

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında inşaat projelerinde karşılaşılan problemlerden biri olan Kaynak Dengeleme Problemi ele alınmış ve MATLAB yazılım programı kullanılarak daha önce yapılmış çalışmalara ilave edilen eklentiler ile çözüm yöntemi güncellenmiş ve güçlendirilmiştir.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösterici olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE' ye,

Çıktığım her yolda, attığım her adımda sevgisini ve emeğini daima hissettiğim fedakâr annem Habibe SAĞLAM'a, babam Erdoğan SAĞLAM'a, yolumu her daim aydınlatan ablam Kübra SAĞLAM'a, kardeşlerim Halenur SAĞLAM'a ve Emine Gülçin SAĞLAM'a,

Zorlu süreçlerde her zaman destekleyicim olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatıma dokunan; değiştiren, güzelleştiren, olduğum yerden daha ileriye gidecek, yükselecek motivasyonu ve gücü veren rahmetli koordinatörüm Sayın Hüseyin GÖKDEMİR' i sevgi ve saygıyla anıyorum.

Tuğba SAĞLAM
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Proje Verimliliğini Artırmak için Yeni Yaklaşımlar: Rao Serisi Optimizasyon Teknikleri ve Arşivleme Kontrolü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tayfun DEDE ‘nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/03/2023

Tuğba SAĞLAM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Literatür Taraması.....	2
1.3.1. Kesin Yöntemler.....	4
1.3.2. Sezgisel Yöntemler.....	5
1.3.3. Metasezgisel Yöntemler.....	6
1.4. Projenin Tanımı ve Özellikleri.....	10
1.5. Proje Başarısı.....	12
1.6. Yapı Sektöründe Proje Yönetimi ve Proje Başarısına Etkisi.....	13
1.7. Projenin ve Proje Kaynaklarının Planlanması.....	14
1.8. Kaynak Dengeleme Problemi.....	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	22
2.1. Rao Optimizasyon Yöntemi.....	22
2.2. Kaynak Dengeleme Probleminin Optimizasyon Tekniği ile Çözümü.....	25
2.3. Popülasyon Arşiv Kontrolü.....	26
2.4. Proje Verimliliği.....	28
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	30
3.1. 5 Aktiviteli Örnek.....	30
3.2. 11 Aktiviteli Örnek.....	36
3.3. 15 Aktiviteli Örnek.....	42
3.4. 20 Aktiviteli Örnek.....	49
3.5. 9 Aktiviteli Artena Projesi.....	56

4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
5.	KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

PROJE VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAK İÇİN YENİ YAKLAŞIMLAR: RAO SERİSİ
OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ VE ARŞİVLEME KONTROLÜ

Tuğba SAĞLAM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tayfun DEDE
2023, 71 Sayfa

Günümüzde inşaat sektörü milli kazançta büyük yer tutmakta ve her geçen gün önemli işlere imza atılmaktadır. İnşaat sektöründeki gelişmeler arttıkça gerçekleştirilen projelerin büyüklüğü ve karmaşıklığı da artmaktadır. Karmaşık projeler, projenin planlanması ve bu plana göre yönetilmesi zorluğunu doğurur. Büyük projelerde birçok disiplinden çok sayıda kaynak bir arada bulunur. Bu kaynakların proje süresince doğru şekilde kullanılması proje verimini artırarak maddi kazancın ve manevi hazzın bütün proje paydaşlarını memnun edecek düzeyde olmasını sağlar. Projelerdeki kaynak kullanımı öneminin anlaşılmasıyla kaynak kullanımındaki dalgalanmaları ifade eden Kaynak Dengeleme Problemi için çözüm önerileri geliştirilmiştir. En iyi sonuca ulaşmak amacıyla optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çözümler dalgalanmaların azalmasını ve kaynak kullanımının mümkün olduğunca sabit bir seviyede tutulmasını sağlamak böylece oluşacak ek maliyetlerin önüne geçmek amacıyla üretilmiştir.

Bu tez çalışmasında, MATLAB yazılım programında Rao optimizasyon algoritması kullanılarak geliştirilen bir model ile kısıtlı kaynağı bulunan inşaat projelerindeki kaynak dengeleme problemi çözülmüş, problem çözülürken işlem yükünü hafifletmek ve çözüm süresini kısaltmak amacıyla modele popülasyon arşiv kontrolü eklentisi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak Dengeleme Problemi, Rao Optimizasyon Algoritması, Popülasyon Arşiv Kontrolü, MATLAB

Master Thesis

SUMMARY

NEW APPROACHES TO INCREASING PROJECT EFFICIENCY: RAO SERIES
OPTIMIZATION TECHNIQUES AND ARCHIVE CONTROL

Tuğba SAĞLAM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tayfun DEDE
2023, 71 Pages

Today, the construction sector occupies a large place in national income and important works are carried out day by day. As the developments in the construction sector increase, the size and complexity of the projects realized increase as well. Complex projects pose the challenge of planning the project and managing it according to this plan. Large projects combine multiple resources from many disciplines. The correct use of these resources throughout the project increases the efficiency of the project and ensures that the financial gain and moral pleasure are at a level that will satisfy all project stakeholders. With the understanding of the importance of resource use in projects, solution proposals have been developed for the Resource Leveling Problem, which expresses the fluctuations in resource use. Solutions in which optimization methods are used in order to achieve the best results are produced in order to reduce fluctuations and to keep the resource usage at a constant level as much as possible, thus avoiding additional costs.

In this thesis, the resource leveling problem in construction projects with limited resources was solved with a model developed using the Rao optimization algorithm in the MATLAB software program, and population archive control was added to the model in order to alleviate the processing load and shorten the solution time while solving the problem.

Key Words: Resource Leveling Problem, Rao Optimization Algorithm, Population Archive Control, MATLAB

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. CPM ağ diyagramı	16
Şekil 2. CPM ağ diyagramında proje süresi	17
Şekil 3. CPM ağ diyagramında kritik yol	18
Şekil 4. Rao algoritması akış şeması	23
Şekil 5. Kaynak dengeleme probleminin optimizasyon tekniği ile çözümü	25
Şekil 6. Arşiv kontrollü popülasyon üretimi	27
Şekil 7. 5 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	32
Şekil 8. 5 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	33
Şekil 9. 5 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	34
Şekil 10. 5 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	34
Şekil 11. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları	35
Şekil 12. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	35
Şekil 13. 5 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi	36
Şekil 14. 11 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	38
Şekil 15. 11 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	39
Şekil 16. 11 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	40
Şekil 17. 11 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	40
Şekil 18. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları	41
Şekil 19. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 20. 11 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi	42
Şekil 21. 15 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	44
Şekil 22. 15 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	45
Şekil 23. 15 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	46
Şekil 24. 15 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	46
Şekil 25. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları	47

Şekil 26. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
Şekil 27. 15 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi	48
Şekil 28. 20 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	51
Şekil 29. 20 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	52
Şekil 30. 20 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	53
Şekil 31. 20 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	53
Şekil 32. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları	54
Şekil 33. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Şekil 34. 9 aktiviteli Artena Projesi CPM ağ diyagramı	56
Şekil 35. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	58
Şekil 36. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları	59
Şekil 37. 9 aktiviteli Artena Projesi örnek kaynak dağılımı zaman matrisi	60
Şekil 38. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	61
Şekil 39. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri	61
Şekil 40. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları	62
Şekil 41. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	62

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Aktivite bilgileri	17
Tablo 2. CPM ağ diyagramıyla elde edilen aktivitelerin erken başlama, geç bitme ve toplam bolluk değerleri	17
Tablo 3. Arşiv kontrollü popülasyon üretim adımları	27
Tablo 4. 5 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları.....	31
Tablo 5. 11 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları.....	37
Tablo 6. 15 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları.....	43
Tablo 7. 20 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları.....	50
Tablo 8. 9 aktiviteli gerçek örnek aktivite bolluk miktarları	57

SEMBOLLER DİZİNİ

$\mathcal{C}_k$	: Çalışan işgücü kaynağı miktarı
H_k	: Harcanan işgücü kaynağı miktarı
N	: Aktivite numarası
R_{maks}	: Kaynak kullanım histogramındaki günlük maksimum kaynak miktarı
R_n	: Kaynak miktarı
T	: Proje süresi
t_n	: Aktivite süresi
V	: Verimlilik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat sektörü, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için ekonomik büyümede önemli bir rol oynamaktadır. Bu sektörünün mal ve hizmet üretimine katkısı ve işgücü kullanımıyla istihdam sağlaması ekonomik büyümedeki katkılarıdır. Rolü bu denli büyük olan bir sektörde başarının artırılmasıyla daha yüksek kazançlar elde edilmesi ülke ekonomisi ve prestiji için son derece değerlidir. Sektörün başarısı üretilen projelerle doğrudan alakalıdır. Bir inşaat projesinin başarısı ise fikir aşamasından somut bir yapıya dönüşmesine kadar geçen zaman boyunca gerçekleştirilen güçlü yönetim sürecine bağlıdır. Bu yönetim proje verimliliği temelleri üzerinde yükselir.

Geniş kapsamda mal ve hizmet üretiminde, girdi olarak tanımlanan sermaye, malzeme, enerji, işgücü, işgücüne bağlı bilgi ve tecrübenin ihtiyaç ve talepler doğrultusunda tatmin etme amacıyla etken ve etkili olarak kullanılması olarak tanımlanan verimlilik, matematiksel olarak bir süreçte kullanılan girdilere karşı elde edilen çıktıların ölçüsü olarak ifade edilir (Yılmaz, 2019). Yüksek verimlilik ise aynı girdilere karşı daha fazla çıktı almak; aynı çıktıyı alabilmek için daha az girdi kullanmak ya da daha az girdiyle daha fazla çıktı elde etmek anlamlarına gelir. İnşaat sektöründe verimlilik önemli bir yer tutmakta ve inşaat projelerinde yüksek verim hedeflenmektedir. Bu hedefe, her biri kendine özgü olan projelerin yine kendilerine özgü planlama ve proje yönetim tekniklerinin başarılı bir şekilde yürütülmesiyle ulaşılabilir.

İnşaat projelerinde kaynak kullanımının; ekonomik şartlar, fiziksel kısıtlar (çalışma alanı, yetkin işgücü sayısı gibi), teknolojik alt yapının yetersiz olmasından dolayı sınırlı tutulması, verimliliğin bu mevcut sınırlı kaynakların kullanımına bağlı olması Kaynak Dengeleme Problemi'ni doğurmaktadır. Kaynak Dengeleme Problemi bir projenin başlangıç tarihinden bitiş tarihine kadar kullanılan kaynaklarda (işgücü, ekipman, malzeme vb.) yaşanan dalgalanmaları ifade eder. Bu dalgalanmaların proje süresinde uzamaya neden olmadan en aza indirilmesiyle proje verimliliğinin artırılması sağlanır. Kaynak Dengeleme Problemi için 1900'lü yılların sonlarından günümüze kadar en uygun çözüme ulaşmayı

hedefleyen birbirinden farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler literatür taraması başlığı altında belirtilmiş ve kısaca açıklanmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı bir inşaat projesindeki kaynakların (malzeme, ekipman, makine kullanımı, iş gücü vb.) kullanımını daha etkin yaparak proje ömrü boyunca kaynak sayısının dengede tutulmasıyla verimliliği sağlamak, maliyeti azaltmak ve böylece proje başarısını artırmaktır. Çalışma kapsamında, kaynak dengeleme sürecinde projede yalnızca tek tip kaynak kullanımı dikkate alınıp Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmaları ile optimizasyon yapılmıştır. Popülasyon arşiv kontrolü olarak adlandırılan yeni bir eklenti ile işlem yükü hafifletilmeye ve çözüm süresi kısaltılmaya çalışılmıştır. Kaynak dengeleme probleminde kullanılan Rao serisi optimizasyon teknikleri ve sözü edilen arşiv kontrollü yaklaşım için MATLAB yazılımında bir program geliştirilerek literatür örnekleri ve gerçek zamanlı bir iş programında kaynakların kullanımı optimize edilmiştir.

Birinci bölümde proje kavramı üzerinde durulmuş, proje yönetimi ve kaynak planlaması gibi proje başarısına etki eden faktörlere değinilmiş, proje başarısı önündeki en büyük engellerden biri olan kaynak dengeleme problemi ve bir çözüm yöntemi olarak geliştirilen Rao optimizasyon algoritması açıklanmıştır.

İkinci bölümde kaynak dengeleme problemi için MATLAB yazılım programında oluşturulan matematiksel model anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde geliştirilen bilgisayar programıyla elde edilen sonuçlar görselleştirilerek sunulmuştur.

Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmış, aynı konu ile ilgili gelecek araştırmalara fikir verilmesi amacıyla öneriler sunulmuş ve tez çalışması sonlandırılmıştır.

1.3. Literatür Taraması

Bir projenin başarıyla (belirlenen süre içinde hesaplanan maliyet ve istenen kaliteyle) sonuçlanması için proje süresi boyunca sürecin çok iyi yönetilmesi gerekir. Sürecin iyi yönetilmesinin yolu ise mevcut kaynakların iyi yönetilmesine ve maksimum verimlilikle kullanılmasından geçer. Kaynak yönetimi için proje başlamadan önce uygun şekilde

kaynak tahsisi yapılmalıdır. Kaynak Tahsisi, proje süresi boyunca ihtiyaç duyulan tüm kaynakların ihtiyaç anında mevcut olmasını sağlamaktır. Fakat kaynak tahsisi projenin başarıya ulaşmasında tek başına yeterli bir çözüm değildir. Buna ek olarak kaynak dengelemesi (tesviyesi/seviyelendirmesi) de yapılmalıdır. Kaynak Dengeleme, proje süresi boyunca bu süreyi uzatmadan kaynak kullanım diyagramındaki zirveleri düşürmeyi, kaynak tüketim miktarını yumuşatmayı ve dalgalanmaları azaltarak eşit akışlı, dikdörtgene yakın bir histogram elde etmeyi amaçlayan çalışmadır.

Kaynak Dengeleme Problemi'nin çözümüne optimizasyon algoritmaları temel oluşturur. Optimizasyon, en yalın tanımıyla uygun hale getirmek kelimesi, mühendislik alanında; ortaya çıkan problemin sınırsız olmayan mevcut kaynaklarla (insan, ekipman, malzeme, zaman, hammadde vb.) belirlenen bir amaç doğrultusunda (minimum maliyet ve zaman, maksimum kar vb.) en iyi çözüme ulaşma çabasına verilen isimdir. Matematiksel olarak bir amaç fonksiyonunu belli kısıtlar altında minimum ya da maksimuma ulaştıracak değerin belirlenmesi şeklinde ifade edilebilir.

Bir optimizasyon probleminde 3 temel kavramın varlığından söz edilir (Pehlivan, 2017).

1)Amaç Fonksiyonu: Belirlenen problemin çözümü için (hedeflenen duruma göre maksimum ya da minimum değere ulaştıracak) en uygun tasarımı fonksiyonu ifade eder. Amaç fonksiyonu diğer tasarımlardan daha ekonomik, etkin ve güvenilir olmalıdır.

2)Tasarım Değişkeni: Tasarlanan amaç fonksiyonunu sonuca ulaştıracak sayısal değişkenlerdir. Bu değişkenin alacağı değerlere bağlı olarak tasarım fonksiyonu da farklılık gösterir.

3)Tasarım Kısıtları: Tasarım değişkenlerinin sınırlarını belirleyen şartlardır.

Optimizasyon modeli, mevcut bir problemin gerçek değerlerle çözülmesinin çok zor ya da imkânsız olduğu durumlarda, problemin matematiksel olarak çözülebilir bir hale yakınsanması olayıdır. Böylece problemlerin çözümlerinin etkin, doğru ve gerçek zamanlı olmasını sağlarken karar alma sürecini hızlandırır ve karar kalitesini artırır (Türkay, 2011).

Kaynak Dengeleme Problemi'nin çözümüne yönelik çalışmalar üç ana kategoriye ayrılır:

- 1)Kesin Yöntemler
- 2)Sezgisel Yöntemler
- 3)Metasezgisel Yöntemler

1.3.1. Kesin Yöntemler

Kesin yöntemler sebep-sonuç ilişkisi temeline dayanan ve belli nedenlerin belli sonuçları doğuracağı kabulüyle hareket eden bir yöntemdir (Pehlivan, 2017). Kesin yöntemler ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Çalışmaların bu denli kısıtlı olmasının sebebi kesin yöntemlerin diğer yöntemlere oranla daha uzun hesaplama süresi ve daha yüksek hesaplama maliyeti gerektirmesidir. Aynı zamanda problemlerin büyüklüğü ve karmaşıklığı karşılaştırıldığında genellikle daha az karmaşık olan küçük ağların çözümüne odaklanmış olmasıdır (Albayatı, 2021; Erzurum, 2019).

Kaynak dengeleme probleminin çözümüyle ilgili olarak Agin (1966) dal ve sınır algoritmasının genel bir tanımını yaparak ana özelliklerini açıklamıştır. Öncü çalışmalardan bir diğeri ise Mason ve Moodie (1971) tarafından sunulan maliyet minimizasyonuna ve kaynak kullanımına odaklanan dal ve sınır algoritmasıdır. Karaa ve Nasr (1986) projenin yaşam döngüsü boyunca optimum kaynak kullanımına dayalı planlamayı esas alan, Easa (1989) proje süresince kaynak talebinden sapmaları minimize eden, Karshenas ve Haber (1990) proje maliyetini ve süresini en aza indiren tamsayılı doğrusal programlama modelleriyle kesin yöntemlerin gelişimine katkıda bulunmuştur. Demeulemeester ve Herroelen (1992) aktivite önceliği ve kaynak sayısı kısıtları altında proje süresini azaltmayı hedefleyen bir dal ve sınır algoritması geliştirmiştir. Bandelloni vd. (1994) dinamik olmayan programlama modeli üzerinde çalışmış ve çalışma sonunda doğrusal tamsayılı programlama modeline oranla hesaplama süresinin daha az olduğu sonucuna ulaşmıştır. Younis ve Saad (1996) geliştirdikleri matematiksel modelle proje kaynak kullanımını tekli ya da çoklu olarak ele alıp kaynak kullanımını optimize etmiştir. Mattila ve Abraham (1998) ile Elwany vd. (1998) doğrusal projelerin kaynaklarının dengelenmesi için doğrusal tam sayılı programlama yöntemini kullanmıştır. Nübel (2001) geliştirdiği dal ve sınır algoritmasıyla kaynak kiralama problemine çözüm getirmiştir. Son ve Mattila (2004) literatürde ilk kez faaliyetlerin bölünmesi yoluyla kaynak dengeleme modeli sunmuştur. Tüm faaliyetlerin bölünmesi (durdurulup yeniden başlatılması) durumunda en iyi çözüm bulunmuştur. Mutlu (2010) tek ve çok kaynaklı problemler için dört farklı amaç fonksiyonu tanımlayarak bir dal ve sınır algoritması geliştirmiştir. Yeniocak (2013) kaynak dengeleme probleminin çözümünde ilk kez aktivite seçim yöntemlerinin sunulduğu birbirinden farklı amaç fonksiyonlarını çözebilen dal ve sınır algoritması tabanlı karma tam sayılı modeli geliştirmiştir. Ponz-Tienda vd. (2017) bulut

bilişim ve çok çekirdekli ağ bilişiminden yararlanılan bir paralel dal ve sınır algoritması önermiştir. Atan ve Eren (2018) karma tam sayılı doğrusal ve ikinci dereceden modeller kullanarak minimum proje süresini en iyi kaynak profiliyle elde etmiştir. El-Sayegh (2018) de matematiksel formüller ile kritik olmayan aktiviteleri kaydırarak çözümler üretmiştir. Erzurum (2019) Hesap Cetveli Uygulaması adını verdiği küçük ve orta ölçekli projeler için en uygun iş programını tüm arama uzayını tarayarak elde eden yöntemi geliştirmiş ve böylece bu ölçekteki projeler için makul hesaplama süresinde kaynak dengeleme probleminin tam sonucunu elde etmiştir.

1.3.2. Sezgisel Yöntemler

Kesin yöntemler kaynak dengeleme probleminin çözümünde optimum sonuca ulaşsa da büyük ölçekli projeler için uzun uğraşlar gerektirmesi nedeniyle araştırmacılar sezgisel yöntemlere yönelmiştir. Sezgisel yöntemler büyük oranda tecrübeye ve deneme-yanılmaya bağlı olduğundan çözüme hızlıca ulaşmayı sağlar fakat en iyi çözümü bulmayı garanti etmez (Pehlivan, 2017).

