konusunda detaylı bir bakış açısı sunarak karar alma sürecini kolaylaştırmaktadır. Bu yaklaşım, planlama mühendislerinin daha etkili bir şekilde proje yönetmelerine yardımcı olacaktır.

Tez kapsamında önerilen model, daha etkin bir şekilde kullanılması için gelişime açıktır. Bu gelişime katkı sağlayacak bazı öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Kaynak dengeleme modeline, kaynak dengeleme sürecinde toplam bolluğun kullanım kısıtı gibi farklı kısıtlar dahil edilebilir.
- İleride yapılacak çalışmalarda birden fazla kaynak türü seçilerek ve bu yönde model geliştirilerek, projeler için daha kapsamlı veriler elde edilebilir.
- Kaynak kullanım kısıtı konularak iş programlarının model tarafından bu doğrultuda oluşturulması sağlanabilir.
- Oluşan iş programı kombinasyonlarından en uygununu seçmek için toplam bolluk miktarı ile aynı anda değerlendirilebilecek ek kriterler dikkate alınabilir.



KAYNAKLAR

- Adeli, H., & Park, H. S.** (1995). Optimization of space structures by neural dynamics. *Neural networks*, 8(5), 769-781.
- Adeli, H., & Park, H. S.** (1996). Hybrid CPN–neural dynamics model for discrete optimization of steel structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 11(5), 355-366.
- Adeli, H., & Park, H. S.** (1998), *Neurocomputing for design automation*, CRC, Boca Raton, Fla.
- Ahuja, H. N.** (1976). *Construction performance control by networks*. John Wiley and Sons, New York, USA
- Alagha, E., Bin Mahmoud, A., & Altuwaim, A.** (2021). An enhanced linear project resource utilization based on line of balance technique. In *Pipelines 2021* (pp. 49-57).
- Alsayegh, H., & Hariga, M.** (2012). Hybrid meta-heuristic methods for the multi-resource leveling problem with activity splitting. *Automation in Construction*, 27, 89-98.
- Ammar, M. A.** (2020). Resource optimisation in line of balance scheduling. *Construction Management and Economics*, 38(8), 715-725.
- Anagnostopoulos, K. P., & Koulinas, G. K.** (2010). A simulated annealing hyperheuristic for construction resource levelling. *Construction management and economics*, 28(2), 163-175.
- Andreotti, L.** (1977). *Coordinating construction projects: modern organization theory applied to project management*. (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology.
- Atan, T., & Eren, E.** (2018). Optimal project duration for resource leveling. *European Journal of Operational Research*, 266(2), 508-520.
- Aziz, R. F., Hafez, S. M., & Abuel-Magd, Y. R.** (2014). Smart optimization for mega construction projects using artificial intelligence. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 591-606.
- Baviskar, M. S. R., & Bhangale, M. P. P.** (2014). Applying Re Modified Minimum Moment Method to Construction Projects India in. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(11), 22-26.
- Behnam, A., Harfield, T., & Kenley, R.** (2016). Construction management scheduling and control: The familiar historical overview. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 66, p. 00101). EDP Sciences.

- Benjaoran, V., Tabyang, W., & Sooksil, N.** (2015). Precedence relationship options for the resource levelling problem using a genetic algorithm. *Construction management and economics*, 33(9), 711-723.
- Burgess, A. R., & Killebrew, J. B.** (1962). Variation in activity level on a cyclical arrow diagram. *Journal of Industrial Engineering*, 13(2), 76-83.
- Christodoulou, S., Ellinas, G., & Aslani, P.** (2009). Entropy-based scheduling of resource-constrained construction projects. *Automation in Construction*, 18(7), 919-928.
- Christodoulou, S. E., Ellinas, G., & Michaelidou-Kamenou, A.** (2010). Minimum moment method for resource leveling using entropy maximization. *Journal of construction engineering and management*, 136(5), 518-527.
- Cynthia, O. U.** (2020). Implementation of Project Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM): A Comparative Study. *International Journal of Industrial and Operations Research*, 3(004).
- Damcı, A., Arditi, D., & Polat, G.** (2013a). Resource leveling in line-of-balance scheduling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(9), 679-692.
- Damcı, A., Arditi, D., & Polat, G.** (2013b). Multiresource leveling in line-of-balance scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(9), 1108-1116.
- Damcı, A., & Polat, G.** (2014). Impacts of different objective functions on resource leveling in construction projects: a case study. *Journal of civil engineering and management*, 20(4), 537-547.
- Damcı, A., Arditi, D., & Polat, G.** (2016). Impacts of different objective functions on resource leveling in line-of-balance scheduling. *KSCE journal of civil engineering*, 20, 58-67.
- Damcı, A., Polat, G., Akin, F. D., & Turkoglu, H.** (2019). Resource levelling with float consumption rate. In *Proceedings of the Creative Construction Conference* (pp. 597-602).
- Damcı, A., Polat, G., Akin, F. D., & Turkoglu, H.** (2022). Use of float consumption rate in resource leveling of construction projects. *Frontiers of Engineering Management*, 1-13.
- Doulabi, S. H. H., Seifi, A., & Shariat, S. Y.** (2011). Efficient hybrid genetic algorithm for resource leveling via activity splitting. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(2), 137-146.
- Dubey, A.** (1993). *Resource leveling and linear scheduling* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Easa, S. M.** (1989). Resource leveling in construction by optimization. *Journal of construction engineering and management*, 115(2), 302-316.
- El-Sayegh, S.** (2018). Resource levelling optimization model considering float loss impact. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(5), 639-653.