Sezgisel yöntemlere ait ilk çalışmanın Burgess ve Killebrew (1962) tarafından kritik olmayan aktivitelerin başlangıç tarihlerinin aktivite öncelikleri dikkate alınarak kaydırılmasıyla yapıldığını Albayrı (2021) belirtmiştir. Woodworth ve Willie (1975) farklı kombinasyonlara sahip aktivite başlangıç tarihlerinin sıralanmasıyla ilgili bir çalışma yürütmüştür. Harris (1990) kaynak dengeleme probleminin çözümünde PACK adını verdiği kritik aktivitelerin minimum kaynak ihtiyacını dikkate alarak Minimum Moment Algoritmasını geliştirmiştir. Bu algoritma, günlük kaynak kullanım diyagramı için bir moment değeri bulunabileceğini ve günlük momentlerin ayrı ayrı toplamının tüm kaynak diyagramının momentini olduğunu varsaymıştır. Her adımda, diyagram momentinde maksimum azalma sağlayan kaydırmalar seçilerek elde edilen kaynak diyagramı momentinin başlangıç değerinden daha düşük bir değere sahip olması gerektiğini vurgulamıştır. Neumann ve Zimmermann (1999) kaynak kısıtlarını göz önünde bulunduran ve önceliklere dayalı bir yöntem sunmuştur. Hiyassat (2000) minimum moment yaklaşımında hesaplamaları önemli ölçüde düşüren faaliyetlerin kaynak oranına göre dağıtılmasına dayalı bir değişiklik getirmiştir. Yine Hiyassat (2001) birden çok kaynağın dengelenmesi için bir yöntem sunmuştur. He ve Zang (2013) öncelik kuralına dayalı ileri-geri sezgisel yöntemler ortaya koymuştur. Li ve Dong (2018) çok modlu kaynak

dengeleme problemi üzerinde durmuş ve mod bağımlı genelleştirilmiş öncelik ilişkileri incelemiştir. Albayati (2021) Microsoft Project Professional 2019, Primavera P6 Professional 2019 ve Asta Powerproject sürüm 15.0.01.489 olmak üzere üç yazılım paketinin son sürümleriyle çözülen örnek problemlerin sonuçları ile aynı problemlerin Seri Planlama Şeması yöntemiyle elde edilen sonuçlarını karşılaştırmıştır. Orozbaev (2022) günlük kaynak kullanım sayısını minimize etmek amacıyla MATLAB yazılım programında Jaya algoritması kullanarak rastgele bir başlangıç popülasyonu ile başlayıp en kötü sonuçtan uzaklaşarak en iyi sonuca yaklaşan bir model geliştirmiştir.

1.3.3. Metasezgisel Yöntemler

Kesin ve sezgisel yöntemlere ek olarak bu yöntemlerin çözümde yetersiz olduğu daha zor ve karmaşık optimizasyon problemlerinde yüksek seviyeli metasezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Metasezgisel yöntemler, diğerlerine göre çözüme daha hızlı ve kolay ulaşması, kesin yöntemlerin gerçek problemleri basitleştirmesi, dolayısıyla kabul edilebilir hesaplama çabasıyla optimal çözümler sunmada yararlı olmaması ve sezgisel yöntemlerin optimal olmaktan uzak çözümler sunması ve nedeniyle tercih edilmektedir (Ponz-Tienda, 2013). Genellikle doğadan ilham alınarak ortaya çıkarılan metasezgisel yöntemlerle ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmıştır.

Chua vd. (1996) minimum kaynak boşa beklemesi için mevcut kaynak profiline göre en uygun aktivite programlarını üretebilen genetik algoritma modeli sunmuşlardır. Kartam ve Tongthong (1998) günlük kaynak kullanım seviyesini kontrol eden yapay sinir ağı temelli bir hareket denklemine dayanan model geliştirmiştir. Hareket denklemi, program kısıtlamaları dahilinde kaydırılacak faaliyetleri yönetirken, rekabet süreci, optimum sonuçlara ulaşmak için faaliyetler için en iyi konumları bulur. Hegazy (1999) zaman-maliyet değiş tokuşu optimizasyonu için projeye özgü zaman ve maliyet kısıtlarını da hesaba katarak toplam maliyeti bir amaç fonksiyonu olarak en aza indirmeyi amaçlayan evrim tabanlı bir model geliştirmiştir. Leu vd. (1999) hem belirsiz faaliyet süresini hem de kaynak kısıtlamalarının etkisini hesaba katıldığı genetik algoritma tabanlı bir model geliştirmiştir. Bu modelle belirsiz bir ortamda minimum proje süresi hedefi ile sınırlı kaynakları proje faaliyetlerine en uygun şekilde tahsis edilmesini sağlamıştır. Son ve Skibniewski (1999) yerel optimize edici adı verilen sezgisel bir model ve yerel optimize edici ile benzetilmiş tavlama'yı birleştiren hibrit bir model geliştirmiş ve hesaplama

sonuçlarıyla bu buluşsal modellerin oldukça iyi çözümler ürettiğini, karmaşık çizelgeleme ağları için uygulanabilir yaklaşımlar olduğunu göstermiştir.

Leu vd. (2000) birden çok inşaat kaynağının optimum veya yakın optimum kombinasyonunun sağlanması için bir karar destek sistemi örneği geliştirmiştir. Jeetendra vd. (2000) kaynak seviyelendirmede petri ağı algoritmasının faydalarını belirtmiş ve bu uygulama alanında kullanılması için petri ağlarına yönelik uzantılar önermiştir. Hegazy ve Erşahin (2001) uygulamacılar tarafından kolaylıkla kullanılabilecekleri kritik yol ağ programlamasını zaman-maliyet takas analizi, kaynak tahsisi, kaynak seviyelendirmesi ve nakit akış yöntemi ile bütünleşen bir elektronik tablo tabanlı bir model geliştirmiştir. Wang ve Zheng (2001) genetik algoritmayı ve simüle edilmiş tavlama makul bir şekilde birleştiren hibrit bir algoritma önermiştir. Zheng vd. (2003) çoklu kaynaklı kaynak seviyelendirme problemi için her kaynağa bir öncelik atanacak şekilde çok amaçlı genetik algoritma önermiştir. Bu modelde farklı kaynaklar arasındaki arama baskısını dengeleyerek optimizasyon sürecinde yalnızca bir kaynağın hakimiyetini etkili bir şekilde önlemiştir. Senouci ve Eldin (2004)'nin tüm öncelik ilişkilerini, çoklu ekip stratejilerini, toplam proje maliyeti minimizasyonu ve zaman-maliyet ödünleşimini göz önünde bulunduran ve kaynak dengeleme problemini kısıtlanmamış bir probleme dönüştürerek kaynak seviyelendirme ve kaynak kısıtlamalı çizelgelemeyi aynı anda gerçekleştiren bir model sunmuştur. Razavi ve Mozayani (2007) belirlenen aktivitelerin durmasına ve yeniden başlamasına izin veren böylece aktivitelerin bölünmesine izin vermeyen geleneksel yöntemlere oranla daha iyi sonuç elde edilen genetik algoritma tabanlı bir model geliştirmiştir. Roca vd. (2008) sınırlı kaynakları ve çoklu hedefleri göz önünde bulunduran proje tamamlama süresinin en aza indirilmesini ve her bir kaynak kullanımının zaman içinde seviyelendirilmesini hedefleyen çok amaçlı bir genetik algoritma tabanlı optimizasyon modeli oluşturmuştur. Georgy (2008) doğrusal çizelgeleme yöntemi şeması altında doğrusal projelerde gerekli kaynak çizelgeleme görevini gerçekleştirmek için genetik algoritma tabanlı bir sistem sunmuştur.

El-Rayes ve Jun (2009) kaynak dalgalanmalarının inşaat üretkenliği ve maliyeti üzerindeki olumsuz etkisini doğrudan ölçmek ve en aza indirmek için iki yenilikçi kaynak seviyelendirme metriğinin gelişimini sunmuştur. İlk metrik, düşük talep dönemlerinde geçici olarak serbest bırakılması ve yüksek talep dönemlerinde yeniden işe alınması gereken toplam kaynak miktarını nicelleştirirken ikinci metrik istenmeyen kaynak dalgalanmalarından kaynaklanan âtıl ve üretken olmayan kaynak günlerinin toplam sayısını ölçer. İki yeni metrik, kaynak kullanımının verimliliğini en üst düzeye çıkaran

optimum ve pratik çizelgeler oluşturabilen sağlam ve pratik bir optimizasyon modeline dahil edilerek istenmeyen kaynak dalgalanmalarını ve kaynak boşa kalma süresini ortadan kaldıracabildiğini göstermiştir. Jun ve El-Rayes (2011) tüm öncelik ilişkileri ve kaynak kullanılabilirliği kısıtlamalarına uyarken kaynak kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve proje süresini en aza indirmek için istenmeyen kaynak dalgalanmalarını ölçekbilen ve en aza indirebilen bir yeni çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirmiştir. Karar değişkenleri için alt ve üst sınırları hesaplayan bir başlangıç modülü, pratik çizelgeler oluşturan ve performanslarını değerlendiren bir çizelgeleme modülü ve optimal programları arayan ve tanımlayan çok amaçlı bir genetik algoritma modülü olmak üzere üç ana modül içeren model, inşaat planlamacıları tarafından kullanımını ve benimsenmesini kolaylaştırmak için piyasada bulunan bir yazılım sistemine entegre edilmiştir. Yine Jun ve El-Rayes (2011) büyük ölçekli inşaat projeleri için hızlı ve doğru risk değerlendirmesi sağlayan yeni bir olasılık çizelgeleme modelinin geliştirilmesini sunmuştur.

Anagnostopoulos ve Koulinas (2010) daha iyi seviyelendirilmiş kaynak kullanım diyagramı oluşturmak için benzetilmiş tavlama tabanlı metasezgisel bir yöntem önermiştir. Geng vd. (2011) geleneksel karınca kolonisi algoritmasından daha iyi sonuçlar veren yönlü karınca kolonisi algoritmasını kullanmıştır. Iranagh ve Sönmez (2012) kaynak dengeleme problemi için bir genetik algoritma geliştirmiş ve incelenen birkaç örnek proje için genetik algoritma ve Microsoft Project 2010'un performanslarını karşılaştırdığında genetik algoritmanın Microsoft Project 2010'un kaynak dengeleme sezgiselinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Alsayegh ve Hariga (2012) kaynak kullanımındaki değişkenlikten kaynaklanan toplam maliyetleri ve kritik olmayan faaliyetleri bölme maliyetinden kaynaklanan toplam maliyetleri en aza indirmek amacıyla çoklu kaynak seviyelendirme problemini ele almış ve kesin optimizasyon prosedüründen daha kısa hesaplama süresinde optimuma yakın proje çizelgeleri oluşturmak için parçacık sürüsü optimizasyonu ve benzetilmiş tavlama arama prosedürlerini birleştiren hibrit meta-sezgisel yöntemler önermiştir.

Ashuri ve Tavakolan (2012) daha az toplam proje maliyeti, daha az toplam proje süresi ve kaynak tahsisinde daha az toplam varyasyon ile daha iyi proje çizelgeleme çözümleri bulmada mevcut optimizasyon algoritmalarından üstün olduğu gösteren inşaat proje planlamasındaki karmaşık zaman-maliyet-kaynak optimizasyonu problemlerini diğer mevcut yöntemlerden daha hızlı çözen genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu ile hibrit bir algoritma önermiştir. Ashuri ve Tavakolan (2015) çok

değişkenli, zaman-maliyetli kaynak optimizasyonu problemini çözmek için sunduğu modelde aktivitelerin bölünmesine izin vererek proje planlamasındaki üç önemli hedef fonksiyonunun eşzamanlı optimizasyonunu yani toplam proje süresini, toplam proje maliyetini ve toplam kaynak tahsisi varyasyonunu en aza indirmeyi amaçlamıştır.

Ponz-Tienda vd. (2013) kaynak dengeleme problemi için genetik algoritma tabanlı bir model sunmuştur. Modelde proje son tarihinin bir ceza ile uzatılmasına izin vererek proje kritikliğinin artmasını önlemiştir. Önerilen algoritmayı, uygulayıcıların gerçekçi ortamlarda bir soruna farklı uygulanabilir çözümler arasında seçim yapmalarını sağlayan esnek ve güçlü bir karar destek sistemi sağlamak için VBA for Excel 2010 kullanarak uygulamıştır. Boushaala (2014) yalnızca kaynak kısıtını değil faaliyet maliyet kısıtını da dikkate alan proje ağındaki tüm faaliyetlerin iyi bir şekilde bağlantılı olduğunu doğrulamak üzere petri ağı tabanlı bir modelleme yaklaşımı önermiştir. Kaiafa ve Chassiakos (2015) aşırı kaynak kullanımının önlenmesi, proje bitiş tarihinin aşılmasının önüne geçilmesi, günlük kaynak kullanımındaki dalgalanmalar nedeniyle oluşan maliyetin en aza indirilmesi olan üç alt hedefin maliyet fonksiyonlarıyla temsil edilmesiyle tüm optimizasyon parametresini bir maliyet değişkeni olarak ifade etmiştir. Böylece farklı parametreler arasında önem ağırlıklarını belirleme ihtiyacını ortadan kaldıran bir model sunmuştur. Algoritma birkaç durumla test edilerek sonuçlar Microsoft Project tarafından geliştirilenlerle karşılaştırılmış ve değerlendirme, önerilen algoritmanın üç amaç açısından yeterli ve dengeli çözümler sağlayabildiğini ve bu çözümlerin ticari proje çizelgeleme yazılımlarından daha iyi olduğunu göstermiştir. Li ve Demeulemeester (2016) aktivite süresi değişkenliği, teslim tarihi, sipariş gücü, kaynak faktörü ve kaynak kısıtlılığı sapmalarını kullanarak kaynak kullanım sapmalarının maliyeti, faaliyet başlangıç süresinin maliyeti gibi farklı faktörlerin etkisini araştırmıştır. Li vd. (2018) algoritmik performansı artırmak için bir iyileştirme prosedürü tasarlamış ve genetik algoritmaya entegre ederek verimli bir program oluşturma şemasına sahip bir model elde etmiştir. Geliştirilen model boyutu 1000 aktiviteye kadar olan büyük kıyaslama bulut sunucuları için güncel algoritmalarından daha iyi performans veya onlarla rekabet edebilecek düzeyde olduğunu göstermiştir. Abadi vd. (2018) kaynak dalgalanmalarının iskonto edilmiş maliyetlerini en aza indirmek ve proje tamamlama süresini en aza indirmek için çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu modeli sunmuştur. Prayogo vd. (2018) standart simbiyotik organizma aramasına dayalı olan ancak karmaşık optimizasyon sorunlarının daha iyi üstesinden gelmek için iyileştirme yaptıkları bir model sunmuştur. Pirayonesi vd. (2019) aynı anda

faaliyetlerin bölünmesine izin veren ve kaynak kullanılabilirliklerinde bir sınırlamayı dikkate alan model geliştirmiştir. Faaliyet bölünmesine izin verildiği durumda izin verilmeyen duruma göre daha başarılı sonuç elde edildiğini göstermiştir. Li vd. (2019) evrimsel algoritma ve yarasa algoritmasının karşılaştırmasını yaptığı bir çalışma sunmuştur. Evrimsel algoritmanın hem amaç fonksiyonu değeri hem de projenin zamanında tamamlanma olasılığı açısından yarasa algoritmasından daha iyi performans gösterdiğini buna rağmen yarasa algoritması tarafından oluşturulan stratejilerin evrimsel algoritmadan biraz daha zayıf olsa da çok daha hızlı olduğunu göstermiştir. Seyisoğlu (2020) kaynak dengeleme problemini ve nakit akış optimizasyonunu entegre ettiği çoklu amaçlı bir model sunmuştur.

1.4. Projenin Tanımı ve Özellikleri

İnsanoğlu var olduğu günden itibaren başta yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmek adına her türlü ihtiyacını karşılamak ve gün geçtikçe artan taleplerine ulaşmak için çeşitli yollar denemiştir. Bu denemeler sonucu kazanılan her bilgi ve tecrübe insanoğlunu bir adım daha ileriye taşımış, birçok yeniliğin ve gelişmenin önünü açmıştır. Yapılan çalışmalar zamanla bir sisteme oturtulmaya çalışılmış ve proje kavramı ortaya çıkmıştır. Günümüze kadar küçüklü büyüklü sayısız projeler üretilmiş ve üretilmeye devam etmektedir.

1969 yılında Pennsylvania Eyaleti'nde, proje yönetimi alanında “proje yönetimi pratiğini, bilimini ve mesleğini ilerletmek” için birlikte çalışan beş gönüllü ile resmi olarak kurulan Project Management Institute (Chung, 2022)’ye göre proje; benzersiz bir ürün, hizmet veya sonuç yaratmak için üstlenilen geçici bir çabadır (PMI, 2017).

Proje, açıkça belirlenmiş amaçlara ulaşmak için belirli süre ve belirli bütçe içinde gerçekleştirilen bir dizi faaliyettir. Bir proje ayrıca şunları içermelidir (EC, 2004).

- 1)Açıkça tanımlanmış paydaşlar, birincil hedef grup ve nihai yararlanıcılar
- 2)Açıkça tanımlanmış koordinasyon, yönetim ve finansman düzenlemeleri
- 3)Bir izleme ve değerlendirme sistemi (performans yönetimini desteklemek için)
- 4)Uygun bir düzeyde finansal ve ekonomik analiz (projenin faydalarının maliyetlerini aşacağını gösteren)

Proje sonunda ortaya çıkarılan yalnızca somut bir varlık olmayıp aynı zamanda sosyal ve çevresel olumlu katkılar sağlamak; verimliliği, üretkenliği, etkinliği ve cevap

verebilirliği geliştirmek; önceki projeler tarafından sağlanan faydayı sürdürmek; gelişim ve değişime adaptasyonu kolaylaştırmak gibi değerler de yaratılır (PMI, 2021).

Bu açıklamaların kısa bir özeti olarak proje belli amaçlara ulaşmak için önceden belirlenmiş bir planı, kaynakları, süresi (başlangıç ve bitiş tarihi) ve maliyeti olan; birbiriyle ilişkili ve birbirini takip eden bir dizi olaydan oluşan, aynı amaç etrafında toplanan paydaşlara sahip; benzersiz, kompleks ve geçici bir çalışmadır.

Tüm bu açıklamalara dikkat edildiğinde proje kavramının tanımı yapılırken belli ortak kavramlar üzerinde durulduğu görölmektedir. Bunlar projenin bir amaca yönelik yapılması, önceden plan ve programa alınması (başlangıcının, ilerleyişinin ve bitişinin belirlenmesi), bir defalığa mahsus (tekrarsız ve benzersiz) olması, bir ömrünün (geçici) ve kaynak (insan, donanım, yazılım, finans vb) kullanımının olmasıdır. Projenin tanımı yapılırken kullanılan bu ifadeler aslında projenin özelliklerini anlatmaktadır.

Stare (2019)'e göre projenin tipik özellikleri:

1)Geçicilik veya Kesinlik: Projenin açıkça belirlenmiş ve üzerinde anlaşmaya varılmış (kesinleştirilmiş) bir zaman sınırı yani belli başlangıç ve bitiş tarihi vardır. Kalıcı bir uygulama süreci olarak kabul edilemez.

2)Benzersizlik: Projeler benzersiz ürünler, hizmetler veya sonuçlar doğurur. Her proje benzersiz olarak kabul edilir, çünkü herhangi bir projenin başka bir proje ile aynı amaç etrafında ve aynı katılımcılar tarafından aynı süreçlerle tekrarlanması muhtemel değildir.

3)Hedef Yönelimi: Proje organizasyon süreci, bir veya daha fazla hedefe (hizmet, ürün vb.) ulaşmak ve bu özel hedeflere ulaşmak için yürütölen ve planlanan tüm proje görevleridir.

4)Sınırlılık: Her projenin bütçe, kalite ve zaman olarak temel kısıtlamaları vardır ev bunlar üçlü kısıtlar olarak adlandırılır. Bazı çalışmalar ve yazarlar başka faktörler eklese de asıl sınırlayıcı projenin bütçesidir. Diğer kısıtlar bütçeye bağlı olarak değişir. Bir proje bütçesi ne kadar fazla ise kapsamı o kadar geniş, kalitesi yüksek ve süresi kısa olur. Bütçenin düşük olduğu projelerde ise bunun tam tersi durumlar yaşanır.

5)Karmaşıklık: Bazı projelerin karmaşık hedefleri ya da basit ama birden çok hedefi vardır. Bu durumda projede birçok görev tanımlaması ortaya çıkar. Bu görevlerin yerine getirilebilmesi için de farklı rollere, sorumluluklara, becerilere sahip insanların birlikteliğini ve performans, maliyet ve zamanın kesin kontrolünü gerektirir.

6)Bağlantılı ve Birbirine Bağımlı Proje Görevleri: Proje, amacına ulaşmak için gerçekleşmesi gereken görevlerden oluşan bir zincire sahiptir. Bu görevler dizisinde birbirleriyle bağlantılı ve birbirine mantıksal sırayla bağımlı olanlar vardır. Bağımlı görevlerde bir görev yerine getirilmeden kendisinden sonraki görevin yerine getirilmesi (başlaması ya da bitirilmesi) mümkün değildir.

7)Çatışma: Proje yöneticileri, diğer yöneticilerden daha fazla çelişkili bir ortamda çalışır. Bir proje organizasyonu bir kurum olarak kabul edilir, proje yöneticileri, bireylerin ve diğer departmanların yöneticileri ile rekabet eder ve özellikle çok projeli bir ortamda ayırt edilirler.

8)Risklilik: Her proje bir önceki projeden farklıdır, bu nedenle ekip proje sırasında proje sahibinin değişiklik talepleri, işin uygulanmasındaki zorluklar, hava durumu vb. gibi birçok sorun riski ile karşı karşıyadır. Her projenin birbirinden farklı olması karşılaşılan bu risklerin birçoğunun da daha önce karşılaşılmamış, çözümü üzerinde düşünülmesi gereken ve kimi zaman uzun uğraşlar gerektirmesine sebep olur ve projenin belirlenen beklentiler dahilinde tamamlanmasını önündeki engellerdir.

1.5. Proje Başarısı

Proje başarısı, Çimen (1994)'e göre fonksiyonel başarı, proje yönetiminde başarı ve ticari başarı olmak üzere üç kategoriye ayrılır. Fonksiyonel başarı projenin beklentilere uygun olarak fonksiyonlarını yerine getirebilmesi, proje yönetiminde başarı projenin teknik özelliklerine uygun olarak öngörülen süre ve maliyette tamamlanması, ticari başarı piyasadaki rekabet ortamında beklenen güce sahip olmasıdır. Projenin başarılı olabilmesi için bu üç başlık altında eş zamanlı başarılı olmak gerektiğini; her birinin birbirinden bağımsız şekilde başarılı olmasının projenin başarısı için yeterli olmadığını belirtmiştir. Çimen (1994)'e göre, proje sahibinin ya da projede yer alan herhangi bir personelin projenin öngörülen süre ve maliyette tamamlandığı için başarılı saydığı bir proje, müşterinin kalite beklentilerini karşılamadığı veya işlevsel olarak proje kapsamı dışına çıkmış ya da kapsamın daraltılmış olması nedeniyle müşteri tarafından başarısız olarak kabul edilebilir. Müşteri taleplerinin eksiksiz karşılanmış olması bakımından müşteriye göre başarılı olarak nitelendirilen bir proje, zaman aşımı veya maliyet aşımı nedenlerinden dolayı proje sahibine göre başarısız olarak nitelendirilebilir. Çimen (1994)'e göre, proje teknik performans beklentilerine ulaşmışsa ve müşteri ile organizasyondaki kilit personel

ve proje ekibi arasında memnuniyet varsa, projeden hedeflenen ekonomik kazanç elde edildiyse proje başarılı olarak kabul edilir. Her proje yöneticisini çevreleyen koşulların benzersiz olmasına ve iş dünyasında başarılı bir projeyi neyin oluşturduğuna dair evrensel bir tanım olmamasından dolayı her proje ekibinin neyin başarılı bir sonuç oluşturduğuna dair benzersiz bir anlayışa sahip olmasına rağmen Shamim (2022) de Çimen (1994)'i destekler nitelikte proje başarısının proje sponsoru, proje yöneticisi ve son kullanıcı memnuniyeti olarak üç farklı açıdan değerlendirilebileceğini belirtmiştir. Tüm bu açıklamalar dikkate alındığında, bir projenin başarılı sayılabilmesi için bir projenin maliyetine, iş takvimine ve teknik performans hedeflerine ulaşması ve projeye katılan tüm paydaşların proje sonuçlarından memnun olması gerekmektedir.

Özetle proje başarısı, projenin üçlü sac ayağını oluşturan zaman-maliyet-kalite unsurları arasındaki dengeyi sağlayıp belirtilen kapsam içinde tüm paydaşların sonuçtan memnun olmasını sağlamaktır. Bunu sağlamanın yolu ise projenin iyi yönetilmesinden geçmektedir. Bu nedenle proje başlamadan önce bir strateji tasarlanmalı ve proje süresince uygulanmalıdır.

1.6. Yapı Sektöründe Proje Yönetimi ve Proje Başarısına Etkisi

Yapı eylemi, istenilen herhangi bir amaca uygun bir biçimi ve bu biçimi ayakta tutacak strüktürü, amaca uygun bir malzeme ile yapım tekniğinin olanakları içinde gerçekleştirmektir (Kuban, 2018). İnsanların temel ihtiyaçlarından biri olan barınma ihtiyacı nedeniyle yapı tasarlamak ve tasarlanan yapıların yapımını yönetmek insanlık tarihinde tarım toplumunun yerleşik hayata geçmesiyle var olmaya başlamıştır. Başlangıçta yalnızca temel ihtiyaçlara yönelik basit yapılar ortaya çıkarken insanoğlunun istek ve ihtiyaçları doğrultusunda teknolojinin elverdiği ölçüde gelişme gösteren yapılaşma, günümüzde daha karmaşık bir hal almış ve inşa edildiği bölgenin sosyoekonomik düzeyini temsil etmek gibi önemli bir yan görevi de üstlenmiştir. Bu görevlerin başarıyla yerine getirilmesi hedefi sürecin yönetilmesi zorunluluğunu doğurmuş ve proje yönetimi kavramının ortaya çıkmasını sağlamış ve Project Management Institute (2000), proje yönetimini, becerilerin, tekniklerin, araçların ve bilginin proje faaliyetlerine uygulanması ve gereksinimlerinin karşılanması olarak tanımlamıştır.

İnşaat sektörü, ister gelişmiş ister gelişmekte olan ülkelerde var olsun, dünyanın en büyük endüstrilerinden biridir. Günümüz dünyasında inşaat sektörü, geniş bir pazar

yelpazesini etkilediği için tüm dünya ülkelerinin ekonomilerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Sektörde rekabetin artması daha fazla işletmenin proje yönetim ilkelerini benimsemesine sebep olmuştur. Çünkü bir projenin başarısı proje performansından çok proje yönetim kriterlerinin karşılanma oranına bağlıdır. Proje yönetim stratejileri ne derece etkin kullanılırsa projenin başarılı olma olasılığı da o derece artar. Proje başarısının değerlendirilmesi için ihtiyaç duyulan gereksinimler zaman içinde değişse de daha çok maliyet, zaman ve müşteri kavramları üzerinde durulmuş, proje yönetimi söz konusu olduğunda da faaliyetlerin ve operasyonel etkilerin ön plana çıktığı görülmüştür (Shamim, 2022).

İnşaat projeleri, istenen ürünü ortaya çıkarmak için kimileri birbirini takip eden kimileri birbiriyle paralel (eş zamanlı) olarak ilerleyen faaliyetlerin oluşturduğu birçok farklı meslekten çalışanın bulunduğu ve farklı uzmanlıklar gerektiren disiplinler arası, bazen aylar bazense yıllar alan uzun süreli ve karmaşık projelerdir. İnşaat projeleri bu uzun ve karmaşık süreç içinde birçok belirsizlik barındırır. İnşaat projelerinin gelişmesiyle birlikte karmaşıklık düzeyleri ve belirsizlikleri de artmış, geleneksel proje yönetim teknikleri ve organizasyon yapıları bu karmaşıklığın çözülmesi ve yürütülmesi için yetersiz kalmış böylece inşaat yönetimi kavramı, planlama ve kontrol teknikleri gelişmiştir (Ankara, 2021).

Kerzner (2017)'e göre başarılı bir proje yönetimi, kaynakların etkin bir şekilde dengelenmesi ve müşteri tarafından kabul edilmesi koşuluyla, projeyi zamanında, beklenen maliyette, beklenen performansta gerçekleştirmeyi amaçlar. Ona göre proje belirlenen süre içerisinde bütçeye uygun maliyette tamamlanırsa, uygun performans ve şartname seviyesine ulaşırsa, müşteri kabulü çerçevesinde tamamlanırsa proje başarılı olur.

1.7. Projenin ve Proje Kaynaklarının Planlanması

Bir projenin hedeflerine ulaşması ve başarıyla sonuçlanmasındaki en büyük etken projenin etkili yürütülmesi ve yönetilmesidir. Projedeki işlerin yürütülmesi ve kaynakların yönetilmesi eylemlerinin temelini ise projeye uygun olarak hazırlanmış doğru bir plan oluşturur.

Projenin fiilen başlamasından önce gerçekleşen ve proje yaşam döngüsü boyunca süren bir çalışma olan planlama; projenin zaman, kapsam ve maliyet ana gündemlerini konu alır. Planlanması aşamasında projenin tüm paydaşları bulunarak bu gündemler için

fikir birliğinin sağlanmasında aktif rol oynar. Planlama ile birlikte projenin kontrol mekanizması güçlendirilmiş olur. Proje süresince karşılaşılabilecek risk ve fırsatlar ön görülür ve bunlar için gerekli önleyici/düzeltilici/değerlendirici aksiyonlar alınır.

Planlama tekniklerinin ortaya çıkmasından sonra projeler çoğunlukla her bir iş için optimum süreyi öngören ve işlerin birbiriyle olan ilişkisini yalnız tek yönlü ilerleyen oklarla gösteren bir ağ yapısıyla projenin matematiksel modelini oluşturan ve modern proje yönetimini başlatan (Kwak, 2003) CPM yöntemiyle planlanmaktadır. Proje süresinin ve maliyetinin doğru tahmin edilebilmesi gereksiniminden doğan (Hussein, 2014) CPM’de kullanılan terimler ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

Aktivite (Faaliyet): Tanımlanmış görev.

Düğüm (Olay): Aktivitelerin başlangıç (başlangıç düğümü: i) veya bitişi (bitiş düğümü: j) ifade eder.

Süre: Bir faaliyetin başlangıcı ve bitişi arasında iş günleri.

Kritik Yol: Bir projenin izleyebileceği en uzun yol ve süreyi kapsayan olay dizisidir. Kritik yol üzerinde bulunan aktivitelerin sürelerinde herhangi bir değişiklik olması durumunda bu değişiklik aynı etkiyle proje süresine yansır.

Erken Olay Zamanı(i) (EOZ_i): i düğümünün en erken başlama zamanı.

Geç Olay Zamanı(i) (GOZ_i): i düğümünün en geç başlama zamanı.

Erken Olay Zamanı(j) (EOZ_j): j düğümünün en erken başlama zamanı.

Geç Olay Zamanı(j) (GOZ_j): j düğümünün en geç başlama zamanı.

Toplam Bolluk (TB): Planlamada bir aktivitenin kritik yolu geciktirmeden sahip olduğu erteleme miktarı. $TB = GOZ_j - EOZ_i - \text{Süre}$

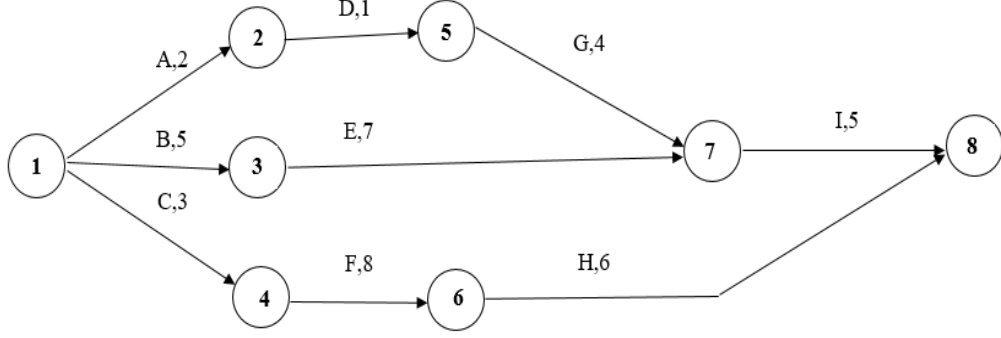
Serbest Bolluk (SB): Planlamada bir aktivitenin başka bir aktiviteyi geciktirmeden sahip olduğu erteleme miktarı. $SB = EOZ_j - EOZ_i - \text{Süre}$

CPM ile projenin planlanması üç aşamada gerçekleşir. İlk aşama iş programının ve ağ diyagramının oluşturulması, ikinci aşama proje süresinin belirlenmesi ve üçüncü aşama kritik yol ve bollukların hesaplanması işlemlerini kapsar.

Birinci aşamada;

- 1) Proje, her biri kendisinden daha küçük ve anlamlı parçalara bölünemeyecek kadar küçük faaliyetlere bölünür.
- 2) Tüm proje faaliyetleri listelenir ve numaralandırılır veya isimlendirilir.
- 3) Faaliyetlerin kısıtlamaları, kendinden önceki ve sonraki faaliyetlerle olan bağlantıları belirlenir.

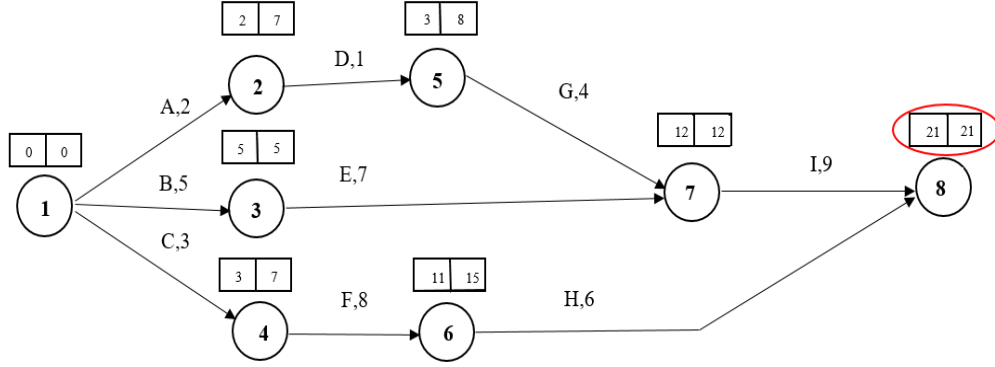
- 4) Ağ şeması, soldan sağa doğru tek yönde ilerleyen oklarla faaliyetlerin birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Ağ şemasındaki oklar aktiviteleri ifade ederken okların başlangıç ve bitişlerinde bulunan daireler ise düğüm noktalarını temsil eder.
- 5) Her bir faaliyet için hesaplanmış süreler atanır.



Şekil 1. CPM ağ diyagramı

İkinci aşamada;

- 6) Başlangıç düğümüne '0' değeri verilerek hesaplamaya başlanır.
- 7) Her düğüm noktasına önceki düğüm noktasındaki değere faaliyet süresi eklenerek sağa doğru ilerlenir. Böylece faaliyetlerin erken başlangıç süreleri bulunur. İlerleme sırasında aynı düğüm noktasına birbirinden farklı değerlerin gelmesi durumunda büyük olan değer alınır. Çünkü faaliyetin başlamasının koşulu, kendinden önceki tüm faaliyetlerin tamamlanması olduğundan başlama süresini belirleyecek olan tamamlanma süresi en uzun olan faaliyettir.
- 8) Son düğüm noktasının değeri proje süresi olarak belirlenir.



Şekil 2. CPM ağ diyagramında proje süresi

Üçüncü aşamada;

9) Ağ diyagramının son düğüm noktasındaki değerden (proje süresinden) aktivite süreleri çıkarılarak sola doğru ilerlenir. Böylece faaliyetlerin geç tamamlanma süreleri bulunur. İlerleme sırasında aynı düğüm noktasına birbirinden farklı değerlerin gelmesi durumunda küçük olan değer alınır.

10) Tüm düğüm noktaları içindeki erken başlangıç ve geç bitiş değerlerinin birbirine eşit olduğu faaliyetlerin oluşturduğu güzergâh kritik yol olarak belirlenir. Bu yol üzerindeki faaliyetlerin tamamlanma sürelerinde yaşanacak herhangi bir değişiklik proje süresine de aynı şekilde yansır.

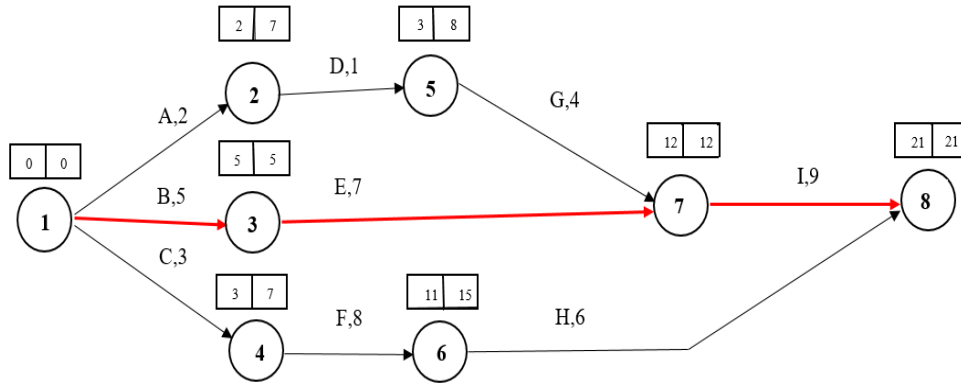
Tablo 1. Aktivite bilgileri

Aktivite	Öncül Aktivite	Süre
A	-	2
B	-	5
C	-	3
D	A	1
E	B	7
F	C	8
G	D	4
H	F	6
I	E,G	9

Tablo 2. CPM ağ diyagramıyla elde edilen aktivitelerin erken başlama, geç bitme ve toplam bolluk değerleri

Aktivite	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
A	0	7	5
B	0	5	0
C	0	7	4
D	2	8	5
E	5	12	0
F	3	15	4
G	3	12	5
H	11	21	4
I	12	21	0

Başlangıç, bitiş ve faaliyet süreleri kullanılarak bollukların hesaplanır. Bolluğu bulunan aktiviteler proje süresinde herhangi bir değişikliğe sebep olmadan ertelenebilir (Antill, 1990).



Şekil 3. CPM ağ diyagramında kritik yol

Bir projenin planlanması için birçok farklı yöntem kullanılabilir. Bu yöntemler içinde hesaplama kolaylığı, deneyim ve gözlem üzerine inşa edilmiş bir çizelgeleme sunduğundan inşaat projelerinin çizelgelenmesi, formülize edilmesi ve yönetilmesi için uygun olması (Atin,2019), proje yöneticilerinin faaliyetlerin başlayıp bitebileceği en erken ve en geç zamanları değerlendirmesine ve aynı zamanda projenin tamamlanma süresinin öngörülmesine olanak tanınması (Bodunwa, 2020) nedenleriyle en yaygın olarak kullanılanı CPM'dir fakat bu yöntem projedeki kaynak kullanımını dikkate almadığından kaynakların planlanması konusunda ayrıca bazı çalışmalar gerekmektedir.

Bir amaca ulaşmak için gerçekleşen süreçte harcanan, kullanılan tüm değerler kaynak olarak nitelendirilir. Bir yapı projesinde kaynaklar proje yönetiminde bahsedilen 4M (manpower, machine, material, money) insan, makine, malzeme ve paradır. Kaynak planlaması ise projedeki kaynakların hangi işlerde, ne zaman ve ne miktarda kullanılacağını proje başlamadan önce belirlenmesi işlemidir. Bu işlemin yapılması proje süresince faaliyetlerin aksamadan gerçekleştirilebilmesi için doğru kaynağın istenilen zamanda ve miktarda doğru yerde olmasını sağlar. Yapılacak her işin süresi ve harcayacağı kaynak ya da kaynaklar (bir işin tamamlanabilmesi için aynı anda birden fazla kaynak kullanımı olabilir) birbirinden farklı olduğu için proje süresi boyunca kaynak kullanımı değişiklik gösterir.

1.8. Kaynak Dengeleme Problemi

Projeler ulaşmak istenen hedefle birlikte hedefe giden süreci, bu sürecin yönetilmesini kapsamakta ve süreç boyunca birçok problemi beraberinde getirmektedir. Projelerin ortaya çıkmasındaki her sebebin, bireyin, fikrin; projelerin üretildiği zaman ve mekanın; projenin amacının, hitap ettiği alıcının farklı olması problemlerin de birbirinden farklı olmasına sebep olmaktadır. Çözüm odaklı yaklaşım sunan mühendislik bilimi ise gün geçtikçe farklılaşan ve zorlaşan problemler karşısında kendini sürekli güncellemekte ve problemlere cevap vermektedir.