- Elwany, M. H., Korish, I. E., Barakat, M. A., & Hafez, S. M.** (1998). Resource smoothening in repetitive projects. *Computers & industrial engineering*, 35(3-4), 415-418.
- Gwak, H. S., & Lee, D. E.** (2021). Stochastic resource leveling optimization method for trading off float consumption and project completion probability. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(8), 1013-1033.
- Geng, J. Q., Weng, L. P., & Liu, S. H.** (2011). An improved ant colony optimization algorithm for nonlinear resource-leveling problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(8), 2300-2305.
- Georgy, M. E.** (2008). Evolutionary resource scheduler for linear projects. *Automation in Construction*, 17(5), 573-583.
- Hariga, M., & El-Sayegh, S. M.** (2011). Cost optimization model for the multiresource leveling problem with allowed activity splitting. *Journal of construction engineering and management*, 137(1), 56-64.
- Harris, F., McCaffer, R., Baldwin, A., & Edum-Fotwe, F.** (2021). *Modern construction management*. John Wiley & Sons.
- Harris, R. B.** (1978). Precedence and arrow networking techniques for construction, New York: Wiley.
- Harris, R. B.** (1990). Packing method for resource leveling (PACK). *Journal of construction engineering and management*, 116(2), 331-350.
- Hegazy, T.** (1999). Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*, 125(3), 167-175.
- Hegazy, T., & Ersahin, T.** (2001). Simplified spreadsheet solutions. II: Overall schedule optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(6), 469-475.
- Heon Jun, D., & El-Rayes, K.** (2011). Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling. *Journal of construction engineering and management*, 137(12), 1080-1088.
- Hiyassat, M. A. S.** (2000). Modification of minimum moment approach in resource leveling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(4), 278-284.
- Hiyassat, M. A. S.** (2001). Applying modified minimum moment method to multiple resource leveling. *Journal of construction engineering and management*, 127(3), 192-198.
- Iranagh, M. A., & Sonmez, R.** (2012). A genetic algorithm for resource levelling of construction projects. *Management*, 1047, 1054.
- Isidore, L. J., & Back, W. E.** (2002). Multiple simulation analysis for probabilistic cost and schedule integration. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(3), 211-219.