Kaynak dengeleme problemi projenin verimliliğini ve etkinliğini artırmak için proje kaynaklarının en uygun (optimum) şekilde tahsis edilmesine yönelik bir problemdir. Kaynak tahsisi ile kaynak miktarının ve dağılımının belirlenmesiyle projenin kaynak kullanım histogramı oluşturulur. Çoğunlukla günlük kaynak kullanımını göstermek için oluşturulan bu histogram inişli-çıkışlı, dalgalı bir yapıdadır. Kaynak kullanımındaki bu düzensiz yapı kaynak dengeleme problemi olarak adlandırılır.

Kaynak dengeleme probleminin ortaya çıkmasındaki temel sebep projenin başında belirlenen kısıtlardır. Projenin sağlanması gereken temel kısıtlardan biri süredir. Cezai uygulamalardan kaçınmak, sektörde iyi bir izlenim bırakmak için projelerin zamanında tamamlanması gerekmektedir. Projenin zamanında tamamlanması, proje süresi boyunca ihtiyaç duyulan tüm kaynakların zamanında ihtiyaç alanında hazır bulunmasına bağlıdır.

Kaynak dengeleme probleminin ortaya çıkmasındaki temel sebeplerden biri de kaynak kısıtıdır. Kaynak kısıtı projenin ihtiyacı olan malzeme, makine ve işgücü

kaynaklarının ve bunların sebep olacağı maliyetin karşılanacağı maddi kaynağın sonsuz olmaması ve malzemenin hammadde yoksunluğu, üretim tesisi yetersizliği, temin süresi gibi; makine kaynağının çalışma alanı ve teknolojik alt yapı yetersizliği gibi; yetkin işgücü kaynağı sayısının istenilen sayıda olmaması gibi durumlardan doğabilir.

Kaynak histogramdaki dalgalanmaların ortadan kaldırılarak sabit bir çizgiye dönüştürülmesi işlemine ise kaynak dengeleme denir. Kaynak dengeleme ile proje süresi boyunca günlük kaynak kullanım değerleri birbirine yakın olacağından

- İşçi işe alım-işten çıkarma veya boş bekletme
- Makine-ekipman satın alma/kiralama veya boşa çıkma
- Malzemeyi uzun süre depolama ve malzeme teminine bağlı düzensiz nakit akışı gibi durumların ve bunlara bağlı olarak oluşan maliyetlerin de azaltılması sağlanır.

Kaynak Dengeleme Problemi üç farklı şekilde karşımıza çıkar:

Kısıtlı süre ve serbest kaynak, proje süresinin değişmesine (uzamasına) izin verilmeden sabit tutulan fakat kaynakların sınırsız olduğunu kabul eden problem türüdür.

Kısıtlı kaynak ve serbest süre, proje için belirlenmiş miktardaki kaynakların üstüne çıkılmasına izin verilmeyen fakat kaynakların temini ve kullanımı nedeniyle oluşacak gecikmelere dolayısıyla proje süresinin uzamasına izin veren problem türüdür.

Serbest süre ve kaynak, proje süresinde oluşacak herhangi bir değişikliğe izin veren ve kullanılacak kaynakların sınırsız olduğunu kabul eden problem türüdür. Burada amaç projenin minimum giderle tamamlanacağı süreyi bulmaktır.

Kaynak dengeleme probleminin çözümüyle kaynak kullanım oranları, kaynakların boş bekleme oranları ve verimlilikleri ölçülerek bu değerlerin iyileştirilmesi sağlanır (Baysal, 2010).

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde CPM yöntemi esas alınır ve başlıca çözüm adımları aşağıdaki gibidir:

- 1) CPM ile iş programı oluşturulur.
- 2) Oluşturulan iş programı ile projenin süresi, aktivite bollukları ve kritik yolu belirlenir.
- 3) Oluşturulan iş programı için kaynaklar tahsis edilir ve kaynak kullanım histogramı oluşturulur.
- 4) Bolluğa sahip aktiviteler bolluk miktarının izin verdiği ölçüde kaydırılır.

Bu adımlar izlenerek kaynak kullanımı belli bir seviyede tutulup histogram dörtgen bir şekle yaklaştırılırken proje süresinin aynı kalır ve maksimum kaynak ihtiyacının mevcut kaynak sayısını geçmez.

Kaynak dengelemeyle kaynak eğrisini dikdörtgen şekle getirme hedefi inşaat sektöründe pek anlamlı değildir. Bunun nedeni, inşaat projelerinin doğası gereği, projelerin başlama ve bitiş süreçlerinde daha yavaş ilerleme oranlarına sahip olmalarıdır. Bu nedenle bu süreçlerde kaynak kullanım miktarı nispeten daha azdır. Buna bağlı olarak inşaat projelerinde kaynak eğrisinin genellikle çan şeklinde olması beklenir (Erzurum, 2019).



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmada MATLAB yazılım programı yardımıyla Rao optimizasyon yöntemi kullanılarak bir matematiksel optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Model bir inşaat projesinde proje başlangıcından sonuna dek çeşitli nedenlerle oluşan sınırlı insan gücü kaynağının kullanımını proje ömrü boyunca dengeli bir şekilde dağıtmak ve proje verimliliğine olumlu katkı sağlaması amacıyla oluşturulmuştur.

2.1. Rao Optimizasyon Yöntemi

Son yıllarda canlı ve cansız varlıkların davranışlarının metaforuna dayanan ve daha iyi oldukları iddiasına katılmayan ve araştırmacıların metafor tabanlı algoritmalar geliştirmek yerine karmaşık problemlere etkili çözümler sağlayabilecek basit optimizasyon teknikleri geliştirmeye odaklanmalarının daha iyi olacağı görüşüne katılan Rao (2020) metaforsuz üç basit optimizasyon algoritması geliştirmiştir.

Metasezgisel algoritmaların kendi avantajları vardır ancak optimizasyon algoritmalarının çoğu, popülasyon boyutu ve yineleme sayısı gibi ortak kontrol parametrelerine ek olarak kendi algoritmalarına özgü kontrol parametrelerine bağlıdır (Rao, 2020). Basit ve algoritmaya özgü kontrol parametresi gerektirmeyecek şekilde geliştirilmiş metaforsuz bir metasezgisel optimizasyon türü olan Rao Algoritmaları diğer metafor tabanlı algoritmalarından farklı olarak uyum, yoğunluk, olasılık gibi yaygın olan zorlayıcı parametreleri değil; popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı gibi iki standart parametreyi kullanarak hızlı bir şekilde optimum çözüme ulaşmak için her yinelemede hem en iyi hem en kötü çözümleri ve aday çözümler arasındaki rastgele etkileşimleri kullanır. Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 olmak üzere üç çeşit Rao algoritması vardır.

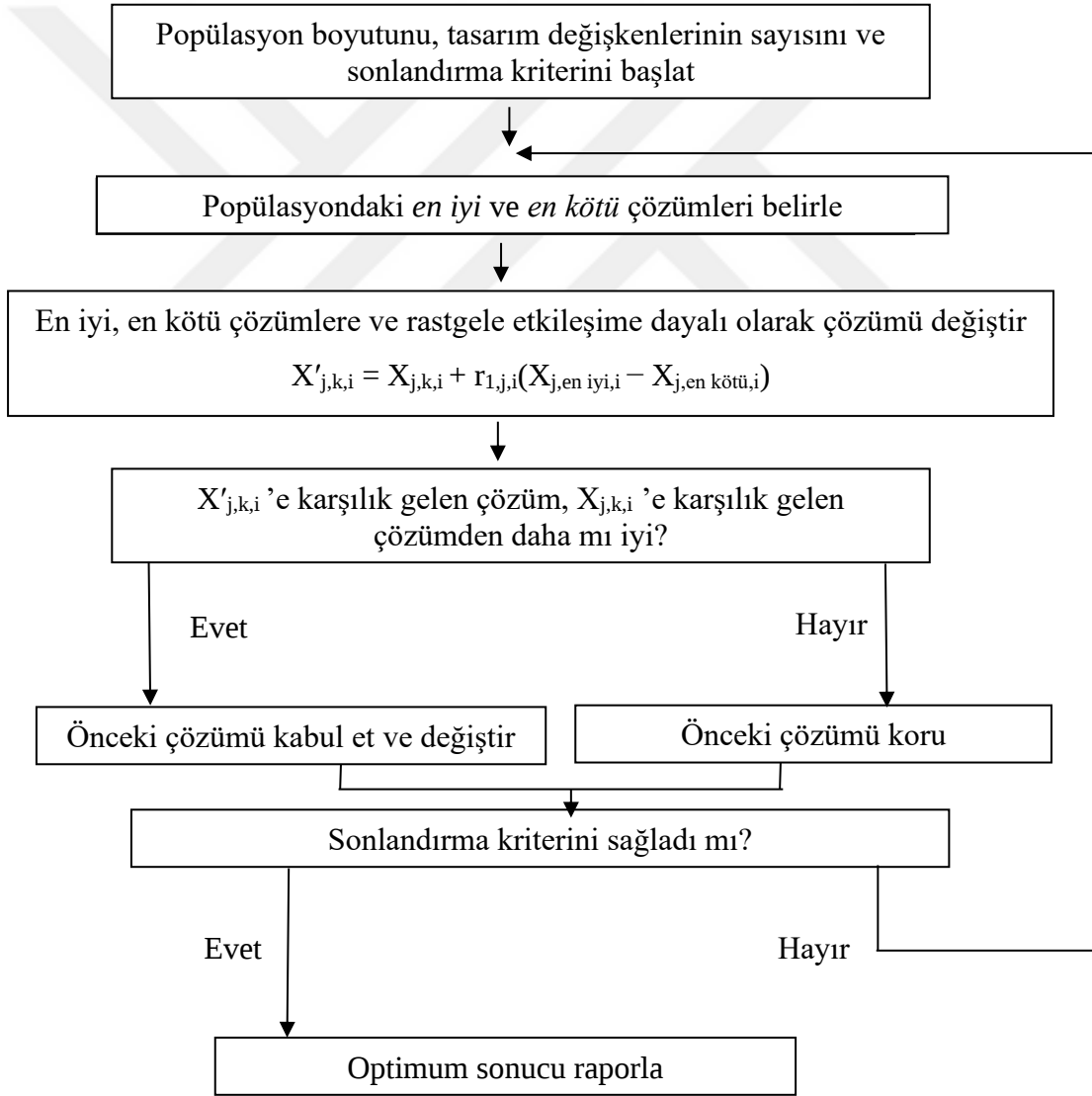
$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - X_{j,en\ kötü,i}) \quad (1)$$

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - X_{j,en\ kötü,i}) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} \text{ ya da } X_{j,l,i}| - |X_{j,l,i} \text{ ya da } X_{j,k,i}|) \quad (2)$$

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - |X_{j,en\ kötü,i}|) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} \text{ ya da } X_{j,l,i}| - (X_{j,l,i} \text{ ya da } X_{j,k,i})) \quad (3)$$

Burada $X_{j,en\ iyi,i}$ i. iterasyon boyunca j değişkeninin en iyi adayını, $X_{j,en\ kötü,i}$ ise i. iterasyon boyunca j değişkeninin en kötü adayını temsil eder. $X_{j,k,i}$ denklemden sonra güncellenen değerdir ve hem $r_{1,j,i}$ hem de $r_{2,j,i}$ yineleme boyunca j. değişken için $[0,1]$ aralığında rastgele oluşturulur. $|X_{j,k,i}$ veya $X_{j,l,i}|$ teriminde, aday çözüm k, popülasyondaki mevcut adaylardan rastgele seçilen başka bir aday l ile karşılaştırılır. $|X_{j,k,i}|$ terimi k, l'den daha uygunsa seçilir. Aksi takdirde $|X_{j,l,i}|$ seçilir. Aynı kural ikinci terim için de geçerlidir ($X_{j,l,i}$ veya $X_{j,k,i}$).

Rao-1 algoritması akış şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. Rao algoritması akış şeması

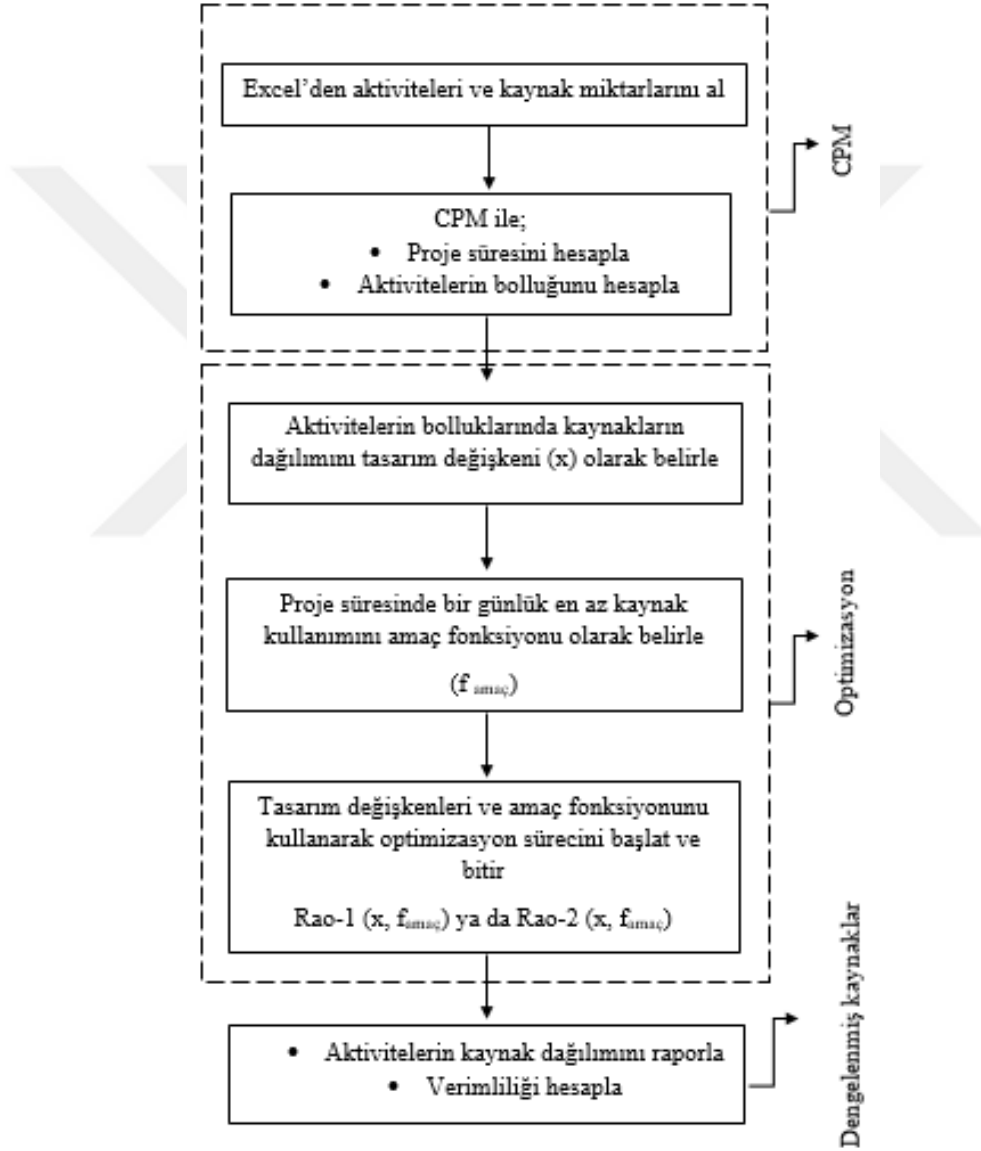
Rao-2 ve Rao-3 algoritmaları için de akış şeması aynı olup yalnızca (1) denklemi (2) ve (3) denklemleri ile değiştirilir (Rao, 2020).

Rao-2 optimizasyon yöntemi ise Rao-1'den farklı olarak yalnızca en iyi ve en kötü sonucu değil bunlara ek olarak iterasyondaki sonuçlardan rastgele iki tanesi seçerek bunlara bağlı çözüm önerileri de sunar. Böylece ortaya çıkan sonuçların birbirinden farklılaşmasını sağlar.



2.2. Kaynak Dengeleme Probleminin Optimizasyon Tekniği ile Çözümü

CPM yardımıyla kritik olmayan aktivitelerin zaman bolluklarının belirlenmesiyle problemde verilen kaynak kullanımı, optimizasyon yöntemiyle birlikte rastgele dağıtılarak dengelenmeye çalışılmıştır. Kaynak dengelemenin entegre edilmiş optimizasyon tekniği şeması aşağıdadır.



Şekil 5. Kaynak dengeleme probleminin optimizasyon tekniği ile çözümü

2.3. Popülasyon Arşiv Kontrolü

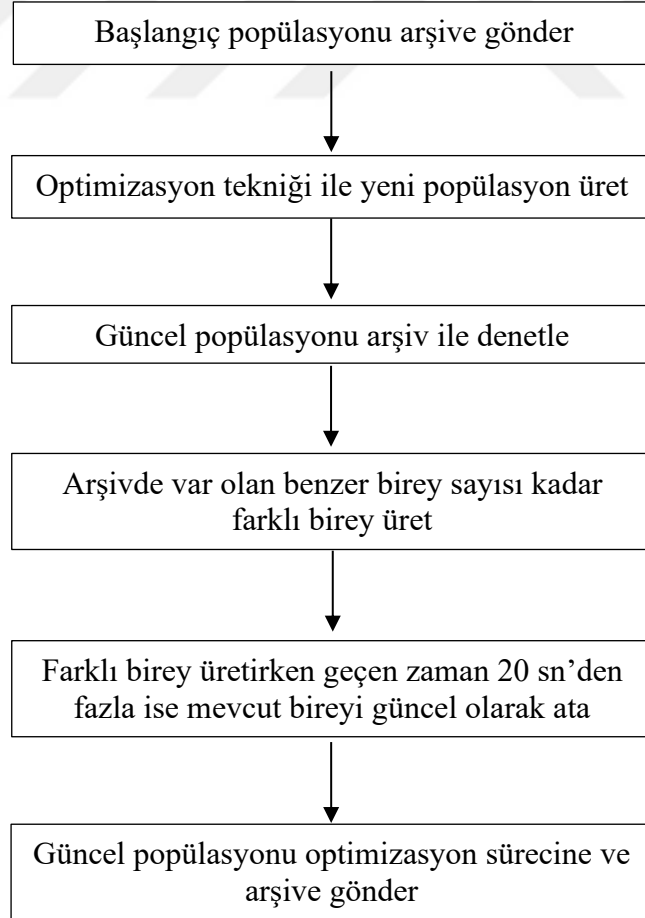
Her projenin parametrelerine bağlı olarak birbirinden farklı olması çözüme giden yolların da bu duruma paralel olarak farklılaşmasına sebep olmaktadır. Çözüm ne kadar probleme has şekilde ortaya konarsa ulaşılan sonuç da bu derece doğru ve memnun edici olur. Problemin çözümünde temel amaç en uygun sonuca ulaşmak olsa da bu tek başına yeterli olmamakta sonucun kendisi kadar takip edilen yol da oldukça önemli yer tutmaktadır. Zamana karşı yarıştığımız bugünlerde doğru sonuca ulaşma süresinin kısalması, probleme en erken sürede cevap verilmesi proje başarısı için oldukça önemlidir. Bu durum inşaat projeleri için de farklı değildir.

Kaynak dengeleme probleminin tam zorluk derecesine sahip bir problem olmasından dolayı problemin büyüklüğünün artmasına paralel olarak çözüm uzayının genişliği de problemin büyüklüğüne oranla çok daha fazla artar ve bu durum problemin çözüm süresinin uzamasına sebep olurken popülasyon boyutu, yineleme (iterasyon) sayısı ve diğer parametrelerin uygun seçilmemesi de çözüm süresine olumsuz etki eder (Erzurum, 2017). Bu çalışmada bahsedilen olumsuz durumların önüne geçebilmek amacıyla Rao algoritması ile oluşturulan modelde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi bulunmaktadır. Normal şartlarda başlangıçta belirlenen sayı kadar rastgele popülasyonlar oluşturulan optimizasyon modelinin çalıştırılmasıyla her iterasyonda rastgele oluşan popülasyonların birbirinin aynısı olması muhtemel bir durumdur. Fakat popülasyon arşiv kontrolü eklentisiyle bu durum önlenmiş, modelin her popülasyonda oluşturulan olası çözümü önceki tüm çözümlerle karşılaştırarak aynı olması durumunda işleme devam etmemesi sağlanmıştır. Böylece işlem fazlalığının ortadan kaldırılması ve çözüm süresinin kısaltılması hedeflenmiştir.

Tablo 3. Arşiv kontrollü popülasyon üretim adımları

Arşiv = P_b
Döngü 1, $i = 1 \rightarrow P_n$
Eğer $P_i \in \text{Arşiv}$ ise
Süreç 1, $P_i \in \text{Arşiv}$ olduğu sürece
$P_i = f(\text{Rao-1 ya da Rao-2})$
Eğer zaman = t ise
Süreç 1'i sonlandır
$P_{\text{güncel}(i)} = P_i$
Döngü 1'i sonlandır
$\text{Arşiv} = \text{Arşiv} + P_{\text{güncel}}$

Yazılan kodlar doğrultusunda arşiv kontrollü popülasyon üretimi akış şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 6. Arşiv kontrollü popülasyon üretimi

2.4. Proje Verimliliği

Verimliliğin etki dalgası çalışanlar, yöneticiler ve ulusal çıkarlar olarak genişler ve verimlilik sonucu elde edilen kazançlar bunlara yansır (Akın, 2022). Kazancın belirlenebilmesi ve doğru miktarda yansıtılabilmesi için öncelikle verimliliğin ölçülebilir olması gerekmektedir.

İnşaat sektöründe projelerin fiziksel çıktı (ürün), zaman, maliyet, kaynak kullanımı gibi birden çok parametreye bağlı olması nedeniyle bu parametrelere bağlı olarak birçok verimlilik hesabı yapılabilir. Verimlilik için herhangi bir standart ölçüm yöntemi bulunmadığından her proje kendine has ölçüm metotları geliştirir. Bu yöntemler arasında ön plana çıkan işgücü verimliliği için geliştirilenlerdir çünkü işgücü maliyeti toplam maliyetin büyük bir kısmını oluştururken proje süresine de önemli ölçüde etki eder. İşgücündeki verimliliğinin artırılmasıyla bu alandaki maliyetlerin azalması kazancın artmasını ve projenin başarıyla sonuçlanmasını sağlar. Benzer çalışmalar ekipman ve malzeme kullanımı için de yapılabilir. Büyük çaplı projelerde ağır ekipmanlar ve teknik gereçlerin çok sayıda kullanımı söz konusu olduğundan bunlar nedeniyle oluşacak maliyetlerin en aza indirilmesi, makinelerin verimli kullanımının sağlanması gerekir. Yine kullanılacak malzemelerin israfından da kaçınmak gerekmektedir (Acıkara, 2016).

İş gücü verimliliği, iş gücüne bağlı ve işgücünden bağımsız olarak iki farklı başlık altında incelenebilir. İş gücüne bağlı verimlilik etmenleri bilgi, tecrübe, maddi ya da manevi motivasyonlar olurken iş gücünden bağımsız verimlilik etmenleri hazırlanan iş programları, makinelerin kullanım kapasitesi olur. Bu çalışma kapsamında iş programlarının verimlilik üzerindeki etkisi incelenmiş ve programda iyileştirmeler yapılarak verimlilik artırılmaya çalışılmıştır.

Modelde verimlilik hesabı, harcanan iş gücüne ve çalışan iş gücüne bağlı olarak yüzde (%) cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V = (H_k / \text{Ç}_k) \times 100 \quad (4)$$

Bu formülde V verimliliği ifade ederken H_k , iş programından kaynaklanan ve günden güne değişiklik gösterebilen çalışan sayısına bağlı olarak proje süresi boyunca harcanan işgücü kaynağını adamgün cinsinden, Ç_k ise proje süresi boyunca kaynak kullanım

histogramındaki maksimum değer göz önüne alınarak istihdam edilmesi gereken işgücü kaynağını adamgün cinsinden ifade eder.

Harcanan iş gücü aktivite süresine ve aktivitenin kaynak miktarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_k = \sum (t_n \times R_n) \quad (5)$$

Bu formül n aktivite numarası olmak üzere tüm aktivitelerin aktivite süresinin o aktivitenin kaynak miktarıyla çarpımının toplamı şeklinde ifade edilir.

Çalışan işgücü proje süresine ve günlük maksimum kaynak sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Ç_k = T \times R_{maks} \quad (6)$$

Bu formül proje toplam süresi ile proje süresi boyunca herhangi bir günde ihtiyaç duyulacak maksimum işgücü kaynak sayısının çarpımı olarak ifade edilir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Modelde literatür taraması sonucu elde edilen dört farklı hipotez örnek ile özel bir inşaat firması tarafından yürütülen gerçek bir proje verileri örnek olarak kullanılmıştır. Teze konu analizler Intel(R) Core (TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz işlemci ve 4,00 GB RAM bulunan dizüstü bilgisayar kullanılarak yapılmıştır.

Örnekler seçilirken;

- 1)Her bir örneğin iş programlarının CPM yöntemiyle oluşturulmuş olmasına,
- 2)Aktivitelerin her birinin birbirine bitir-başla bağlantısı ile bağlı olmasına,
- 3)Aktivitelerin her birinin en küçük alt kırımın olduğuna ve daha alt kırımlara ayrılamaz olduğuna,
- 4)Başlayan bir aktivitenin herhangi bir sebeple durdurulup yeniden başlatılmasının mümkün olmadığına
- 5)Sınırlı bir kaynak havuzu olduğuna dikkat edilmiştir.

3.1. 5 Aktiviteli Örnek

Mubarak (2010) 5 aktiviteden oluşan bir problemi incelemiş ve günlük kaynak kullanım miktarlarını belirlemiştir. Günlük maksimum kaynak kullanımının 6 ile sınırlandırıldığı problemde maksimum kaynak kullanımın bu değeri aştığı görülmüş ve aktivite bollukları kullanılıp aktivitelerin bolluk miktarlarınca kaydırılmasıyla istenen günlük maksimum kaynak kullanım değerine ulaşılmıştır.

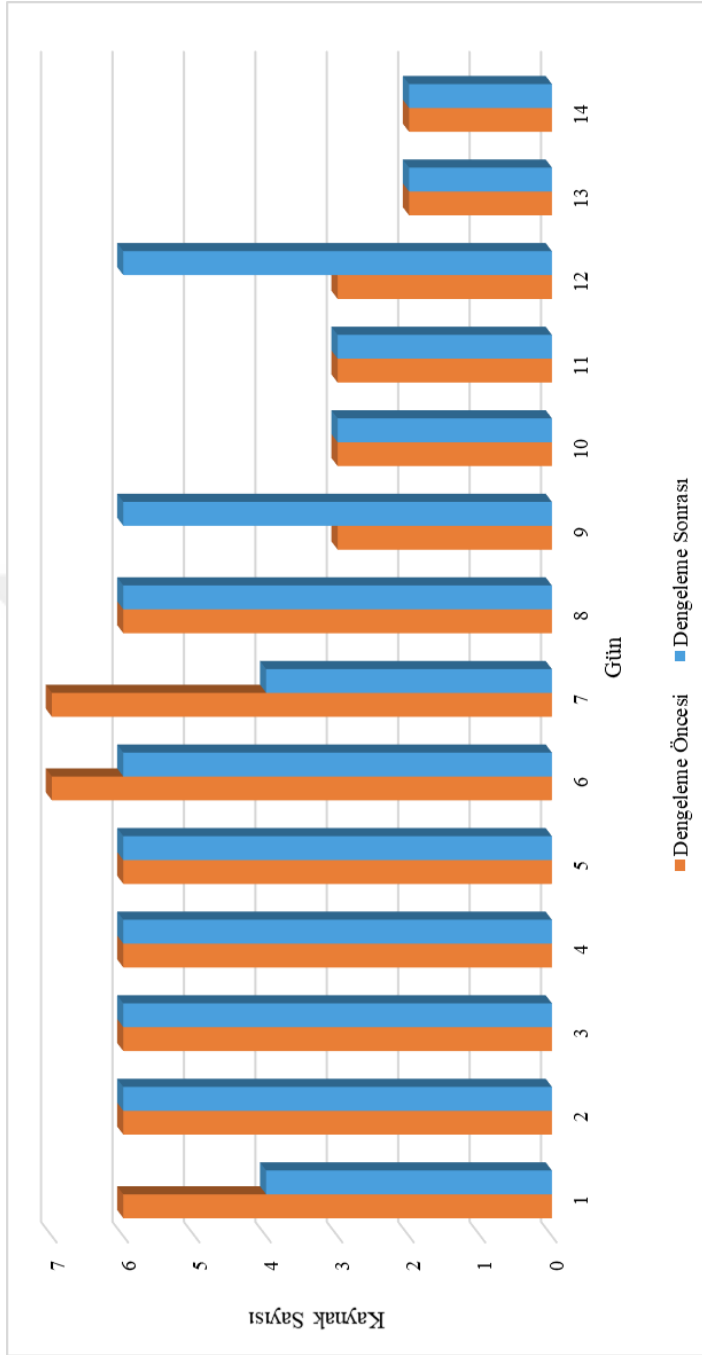
Aktivitelere ait süre bilgisi ile her bir aktivitenin erken başlama, geç bitiş ve bunlara bağlı olarak toplam bolluk miktarları belirlenmiştir.

Tablo 4. 5 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları

Aktivite	Öncül Aktivite	Süre	Kaynak Sayısı	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
1	-	5	2	0	7	2
2	-	7	4	0	7	0
3	1	3	3	5	12	4
4	1,2	5	3	7	12	0
5	3,4	2	2	12	14	0

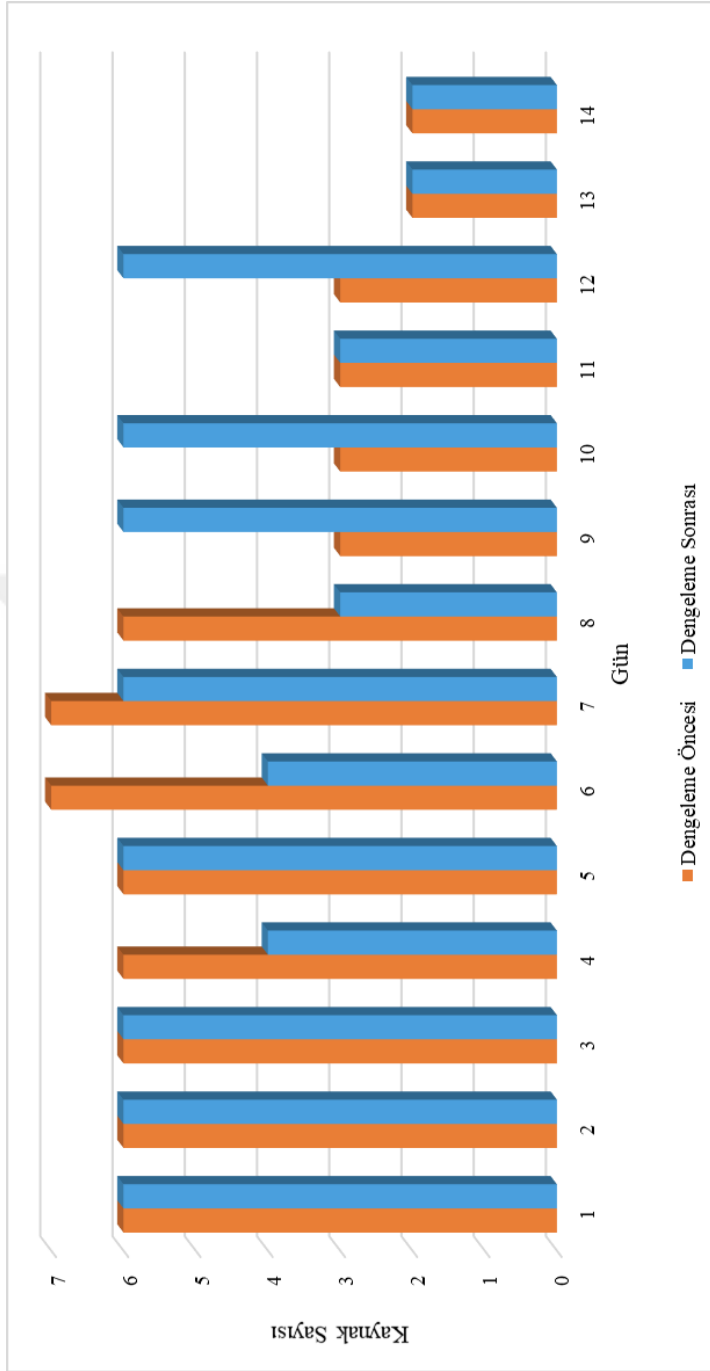
Tablodaki veriler kullanılarak popülasyon sayısı 30 ve iterasyon sayısı 50 alınarak Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmalarıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır.





Şekil 7. 5 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

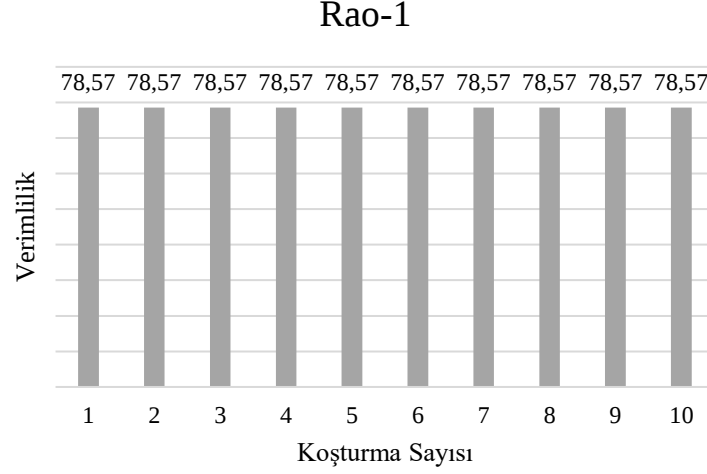
Rao-1 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 7 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 6'ya düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımını dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %67,35 olan proje verimliliği %78,57'ye çıkarılmıştır.



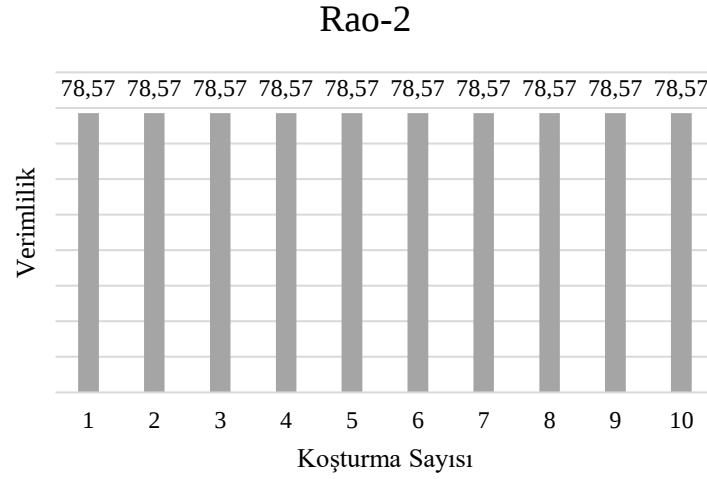
Şekil 8. 5 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-2 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 7 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 6'ya düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %67,35 olan proje verimliliği %78,57'ye çıkarılmıştır.

Problemin çözümü için optimizasyon yöntemi 10 kez çalıştırılmış ve en iyi sonuç referans alınmıştır. Koşturma sayısına bağlı verimlilik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

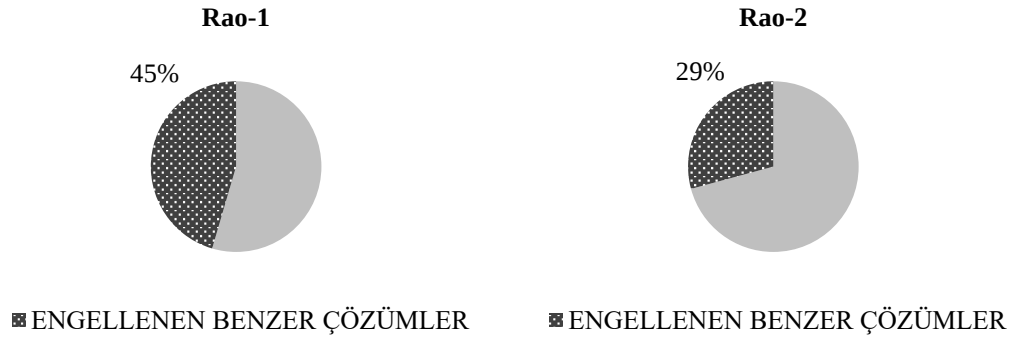


Şekil 9. 5 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri



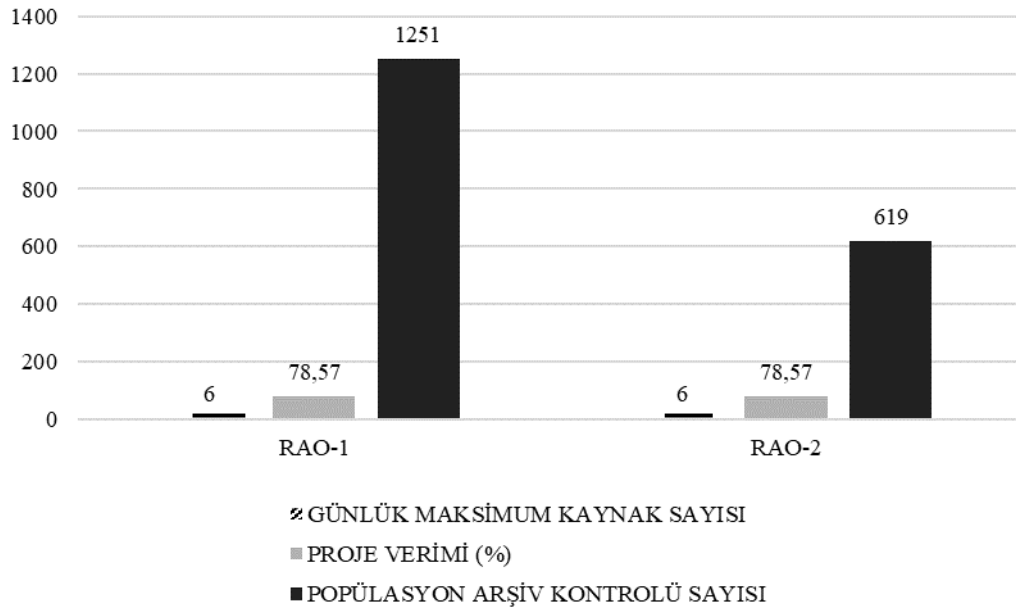
Şekil 10. 5 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile aynı çözümlerin tekrarlanmasının önüne geçilerek çözüm süresi kısaltılmıştır.



Şekil 11. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları

Popülasyon sayısı (30) ve iterasyon sayısına (50) bağlı olarak toplam çözüm sayısının 1500 olduğu optimizasyon modelinde Rao-1 yöntemi ile çözüm yapılırken 1251 adet çözümün, Rao-2 yöntemi ile çözüm yapılırken ise 619 adet çözümün engellenmesiyle optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 12. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan analizler karşılaştırıldığında her iki yöntemin de günlük maksimum kaynak sayısını azaltmada ve buna bağlı olarak proje verimliliğini artırmada gösterdikleri başarının aynı olduğu yalnızca her iki yöntemde de popülasyon kontrolü sayısının farklı olduğu, popülasyon kontrolü

sayısının artmasının hesaplama süresini de oldukça yüksek oranda artırdığı görülmektedir. Rao-1 optimizasyon algoritmasında 24169 saniye olan çözüm süresi Rao-2 algoritmasında 1143 saniye olarak ölçülmüştür.

Kaynak Dağılımı	2	2	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
Gün	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	14
Kaynak Sayısı	6	6	6	4	6	4	6	3	6	6	3	6	2	2	2	2

Şekil 13. 5 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi

Mubarak (2010)'ın aktivite bolluklarını kullanarak zaman matrisi üzerinde kaynakları kaydırmasıyla günlük maksimum kaynak kullanımını 7'den 6'ya düşürdüğü, bu tez çalışmasının da yapılan analizler sonucunda günlük maksimum kaynak kullanımının aynı sayıya düşürdüğü böylece problemin çözümünde Mubarak (2010) ile aynı başarı oranına sahip olduğu görülmüştür.