- Jun, D. H., & El-Rayes, K.** (2009). Multi-objective optimization of resource scheduling in construction projects. Samuel T. Ariaratnam Eddy M. Rojas (Editor), In *Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future* (pp. 806-815). Washington.
- Karaa, F. A., & Nasr, A. Y.** (1986). Resource management in construction. *Journal of construction engineering and management*, 112(3), 346-357.
- Kowacka, M., Skorupka, D., Bekisz, A., Dudziak-Gajowiak, D., & Duchaczek, A.** (2023). Modern management methods in the implementation of construction projects on the example of contingency plans. *Archives of Civil Engineering*, 69(2).
- Kyriklidis, C., Vassiliadis, V., Kirytopoulos, K., & Dounias, G.** (2014). Hybrid nature-inspired intelligence for the resource leveling problem. *Operational Research*, 14, 387-407.
- Leu, S. S., & Yang, C. H.** (1999). GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling. *Journal of construction engineering and management*, 125(6), 420-427.
- Leu, S. S., Yang, C. H., & Huang, J. C.** (2000). Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application. *Automation in construction*, 10(1), 27-41.
- Leu, S. S., & Hung, T. H.** (2002). An optimal construction resource leveling scheduling simulation model. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(2), 267-275.
- Lu, M., Lam, H. C., & Dai, F.** (2008). Resource-constrained critical path analysis based on discrete event simulation and particle swarm optimization. *Automation in construction*, 17(6), 670-681.
- Lu, M., & Li, H.** (2003). Resource-activity critical-path method for construction planning. *Journal of construction engineering and management*, 129(4), 412-420.
- Lucko, G.** (2011). Integrating efficient resource optimization and linear schedule analysis with singularity functions. *Journal of construction engineering and management*, 137(1), 45-55.
- Martinez, J. C., & Ioannou, P. G.** (1992). CPMlevel, resource leveling using the generalized minimum moment algorithm. *User's guide*, Univ. of Michigan
- Mattila, K. G., & Abraham, D. M.** (1998). Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. *Journal of construction engineering and management*, 124(3), 232-244.
- Ponz-Tienda, J. L., Yepes, V., Pellicer, E., & Moreno-Flores, J.** (2013). The resource leveling problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm. *Automation in Construction*, 29, 161-172.
- Popescu, C.** (1976). *How to use CPM in practice, Part II - resources*. Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, USA.
- Qiao, J., & Li, Y.** (2018). Resource leveling using normalized entropy and relative entropy. *Automation in Construction*, 87, 263-272.

- Razavi, N., & Mozayani, N. (2007).** A Resource Leveling Model Based On Genetic Algorithms: Activity Splitting Allowed. In *IMECS* (pp. 109-114).
- Sakka, Z. I., & El-Sayegh, S. M. (2007).** Float consumption impact on cost and schedule in the construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(2), 124-130.
- Selvam, G., & Tadepalli, T. C. M. (2019).** Genetic algorithm based optimization for resource leveling problem with precedence constrained scheduling. *International journal of construction management*, 1-10.
- Senouci, A. B., & Adeli, H. (2001).** Resource scheduling using neural dynamics model of Adeli and Park. *Journal of construction engineering and management*, 127(1), 28-34.
- Senouci, A. B., & Eldin, N. N. (2004).** Use of genetic algorithms in resource scheduling of construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 130(6), 869-877.
- Son, J., & Skibniewski, M. J. (1999).** Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach. *Journal of construction engineering and management*, 125(1), 23-31.
- Su, Z., Qi, J., & Wei, H. Y. (2015).** A float-path theory and its application to the time-cost tradeoff problem. *Journal of Applied Mathematics*, 2015, 1-17.
- Tang, Y., Sun, Q., Liu, R., & Wang, F. (2018).** Resource leveling based on line of balance and constraint programming. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(10), 864-884.
- Tawalare, A., & Lalwani, R. (2012).** Resource Leveling in Construction Projects using Re-Modified Minimum Moment Approach. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(2), 200-202.
- Tran, D. H., & Long, L. D. (2018).** Project scheduling with time, cost and risk trade-off using adaptive multiple objective differential evolution. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(5), 623-638.
- Wagner, H. M., Giglio, R. J., & Glaser, R. G. (1964).** Preventive maintenance scheduling by mathematical programming. *Management Science*, 10(2), 316-334.
- Waligóra, G. (2022, August).** Genetic algorithm for resource leveling problems under various objective functions. In *2022 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* (pp. 414-418). IEEE.
- Walker, A. (2015).** *Project management in construction*. John Wiley & Sons.
- Wang, Z., Hu, Z., & Tang, Y. (2020).** Float-based resource leveling optimization of linear projects. *IEEE Access*, 8, 176997-177020.
- Yan, Q., Zhang, Q., & Zou, X. (2016).** A cost optimization model for multiresource leveling problem without project duration constraint. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016.

- Yen, C. I.** (2005). *Simulated annealing for optimizing linear scheduling projects with multiple resource constraints* (Doctoral dissertation, Purdue University).
- Younis, M. A., & Saad, B.** (1996). Optimal resource leveling of multi-resource projects. *Computers & industrial engineering*, 31(1-2), 1-4.
- Zhang, L., Tang, Y., & Qi, J.** (2017). Resource leveling based on backward controlling activity in line of balance. *Mathematical problems in engineering*, 2017.



EKLER

EK A: Kaynak Dengeleme Modelinde İş Programı Modülü

EK B: Kaynak Dengeleme Modelinde Kaynak Dengeleme Modülü

EK C: Kaynak Dengeleme Modelinde Karar Verme Modülü

EK D: Minimum Moment Algoritması Modeli





EK A

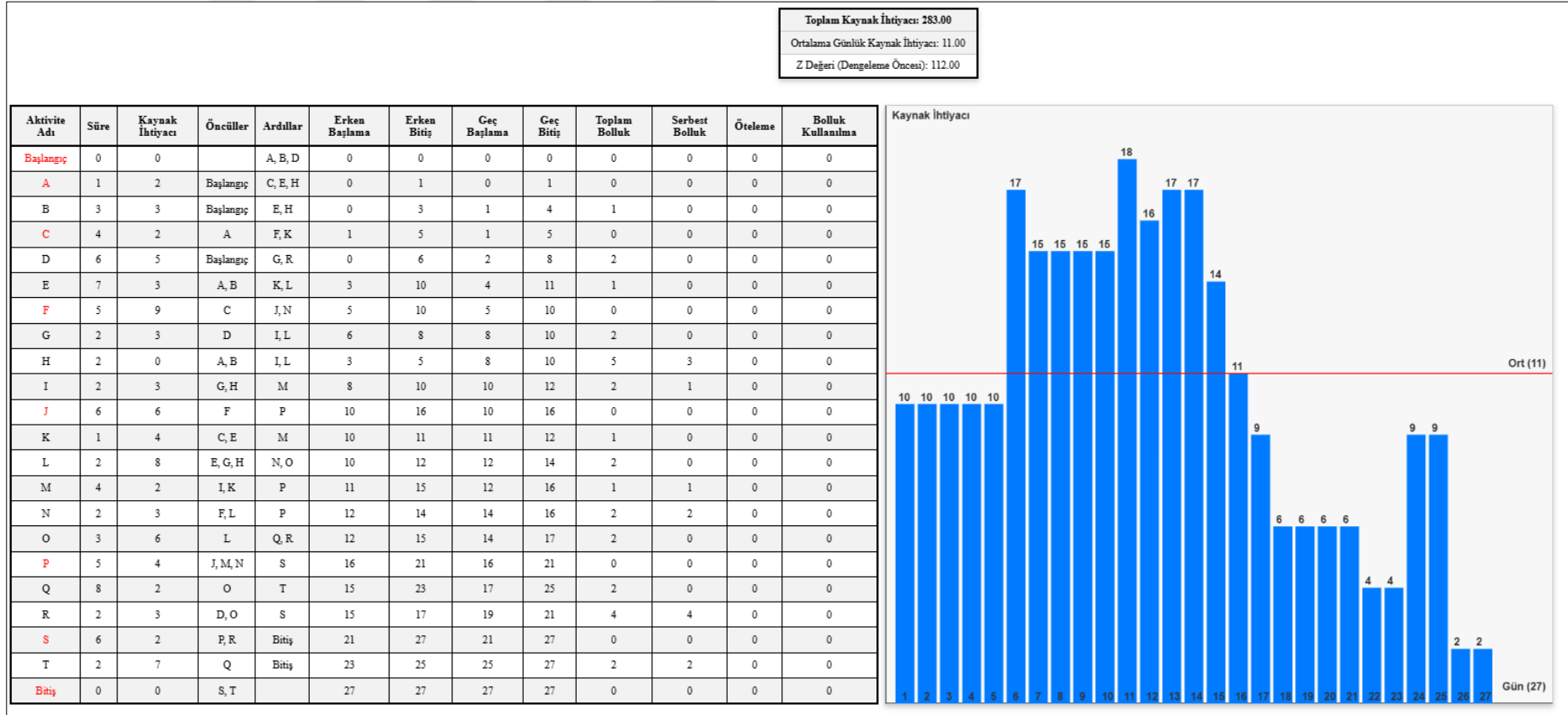
Kaynak Dengeleme Modelinde İş Programı Modülü

Veri Girişi
* Veriler girilirken ilk başta "Başlangıç" aktivitesi ve en son "Bitiş" aktivitesi yazılmamalıdır!
** Olmayan verilerin alanlarını boş bırakınız
*** Öncüllerin verileri girilirken öncüller arasında virgül kullanınız.