3.2. 11 Aktiviteli Örnek

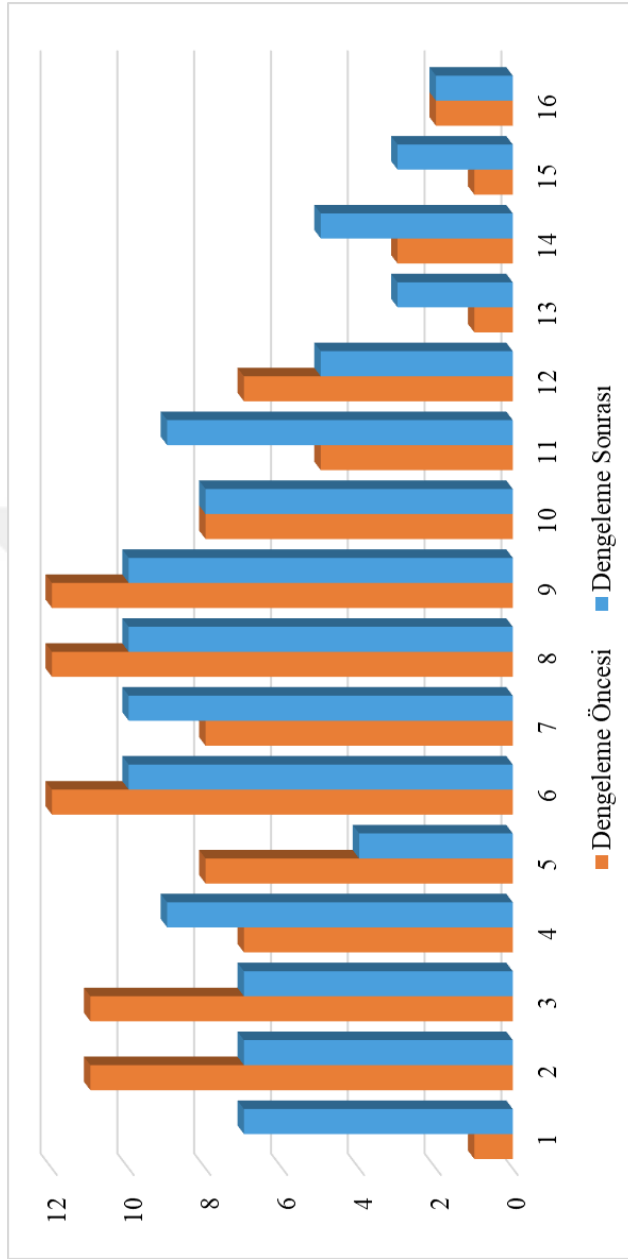
Piryonesi (2014) 11 aktiviteden oluşan bir problemi benzetimli tavlama algoritmasıyla oluşturduğu modelle MATLAB yazılım programını kullanarak çözmüştür. Oluşturduğu modelde, inşaat projelerinde kaynak kısıtlılığı nedeniyle yaşanan ve aktivitenin sürekli bir zamanda tamamlanamamasıyla sonuçlanan durum göz önünde bulundurularak maliyet artışına sebep neden olsa bile daha düzgün bir kaynak profili elde etmeye yarayacak olan aktivite bölünmesini kullanmıştır.

Aktivitelere ait süre bilgisi ile her bir aktivitenin erken başlama, geç bitiş ve bunlara bağlı olarak toplam bolluk miktarları belirlenmiştir.

Tablo 5. 11 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları

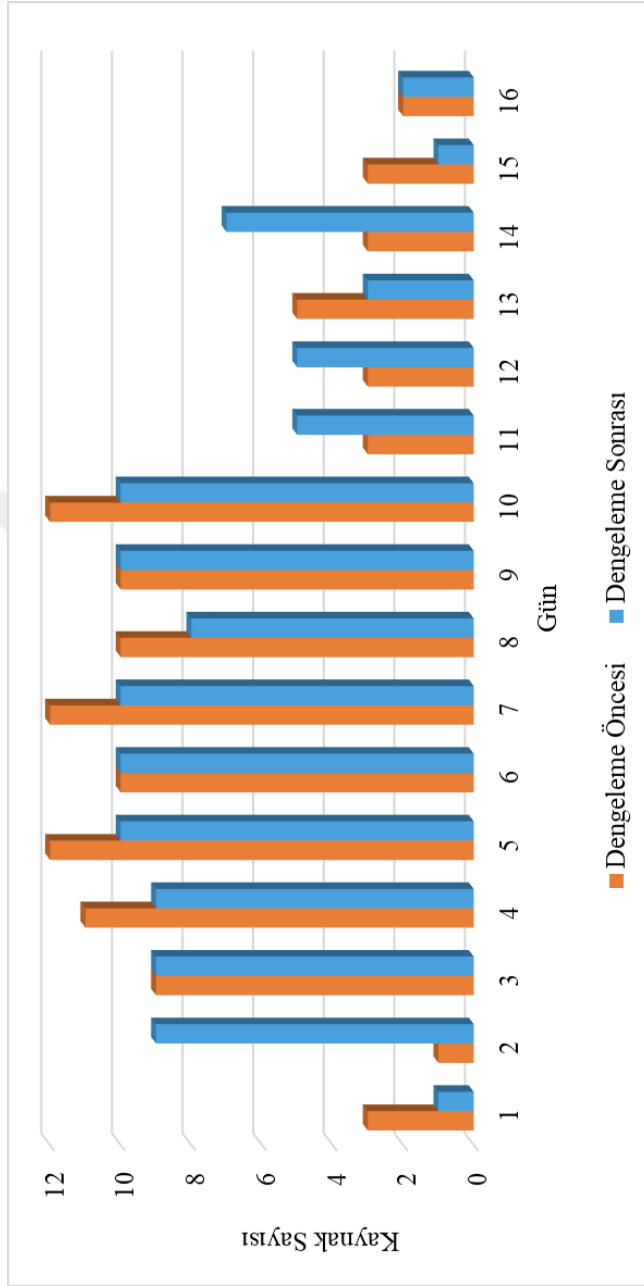
Aktivite	Öncül Aktivite	Süre	Kaynak Sayısı	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
1	-	2	2	0	8	6
2	-	4	1	0	4	0
3	-	1	4	0	4	3
4	1	4	4	2	14	8
5	1,2	3	2	4	11	4
6	2,3	6	4	4	10	0
7	3	6	6	1	10	3
8	4,5	1	0	7	15	7
9	5,7	4	2	7	15	4
10	6,7	5	1	10	15	0
11	8,9,10	1	2	15	16	0

Tablodaki veriler kullanılarak popülasyon sayısı 30 ve iterasyon sayısı 50 alınarak Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmalarıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır.



Şekil 14. 11 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

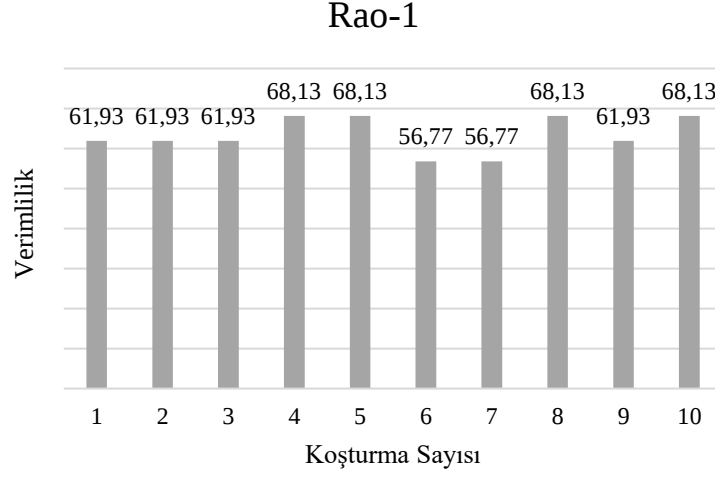
Rao-1 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 12 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 10'a düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %56,77 olan proje verimliliği %68,13'e çıkarılmıştır.



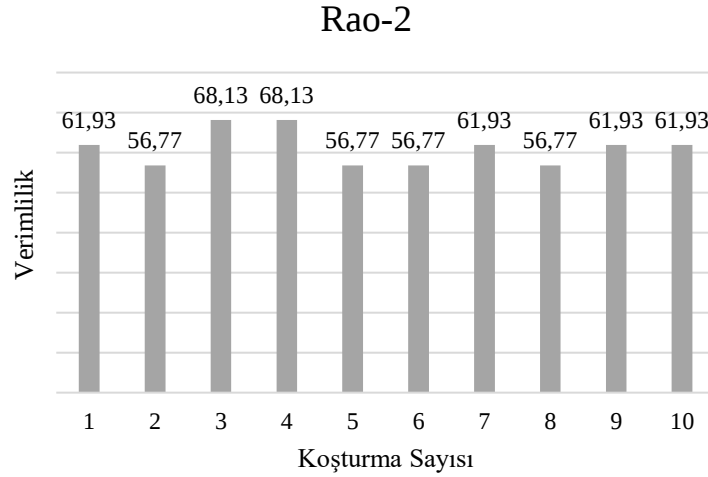
Şekil 15. 11 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-2 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 12 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 10'a düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %56,77 olan proje verimliliği %68,13'e çıkarılmıştır.

Problemin çözümü için optimizasyon yöntemi 10 kez çalıştırılmış ve en iyi sonuç referans alınmıştır. Koşurma sayısına bağlı verimlilik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Şekil 16. 11 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşurma sayısına göre verimlilik değerleri



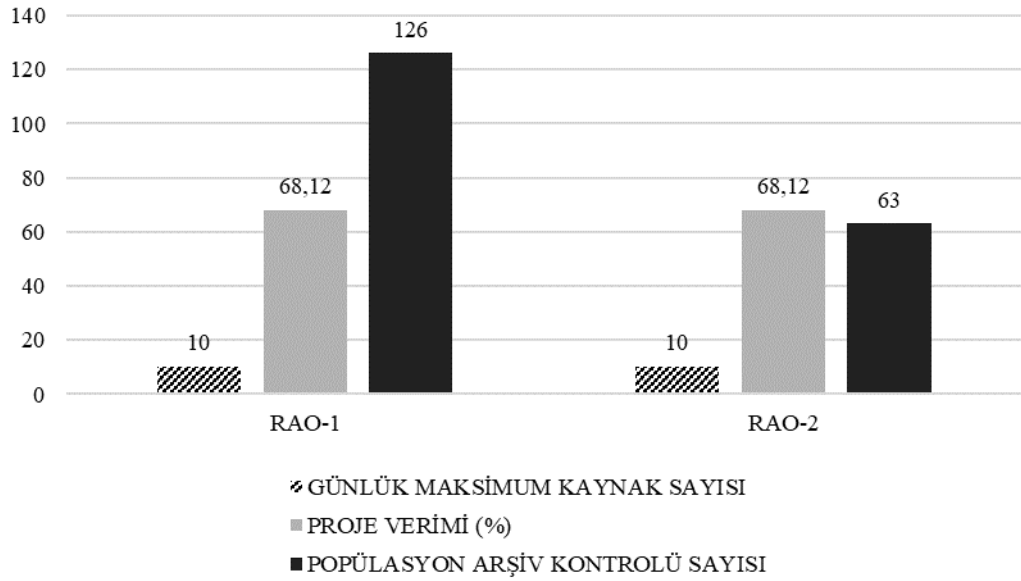
Şekil 17. 11 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşurma sayısına göre verimlilik değerleri

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile aynı çözümlerin tekrarlanmasının önüne geçilerek çözüm süresi kısaltılmıştır.



Şekil 18. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları

Popülasyon sayısı (30) ve iterasyon sayısına (50) bağlı olarak toplam çözüm sayısının 1500 olduğu optimizasyon modelinde Rao-1 yöntemi ile çözüm yapılırken 126 adet çözümün, Rao-2 yöntemi ile çözüm yapılırken ise 63 adet çözümün engellenmesiyle optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 19. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan analizler karşılaştırıldığında her iki yöntemin de günlük maksimum kaynak sayısını azaltmada ve buna bağlı olarak proje verimliliğini artırmada gösterdikleri başarının aynı olduğu yalnızca her iki yöntemde de popülasyon kontrolü sayısının farklı olduğu, popülasyon kontrolü

sayısının artmasının hesaplama süresini de oldukça yüksek oranda artırdığı görülmektedir. Rao-1 optimizasyon algoritmasında 1616 saniye olan çözüm süresi Rao-2 algoritmasında 17 saniye olarak ölçülmüştür.

Kaynak Dağılımı	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	4	0	4	0	0	0
	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0
	0	6	6	0	0	6	6	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	2	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Gün	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Kaynak Sayısı	1	9	9	9	10	10	10	8	10	10	5	5	3	7	1	2	

Şekil 20. 11 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi

Piryonesi (2014)'nin popülasyon sayısını 200, iterasyon sayısını ise 100 kabul ederek MATLAB yazılım programı ve benzetilmiş tavlama algoritma yöntemini kullanarak yaptığı optimizasyon sonucu ulaştığı günlük maksimum kaynak kullanım sayısına bu tez çalışmasında popülasyon sayısı 30, iterasyon sayısı ise 50 alınarak toplamda daha az çözüm sayısı ile ulaşılmıştır.

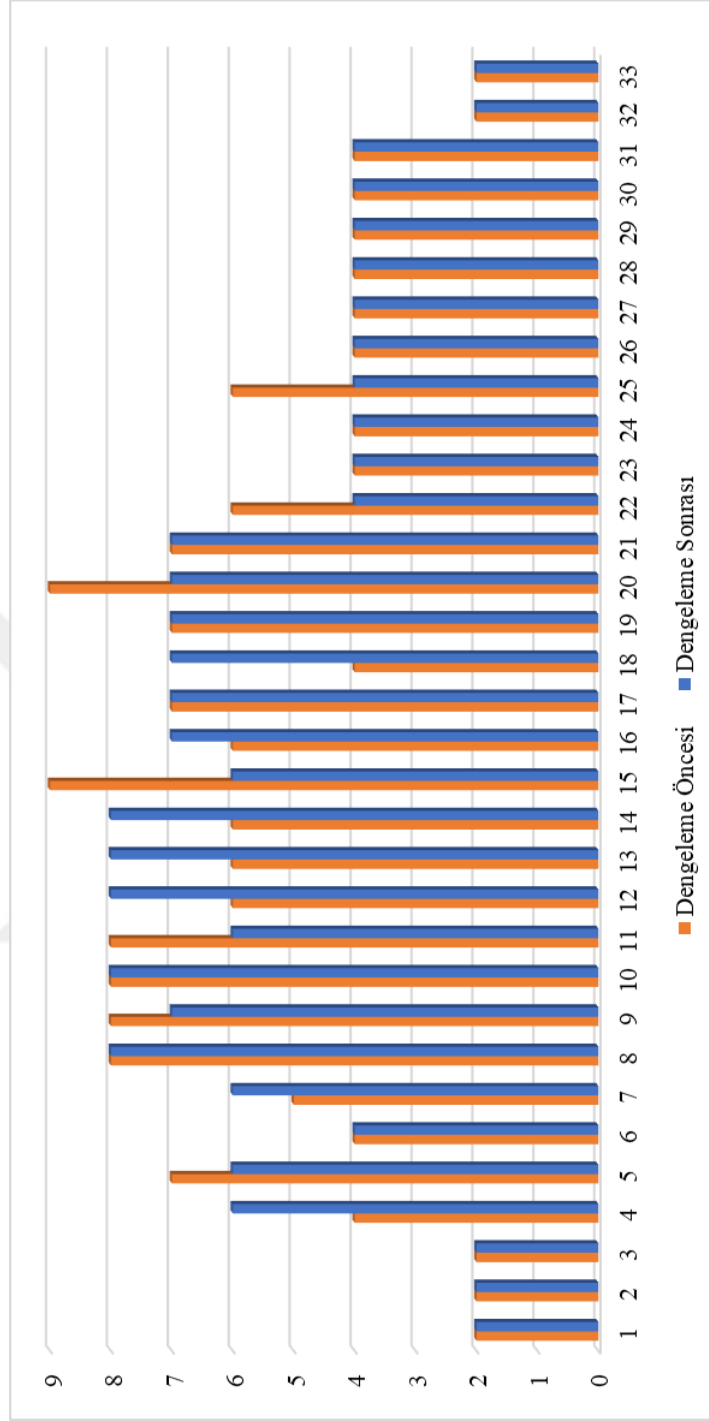
3.3. 15 Aktiviteli Örnek

Çokgör (2016) 15 aktiviteden oluşan bir problemi aktivitelerin bolluk miktarını gösteren gantt şeması üzerinden uygun kaydırılmaların yapılmasıyla günlük kaynak kullanımları arasındaki farkı azaltmış ve maksimum kaynak kullanım sayısını düşürmüştür.

Tablo 6. 15 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları

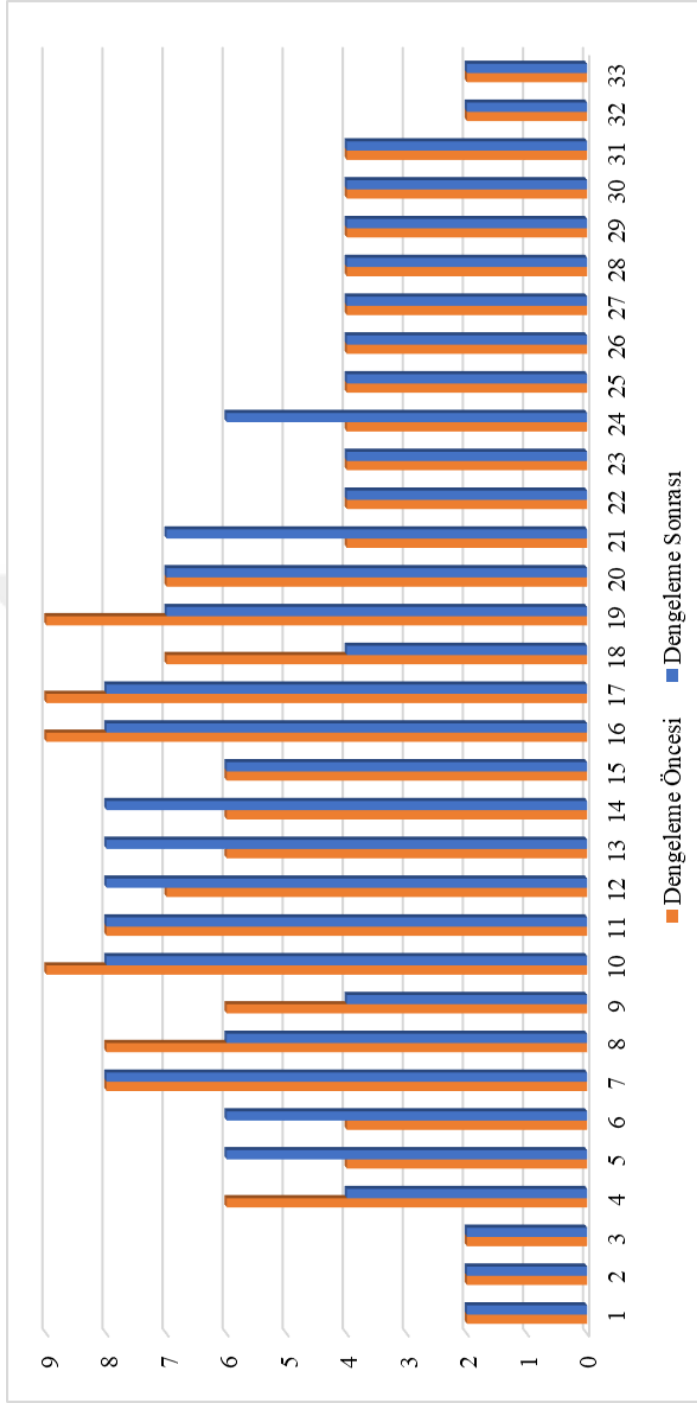
Aktivite	Öncül Aktivite	Süre	Kaynak Sayısı	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
1	-	3	2	0	3	0
2	1	3	2	3	6	0
3	1	3	2	3	8	2
4	1	3	2	3	13	7
5	1	2	1	3	21	16
6	1	3	2	3	26	20
7	2	5	4	6	11	0
8	3	3	2	6	11	2
9	4	3	2	6	16	7
10	7	10	4	11	21	0
11	8	5	2	9	16	2
12	9,11	5	3	14	21	2
13	5,10,12	5	4	21	26	0
14	6,13	5	4	26	31	0
15	14	2	2	31	33	0

Tablodaki veriler kullanılarak popülasyon sayısı 30 ve iterasyon sayısı 50 alınarak sırasıyla Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmalarıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır.



Şekil 21. 15 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

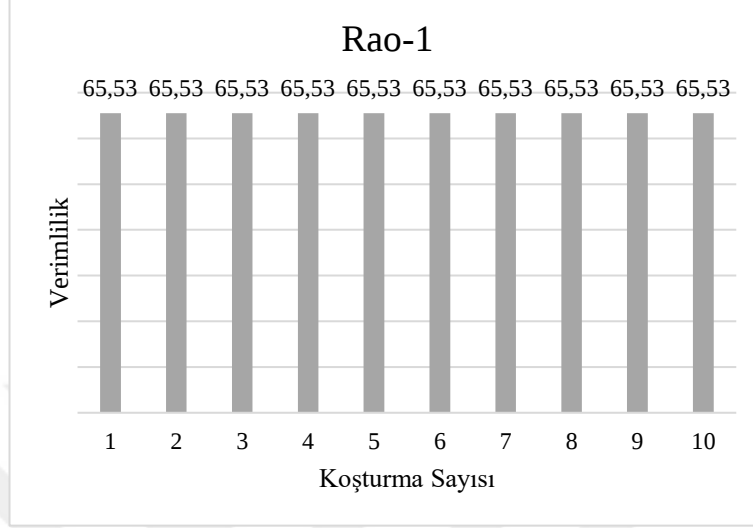
Rao-1 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 9 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 8' e düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %58,25 olan proje verimliliği %65,53'e çıkarılmıştır.



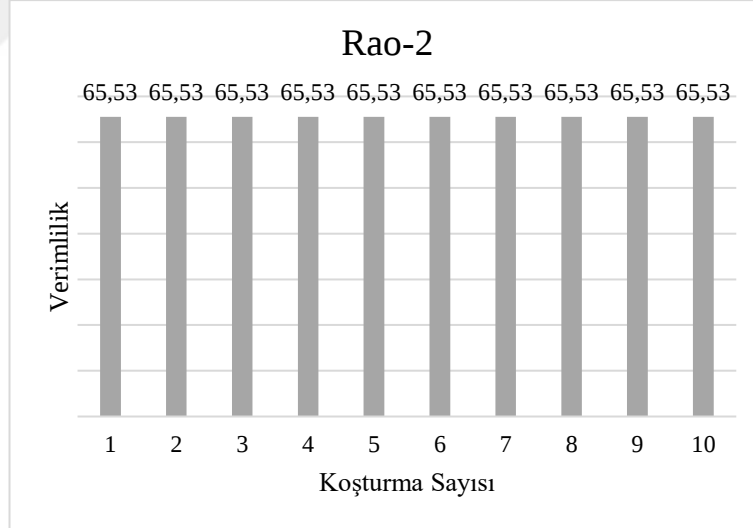
Şekil 22. 15 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-2 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 20 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 17'ye düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %58,25 olan proje verimliliği %65,53'e çıkarılmıştır.

Problemin çözümü için optimizasyon yöntemi 10 kez çalıştırılmış ve en iyi sonuç referans alınmıştır. Koşturma sayısına bağlı verimlilik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Şekil 23. 15 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri



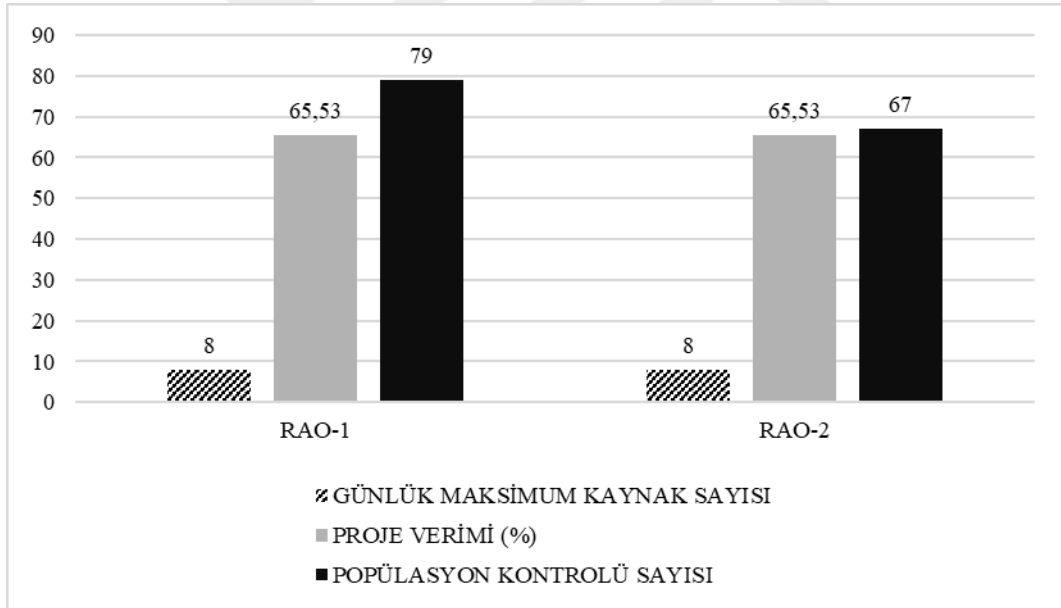
Şekil 24. 15 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile aynı çözümlerin tekrarlanmasının önüne geçilerek çözüm süresi kısaltılmıştır.



Şekil 25. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları

Popülasyon sayısı (30) ve iterasyon sayısına (50) bağlı olarak toplam çözüm sayısının 1500 olduğu optimizasyon modelinde Rao-1 yöntemi ile çözüm yapılırken 79 adet çözümün, Rao-2 yöntemi ile çözüm yapılırken ise 67 adet çözümün engellenmesiyle optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 26. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan analizler karşılaştırıldığında her iki yöntemin de günlük maksimum kaynak sayısını azaltmada ve buna bağlı olarak proje verimliliğini artırmada gösterdikleri başarının aynı olduğu yalnızca her iki yöntemde de popülasyon kontrolü sayısının farklı olduğu görülmektedir. Rao-1

optimizasyon algoritmasında 1561 saniye olan çözüm süresi Rao-2 algoritmasında 137 saniye olarak ölçülmüştür.

[illegible]

Şekil 27. 15 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi

Çokgör (2016) aktivite bölünmesine izin vermeden yaptığı kaynak dengeleme ile günlük maksimum kaynak kullanım sayısını 9 seviyesinden 8 seviyesine, aktivite bölünmesine izin vererek ise 7 seviyesine indirmeyi başarırken bu tez çalışmasında aktivite bölünmesine izin verilmediğinden kaynak dengelemede günlük maksimum kaynak kullanımında 8 değerine ulaşılmıştır.

3.4. 20 Aktiviteli Örnek

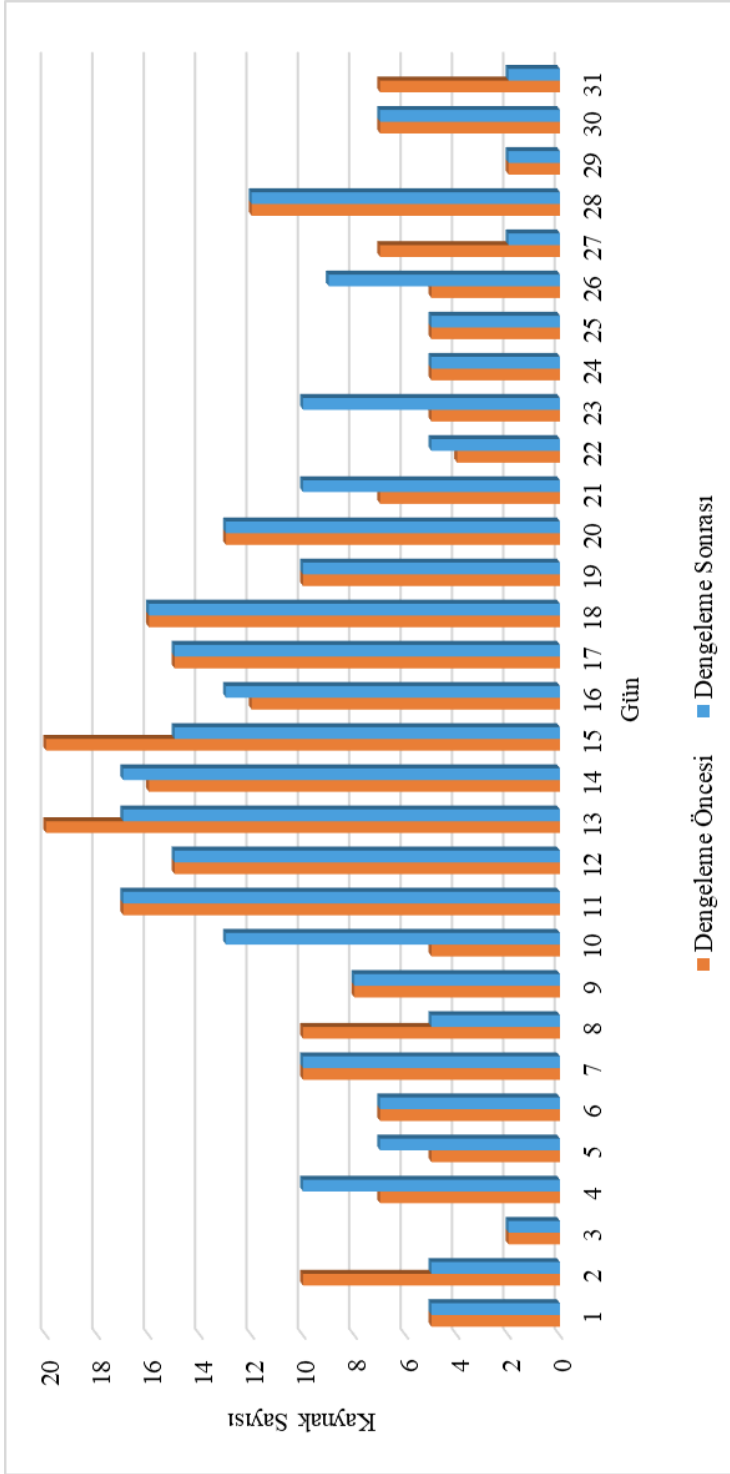
El-Rayes ve Jun (2009) 20 aktiviteden oluşan bir problemi düşük talep dönemlerinde geçici olarak serbest bırakılması ve yüksek talep dönemlerinde daha sonraki bir aşamada yeniden işe alınması gereken kaynakların toplam miktarını ölçmek için ve istenmeyen kaynak dalgalanmalarının neden olduğu atıl ve üretken olmayan kaynak günlerinin toplam sayısını ölçmek için tasarlanan iki yenilikçi kaynak dengeleme metriğinin kaynak kullanımının verimliliğini en üst düzeye çıkaran optimum ve pratik çizelgeler oluşturabilen bir optimizasyon modeline dahil ederek çözmüştür. Analiz sonuçları geliştirilen modelin ve ölçümlerin mevcut ölçümlerden daha iyi performans ve istenmeyen kaynak dalgalanmalarını ve kaynak boşa kalma süresini ortadan kaldırabildiğini göstermiştir.

Aktivitelere ait süre bilgisi ile her bir aktivitenin erken başlama, geç bitiş ve bunlara bağlı olarak toplam bolluk miktarları belirlenmiştir.

Tablo 7. 20 aktiviteli örnek aktivite bolluk miktarları

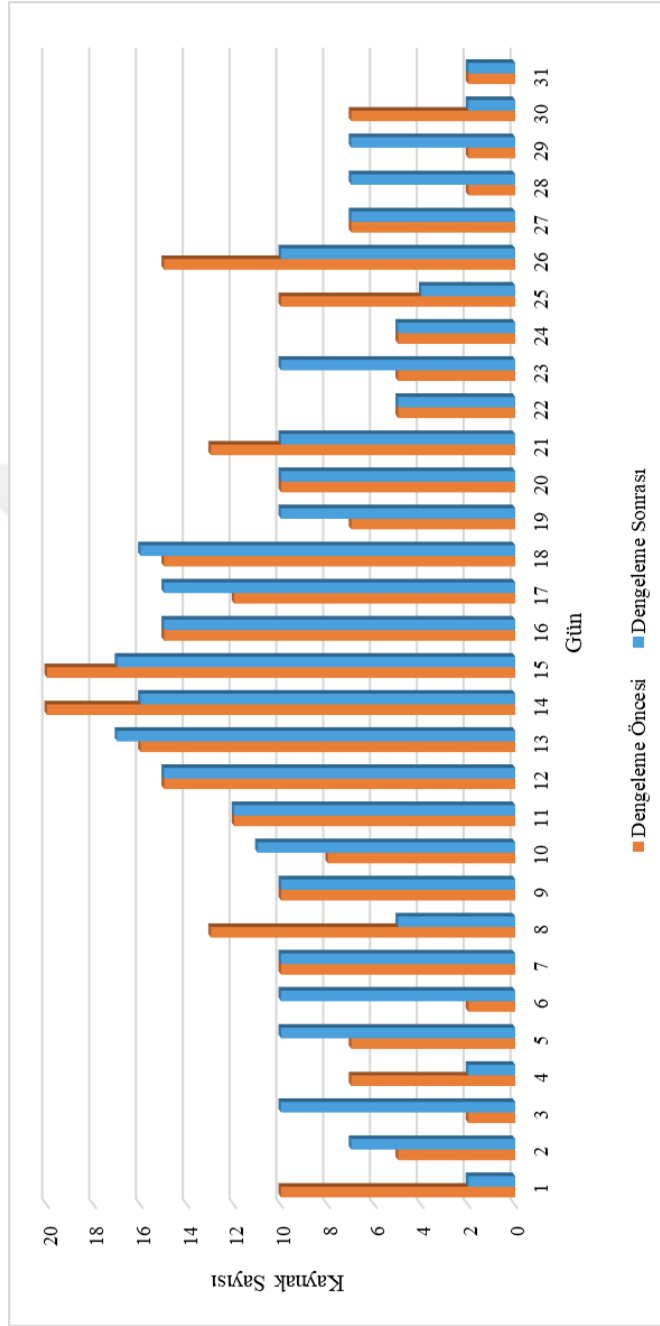
Aktivite	Öncül Aktivite	Süre	Kaynak Sayısı	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
1	-	6	2	0	6	0
2	-	3	3	0	7	4
3	-	6	5	0	11	5
4	1	4	2	6	10	0
5	1,2	6	3	6	13	1
6	1,2	2	0	6	13	5
7	3	2	3	6	13	5
8	4	5	9	10	15	0
9	4,5	1	4	12	17	4
10	5,6,7	2	8	12	15	1
11	6,7	2	3	8	17	7
12	8	6	6	15	21	0
13	9,11	4	3	13	21	4
14	8,10	2	3	15	21	4
15	10	3	6	14	18	1
16	12,13,14	5	4	21	26	0
17	12,15	2	5	21	28	5
18	15	8	1	17	26	1
19	16,18	5	2	26	31	0
20	17	3	5	23	31	5

Tablodaki veriler kullanılarak popülasyon sayısı 30 ve iterasyon sayısı 50 alınarak sırasıyla Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmalarıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır.



Şekil 28. 20 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

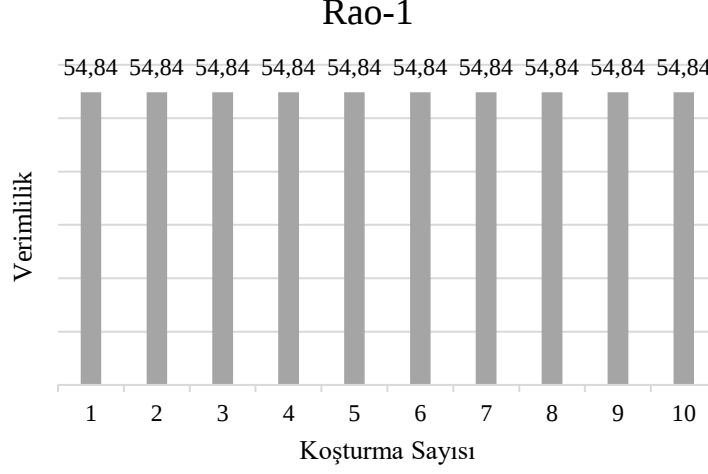
Rao-1 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 20 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 17'ye düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %45 olan proje verimliliği %54,84'e çıkarılmıştır.



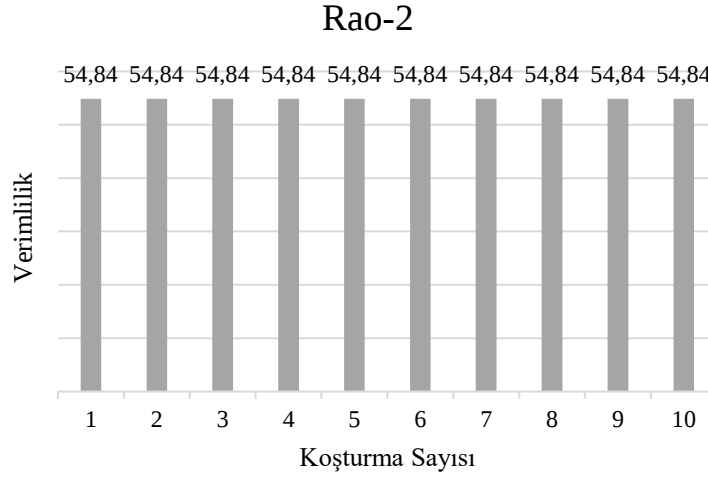
Şekil 29. 20 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-2 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 20 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 17'ye düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %45 olan proje verimliliği %54,84'e çıkarılmıştır.

Problemin çözümü için optimizasyon yöntemi 10 kez çalıştırılmış ve en iyi sonuç referans alınmıştır. Koşturma sayısına bağlı verimlilik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Şekil 30. 20 aktiviteli örnek Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri



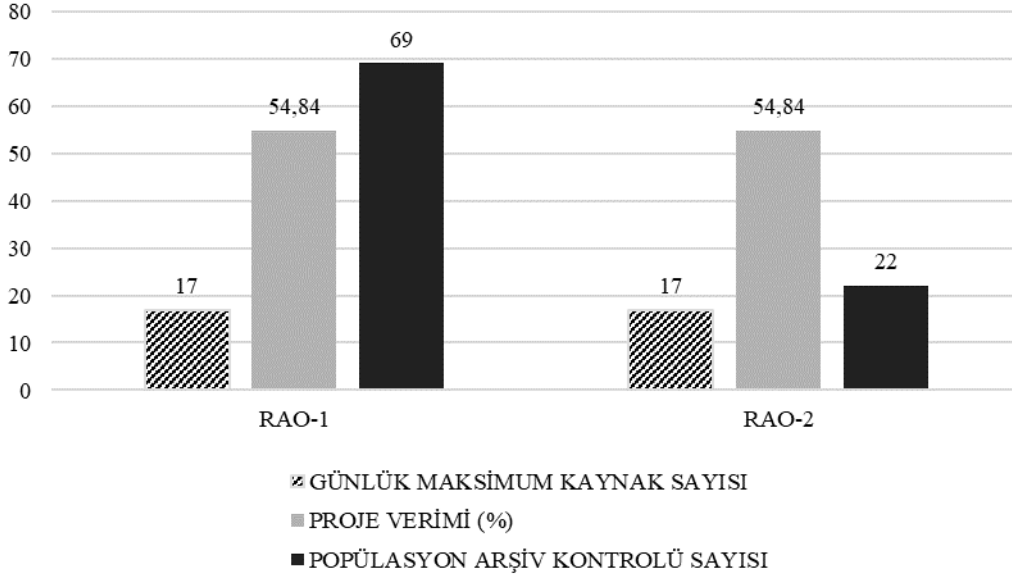
Şekil 31. 20 aktiviteli örnek Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile aynı çözümlerin tekrarlanmasının önüne geçilerek çözüm süresi kısaltılmıştır.



Şekil 32. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları

Popülasyon sayısı (30) ve iterasyon sayısına (50) bağlı olarak toplam çözüm sayısının 1500 olduğu optimizasyon modelinde Rao-1 yöntemi ile çözüm yapılırken 69 adet çözümün, Rao-2 yöntemi ile çözüm yapılırken ise 22 adet çözümün engellenmesiyle optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 33. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan analizler karşılaştırıldığında her iki yöntemin de günlük maksimum kaynak sayısını azaltmada ve buna bağlı olarak proje verimliliğini artırmada gösterdikleri başarının aynı olduğu yalnızca her iki yöntemde de popülasyon kontrolü sayısının farklı olduğu, popülasyon kontrolü sayısının artmasının hesaplama süresini de oldukça yüksek oranda artırdığı görülmektedir. Rao-1 optimizasyon algoritmasında 1254 saniye olan çözüm süresi Rao-2 algoritmasında 35 saniye olarak ölçülmüştür.