Aktivite Adı	Süre	Kaynak İhtiyacı	Öncüller
Başlangıç	0	0	
A	1	2	Başlangıç
B	3	3	Başlangıç
C	4	2	A
D	6	5	Başlangıç
E	7	3	A,B
F	5	9	C
G	2	3	D
H	2	0	A,B
I	2	3	G,H
J	6	6	F
K	1	4	C,E
L	2	8	E,G,H
M	4	2	I,K
N	2	3	F,L
O	3	6	L
P	5	4	J,M,N
Q	8	2	O
R	2	3	D,O
S	6	2	P,R
T	2	7	Q
Bitiş	0	0	S,T

[Sistemi Ekle](#) [Sistemi Çıkart](#) [Sayfayı Yenile](#) [ÇÖZ](#)

Şekil A.1 : İş programı modülü aktivite verisi giriş arayüzü.



Şekil A.2 : İş programı modülü CPM tablosu ve kaynak histogramı arayüzü.

EK B

Kaynak Dengeleme Modelinde Kaynak Dengeleme Modülü

```
▶ [200 ... 299]
▶ [300 ... 399]
▼ [400 ... 470]
▼ 400: Array(22)
▶ 0: {aktiviteAdı: 'Başlangıç', süre: 0, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(3), ...}
▼ 1:
  ▶ aktiviteAdı: "A"
  ▶ ardıllar: (3) ['C', 'E', 'H']
  ▶ erkenBaslama: 0
  ▶ erkenBitis: 1
  ▶ gecBaslama: 0
  ▶ gecBitis: 1
  ▶ kaynakİhtiyacı: 2
  ▶ kullanılanBolluk: 0
  ▶ serbestBolluk: 0
  ▶ süre: 1
  ▶ toplamBolluk: 0
  ▶ öncüller: ['Başlangıç']
  ▶ öteleme: 0
  ▶ [[Prototype]]: Object
▶ 2: {aktiviteAdı: 'B', süre: 3, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 3: {aktiviteAdı: 'C', süre: 4, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 4: {aktiviteAdı: 'D', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 5, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 5: {aktiviteAdı: 'E', süre: 7, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 6: {aktiviteAdı: 'F', süre: 5, kaynakİhtiyacı: 9, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 7: {aktiviteAdı: 'G', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 8: {aktiviteAdı: 'H', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 9: {aktiviteAdı: 'I', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 10: {aktiviteAdı: 'J', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 6, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 11: {aktiviteAdı: 'K', süre: 1, kaynakİhtiyacı: 4, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 12: {aktiviteAdı: 'L', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 8, öncüller: Array(3), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 13: {aktiviteAdı: 'M', süre: 4, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 14: {aktiviteAdı: 'N', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 15: {aktiviteAdı: 'O', süre: 3, kaynakİhtiyacı: 6, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
▶ 16: {aktiviteAdı: 'P', süre: 5, kaynakİhtiyacı: 4, öncüller: Array(3), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 17: {aktiviteAdı: 'Q', süre: 8, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 18: {aktiviteAdı: 'R', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 19: {aktiviteAdı: 'S', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 20: {aktiviteAdı: 'T', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 7, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
▶ 21: {aktiviteAdı: 'Bitiş', süre: 0, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(0), ...}
  id: 400
  length: 22
  ▶ [[Prototype]]: Array(0)
▶ 401: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 401]
▶ 402: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 402]
▶ 403: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 403]
▶ 404: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 404]
▶ 405: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 405]
▶ 406: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 406]
▶ 407: (22) [({}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}), id: 407]
```

Şekil B.1 : Kaynak dengeleme modülü iş programı kombinasyonları oluşturma süreci örneği.

```

▶ [100 ... 199]
▶ [200 ... 299]
▶ [300 ... 399]
▼ [400 ... 470]
  ▼ 400: Array(22)
    ▶ 0: {aktiviteAdı: 'Başlangıç', süre: 0, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(3), ...}
    ▶ 1: {aktiviteAdı: 'A', süre: 1, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(3), ...}
    ▶ 2: {aktiviteAdı: 'B', süre: 3, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 3: {aktiviteAdı: 'C', süre: 4, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 4: {aktiviteAdı: 'D', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 5, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 5: {aktiviteAdı: 'E', süre: 7, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 6: {aktiviteAdı: 'F', süre: 5, kaynakİhtiyacı: 9, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 7: {aktiviteAdı: 'G', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 8: {aktiviteAdı: 'H', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 9: {aktiviteAdı: 'I', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 10: {aktiviteAdı: 'J', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 6, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 11: {aktiviteAdı: 'K', süre: 1, kaynakİhtiyacı: 4, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 12: {aktiviteAdı: 'L', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 8, öncüller: Array(3), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 13: {aktiviteAdı: 'M', süre: 4, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 14: {aktiviteAdı: 'N', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 15: {aktiviteAdı: 'O', süre: 3, kaynakİhtiyacı: 6, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(2), ...}
    ▶ 16: {aktiviteAdı: 'P', süre: 5, kaynakİhtiyacı: 4, öncüller: Array(3), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 17: {aktiviteAdı: 'Q', süre: 8, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 18: {aktiviteAdı: 'R', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 3, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 19: {aktiviteAdı: 'S', süre: 6, kaynakİhtiyacı: 2, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 20: {aktiviteAdı: 'T', süre: 2, kaynakİhtiyacı: 7, öncüller: Array(1), ardıllar: Array(1), ...}
    ▶ 21: {aktiviteAdı: 'Bitiş', süre: 0, kaynakİhtiyacı: 0, öncüller: Array(2), ardıllar: Array(0), ...}
    BollukluAktivite: 10
    ErkenBolluklular: 7
    ToplamBolluk: 18
    Z1Değeri: 58
    Z2Değeri: 25
    Z3Değeri: 108
    Z4Değeri: 21
    Z5Değeri: 9
    Z6Değeri: 10
    Z7Değeri: 3575
    Z8Değeri: 308
    Z9Değeri: 616
    Z10Değeri: 12
    id: 400
    length: 22
    ▶ [[Prototype]]: Array(0)
    ▶ 401: (22) [{...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, id: 401, Z2Değeri:
    ▶ 402: (22) [{...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, id: 402, Z2Değeri:
    ▶ 403: (22) [{...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, {...}, id: 403, Z2Değeri:

```

Şekil B.2 : Kaynak dengeleme modülü iş programlarının kaynak histogramları için amaç fonksiyonları hesaplamalarının yürütülmesi.

EK C

Kaynak Dengeleme Modelinde Karar Verme Modülü

Özet Tabloyu Çıkar

Excel'e İndir

Kombinasyonlar

En Küçük Z3 Değerleri Sayısı: 9

Z Değerleri Tablosu

Z Değerleri Sıralama:

Download Data

Z3

Z1

Z2

Z4

Z5

Z6

Z7

Z8

Z9

Z10

ID	Histogram	CPM	Z3 Değeri	Z1 Değeri	Z2 Değeri	Z4 Değeri	Z5 Değeri	Z6 Değeri	Z7 Değeri	Z8 Değeri	Z9 Değeri	Z10 Değeri	CPM Toplam Bolluk	Bolluklu Aktiviteler	Erken Bolluklu Aktiviteler	Veriyi Çek
49	Çiz	CPM	90	37	18	18	7	7	3411	147	452	9	21	11	10	Veriyi Çek
250	Çiz	CPM	90	49	24	21	7	10	3447	225	488	12	19	11	10	Veriyi Çek
259	Çiz	CPM	90	37	18	18	7	7	3411	147	452	9	20	11	10	Veriyi Çek
267	Çiz	CPM	90	49	24	21	7	10	3447	213	488	12	20	11	10	Veriyi Çek
272	Çiz	CPM	90	39	19	18	7	7	3403	183	444	9	19	9	8	Veriyi Çek

Şekil C.1 : Karar verme modülü arayüzü.



EK D

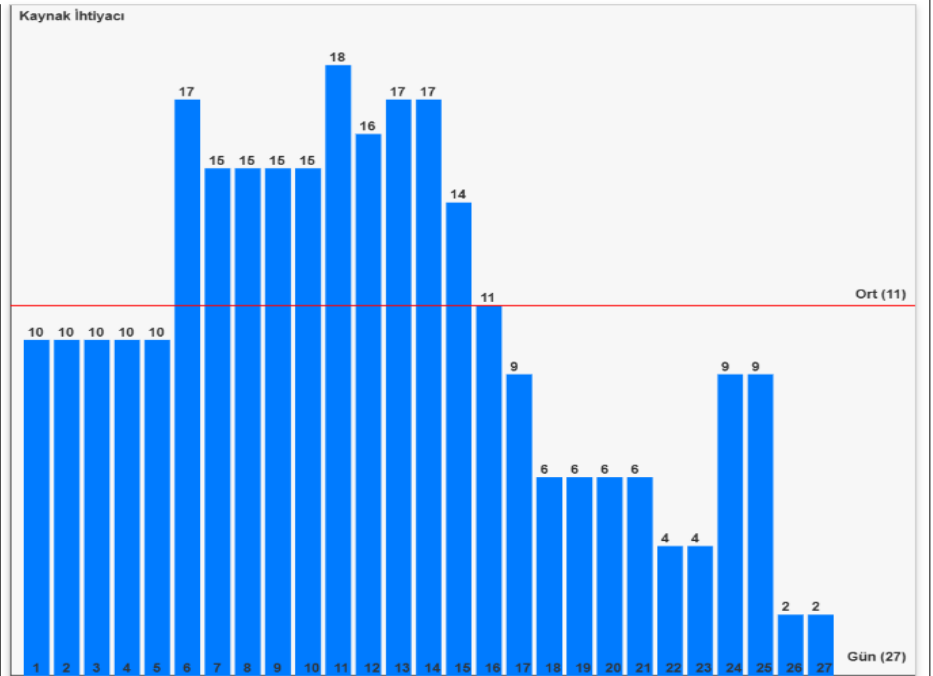
Minimum Moment Yöntemi Modeli

CPM Tablosu ve Kaynak İhtiyacı

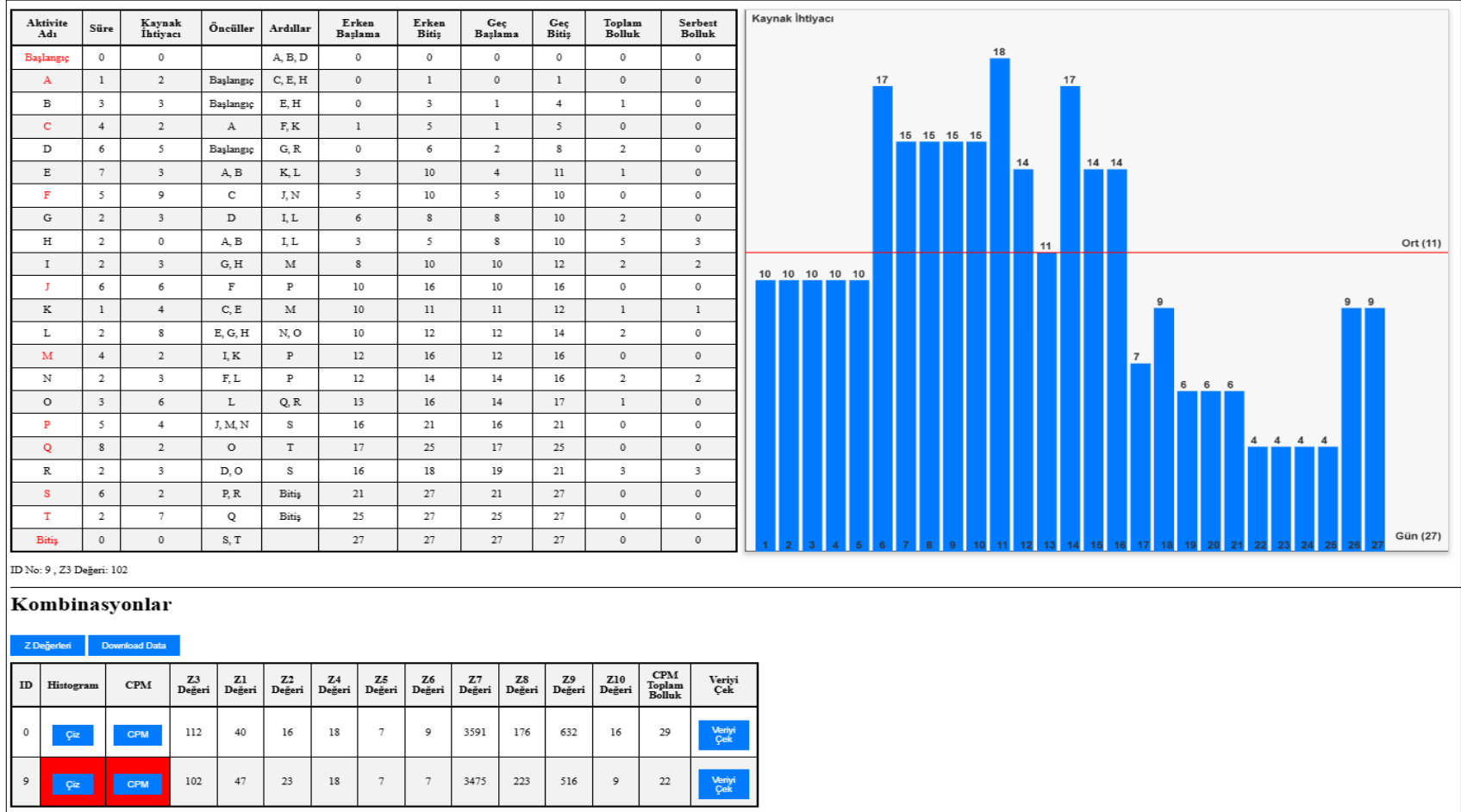
Kaynak Sıfır İleri İleri Kaynak Sıfır Geri Geri Z Değerleri Hesapla Konsol

Toplam Kaynak İhtiyacı: 283.00
Ortalama Günlük Kaynak İhtiyacı: 11.00
Z3 Değeri (Dengeleme Öncesi): 112.00

Aktivite Adı	Süre	Kaynak İhtiyacı	Öncüller	Ardıllar	Erken Başlama	Erken Bitiş	Geç Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk	Serbest Bolluk
Başlangıç	0	0		A, B, D	0	0	0	0	0	0
A	1	2	Başlangıç	C, E, H	0	1	0	1	0	0
B	3	3	Başlangıç	E, H	0	3	1	4	1	0
C	4	2	A	F, K	1	5	1	5	0	0
D	6	5	Başlangıç	G, R	0	6	2	8	2	0
E	7	3	A, B	K, L	3	10	4	11	1	0
F	5	9	C	I, N	5	10	5	10	0	0
G	2	3	D	I, L	6	8	8	10	2	0
H	2	0	A, B	I, L	3	5	8	10	5	3
I	2	3	G, H	M	8	10	10	12	2	1
J	6	6	F	P	10	16	10	16	0	0
K	1	4	C, E	M	10	11	11	12	1	0
L	2	8	E, G, H	N, O	10	12	12	14	2	0
M	4	2	I, K	P	11	15	12	16	1	1
N	2	3	F, L	P	12	14	14	16	2	2
O	3	6	L	Q, R	12	15	14	17	2	0
P	5	4	J, M, N	S	16	21	16	21	0	0
Q	8	2	O	T	15	23	17	25	2	0
R	2	3	D, O	S	15	17	19	21	4	4
S	6	2	P, R	Bitiş	21	27	21	27	0	0
T	2	7	Q	Bitiş	23	25	25	27	2	2
Bitiş	0	0	S, T		27	27	27	27	0	0



Şekil D.1 : Başlangıç iş programına ait aktivitelerin özelliklerinin ve kaynak histogramının gösterim arayüzü.



Şekil D.3 : Karar verme modülü arayüzü.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Oğuzhan TEMUR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ocak 2021-Mayıs 2021 tarihleri arasında Kozal Mühendislik Yapı San. Ve Tic. Ltd. Şti.`de teknik ofis ve saha mühendisi olarak çalıştı.
- 2023-2024 yılları arasında Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş.`de Proje Yönetim Ofisi bünyesinde Entegre Yönetim Sistemleri Mühendisi olarak çalıştı.
- 2024 yılı Ocak ayından itibaren Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş.`de Proje Yönetim Ofisi bünyesinde Sürdürülebilirlik ve İş Mükemmelliği Mühendisi olarak çalışmaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **O. Temur, A. Damcı, H. Türkoğlu, D. Arditi, S. Demirkeseen.** 2024. A Decision-Support System For Resource Leveling. Koç, K., Ulubeyli, S., Kıvrak, S. (Editör). *8th International Project and Construction Management Conference (IPCMC 2024)*. İstanbul, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **A. E. Keser, O. Temur, B. Koloğlu, K. Bayrak, B. Öngen, G. E. Gürcanlı.** 2022. A Simulation of Tunnel Operation Model Using Stroboscope. Budayan, C., Kıvrak, S., Ulubeyli, S. (Editör). *7th International Project and Construction Management Conference (IPCMC 2022)*. İstanbul, Türkiye.