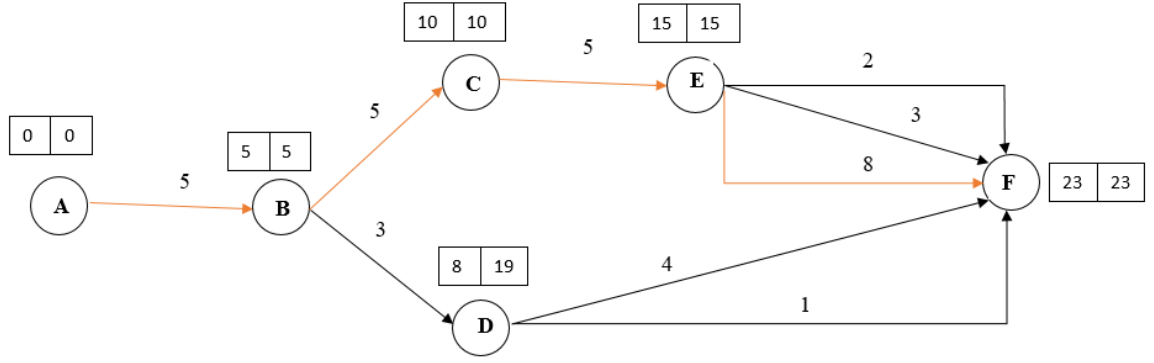
[illegible]

Şekil 33. 15 aktiviteli örnek kaynak dağılımı zaman matrisi

Yapılan analiz sonuçları ve El-Rayes (2009)'ın ulaştığı sonuçlar karşılaştırıldığında her iki çalışmada da günlük maksimum kaynak kullanımı sayısının aynı olduğu böylece bu tez çalışmasında kaynak dengelemede elde edilen başarının El-Rayes (2009) ile aynı başarıyı yakaladığı görülmüştür.

3.5. 9 Aktiviteli Artena Projesi

Özel bir inşaat firmasının gerçekleştireceği bir projeye ait 9 aktiviteli problemin aktivite bağımlılıkları dikkate alınarak hazırlanan CPM ağ diyagramı aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



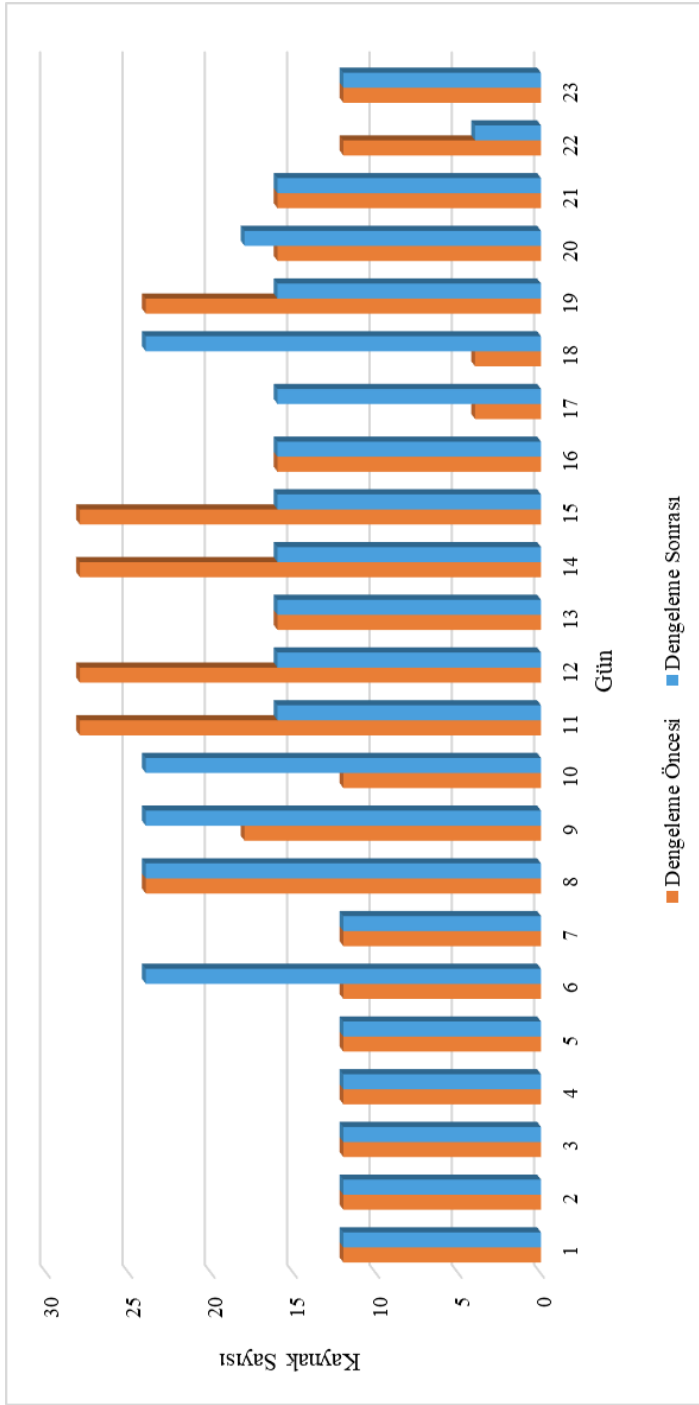
Şekil 34. 9 aktiviteli Artena Projesi CPM ağ diyagramı

Aktivitelere ait süre bilgisi ile her bir aktivitenin erken başlama, geç bitiş ve bunlara bağlı olarak toplam bolluk miktarları belirlenmiştir.

Tablo 8. 9 aktiviteli Artena Projesi aktivite bolluk miktarları

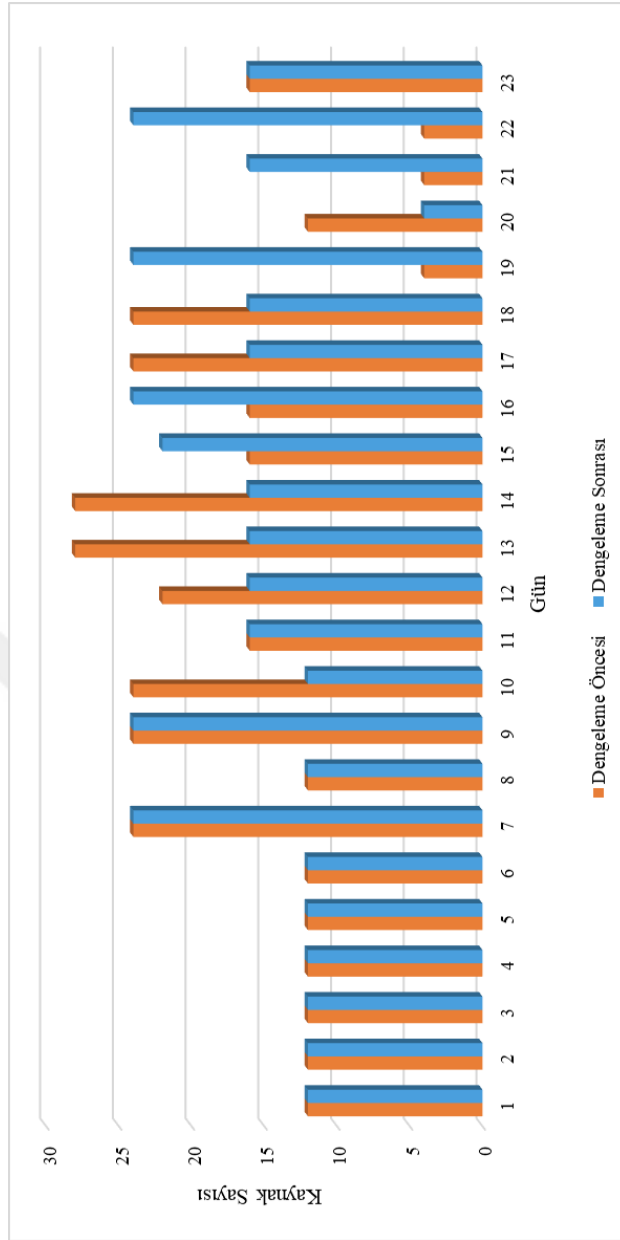
Aktivite	Öncül Aktivite	Süre	Kaynak Sayısı	Erken Başlama	Geç Bitiş	Toplam Bolluk
1	-	5	12	0	5	0
2	1	5	12	5	10	0
3	2	5	16	10	15	0
4	3	2	12	15	23	6
5	3	3	8	15	23	5
6	1	3	12	5	19	11
7	6	4	12	8	23	11
8	6	1	6	8	23	14
9	3	8	4	15	23	0

Tablodaki veriler kullanılarak MATLAB yazılım programıyla popülasyon sayısı 30 ve iterasyon sayısı 50 alınarak Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon algoritmalarıyla kaynak dengelemesi yapılmıştır.



Şekil 35. 9 aktifiteli Artena Projesi Rao-1 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-1 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 28 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 24'e düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %57,45 olan proje verimliliği %67,03'e çıkarılmıştır.



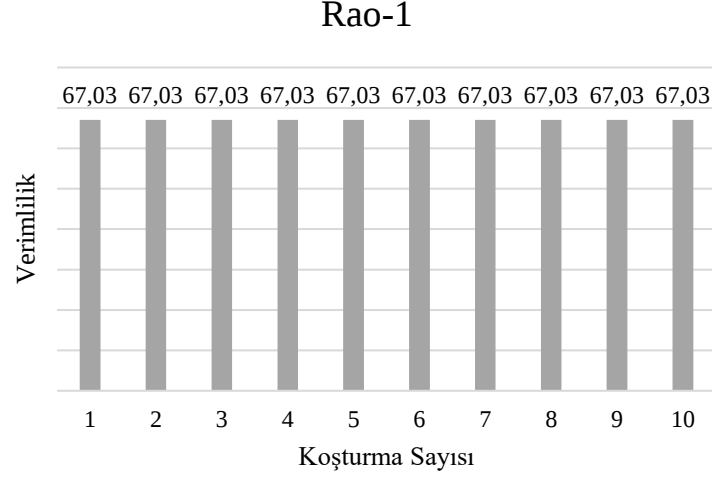
Şekil 36. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-2 algoritması kaynak dengeleme sonuçları

Rao-2 optimizasyon algoritmasına göre çözüm yapıldığında dengeleme öncesinde 28 olan günlük maksimum kaynak kullanım sayısı dengeleme sonrasında 24'e düşürülmüştür. Proje süresi boyunca gerçekleşen kaynak kullanımı dağılımındaki dalgalanmalar arasında oluşan farkın da azaldığı görülmüştür. Böylece ihtiyaç duyulan toplam işgücü miktarı değişmeden %57,45 olan proje verimliliği %67,03'e çıkarılmıştır.

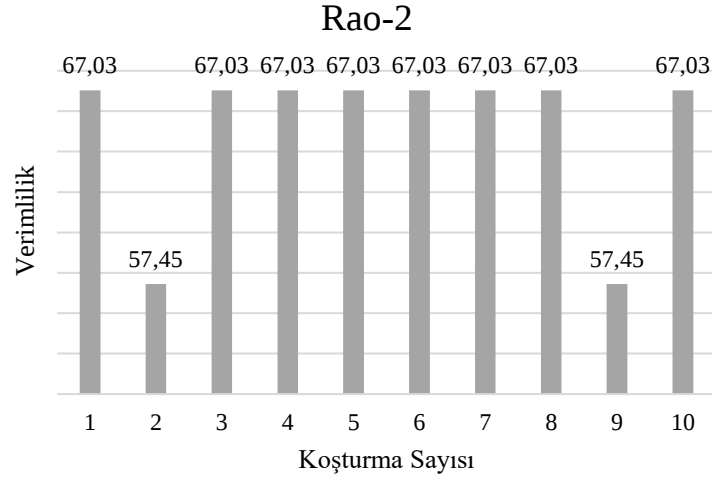
Kaynak Dağılımı	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16	16	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	8	0	0	0	8	0
	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	12	12	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gün	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23
Kaynak Sayısı	12	12	12	12	12	12	24	12	24	12	16	16	16	16	22	24	16	16	24	4	16	24	16	16

Şekil 37. 9 aktiviteli Artena Projesi örnek kaynak dağılımı zaman matrisi

Problemin çözümü için optimizasyon yöntemi 10 kez çalıştırılmış ve en iyi sonuç referans alınmıştır. Koşturma sayısına bağlı verimlilik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

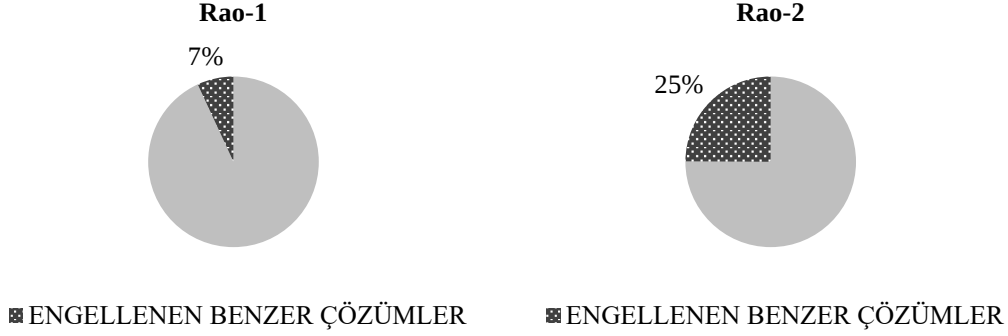


Şekil 38. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-1 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri



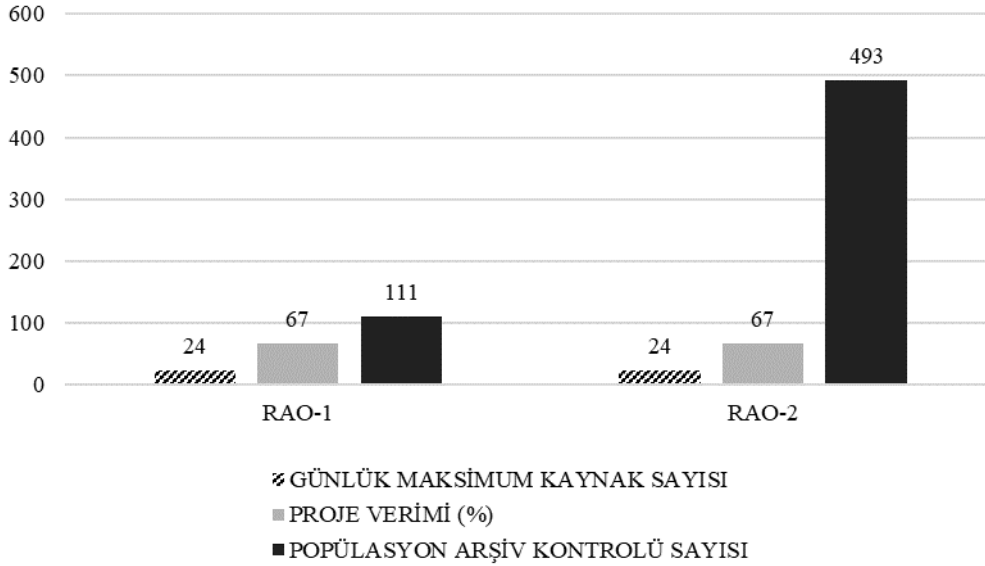
Şekil 39. 9 aktiviteli Artena Projesi Rao-2 algoritması koşturma sayısına göre verimlilik değerleri

Kaynak dengeleme probleminin çözümünde popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile aynı çözümlerin tekrarlanmasının önüne geçilerek çözüm süresi kısaltılmıştır.



Şekil 40. Rao-1 ve Rao-2 algoritması popülasyon arşiv kontrolü oranları

Popülasyon sayısı (30) ve iterasyon sayısına (50) bağlı olarak toplam çözüm sayısının 1500 olduğu optimizasyon modelinde Rao-1 yöntemi ile çözüm yapılırken 111 adet çözümün, Rao-2 yöntemi ile çözüm yapılırken ise 493 adet çözümün engellenmesiyle optimizasyon süresinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 41. Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Rao-1 ve Rao-2 optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan analizler karşılaştırıldığında her iki yöntemin de günlük maksimum kaynak sayısını azaltmada ve buna bağlı olarak proje verimliliğini artırmada gösterdikleri başarının aynı olduğu yalnızca

her iki yöntemde de popülasyon kontrolü sayısının farklı olduğu, popülasyon kontrolü sayısının artmasının hesaplama süresini de oldukça yüksek oranda artırdığı görülmektedir. Rao-1 optimizasyon algoritmasında 1290 saniye olan çözüm süresi Rao-2 algoritmasında 1478 saniyeye yükselmiştir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnşaat projelerinin ve proje kaynaklarının planlanması projenin başarıyla tamamlanması için gerek şartlardandır. Kaynakların planlanması ve doğru zamanda doğru miktarda kaynak kullanımıyla projenin verimliliği artırılır. Verimliliği artırmaya yönelik çalışmalar arasında kaynak dengeleme probleminin çözümü önemli yer tutmaktadır. Bu tez çalışmasında kaynak dengeleme problemi Rao optimizasyon yöntemleriyle çözülmüş, sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve aynı veya yakın sonuçlara çok daha az çözüm ile ulaşıldığı görülmüştür. Optimizasyon yöntemine yapılan popülasyon arşiv kontrolü eklentisi ile benzer çözümlerin yeniden yapılmasının önüne geçilerek işlem yükü hafifletilmiş ve çözüm süresi kısaltılmıştır. Aynı zamanda sonuçlar kendi arasında karşılaştırılarak ilk üç incelemede çözüm sürelerine bakıldığında Rao-2 algoritmasının Rao-1 algoritmasına göre çok daha hızlı sonuç verdiği görülmesine rağmen dördüncü incelemede Rao-1 algoritmasının Rao-2 algoritmasına göre daha hızlı sonuç verdiği görülerek bu konuda herhangi bir genelleme yapılamayacağı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında kaynak dengeleme problemi yalnızca aralarında bitir-başla (finish to start) ilişkisi bulunan aktivitelerin bulunduğu ağ diyagramlarına sahip problemler için çözülmüştür. Fakat projelerin doğası gereği iş programlarının yalnızca bu tip bağlantılardan oluşmadığı bilinmektedir. İş programlarında CPM'de bulunan başla-başla (start to start), bitir-bitir (finish to finish) ya da başla-bitir (start to finish) bağlantı türlerine de rastlanmaktadır. Bu konuda çalışma yapmak isteyen araştırmacılara farklı ilişki türlerini barındıran aktivitelerden oluşan ağ diyagramlarına sahip problemleri incelemeleri önerilir.

Bu tez çalışmasında yalnızca tek tip kaynak kullanılarak kaynak dengeleme problemi incelenmiştir. Çoklu kaynak dikkate alınarak problem çözülebilirken farklı optimizasyon teknikleri ile çalışma yeniden yapılabilir ve zaman-maliyet ödünleşim problemi ile birlikte de ele alınabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abadi, N. N. S., Bagheri, M. and Assadi, M., 2016. Multiobjective Model for Solving Resource-Leveling Problem with Discounted Cash Flows, International Transactions in Operational Research, 1-22.
- Acıkara, T., 2016. Türk İnşaat Sektöründe Verimlilik Faktörleri Uygulamalarının Değerlendirilmesi: En İyi Verimlilik Uygulamaları Endeksi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Agin, N., 1966. Optimum Seeking with Branch and Bound, Management Science, 176-185.
- Akın, M., 2022. Üretim Sektöründeki Bir Firmada Değer Akış Haritalandırma ve Oranlarla İşgücü Verimlilik Modeli ile Süreç İyileştirme Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Albayatı, N. H. F., 2021. A Comparative Study on Resource Leveling Capabilities of Commercial Project Management Software Packages for Projects with Resource Constraints, Master Thesis, Atılım University, Ankara.
- Alsayegh, H. and Hariga, M., 2012. Hybrid Meta-Heuristic Methods for The Multi-Resource Leveling Problem with Activity Splitting, Automation in Construction, 27, 89-98.
- Anagnostopoulos, K. P. and Koulinas, G. K., 2010. A Simulated Annealing Hyperheuristic for Construction Resource Levelling, Construction Management and Economics, 28, 163-175.
- Ankara, H., 2021. Examination of Project Management Methodology: Factors Affecting the Success of Project Firms in the Construction Sector, Master Thesis, Çankaya University, Ankara.
- Antill, J. M. and Woodhead, R. W., 1990. Critical Path Methods in Construction Practice, Fourth Edition, A Wiley-İnterScience Publication, Canada.
- Ashuri, B. and Tavakolan, M., 2012. Fuzzy Enabled Hybrid Genetic Algorithm–Particle Swarm Optimization Approach to Solve TCRO Problems in Construction Project Planning, Journal of Construction Engineering and Management, 138, 1065-1074.
- Ashuri, B. and Tavakolan, M., 2015. A Shuffled Frog-Leaping Model for Solving Time-Cost-Resource Optimization (TCRO) Problems in Construction Project Planning, Journal of Computing in Civil Engineering, 29, 1-39.

- Atan, T. and Eren, E., 2018. Optimal Project Duration for Resource Leveling, European Journal of Operational Research, 266, 508-520.
- Atin, S. and Lubis, R., 2019. Implementation of Critical Path Method in Project Planning and Scheduling, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 662, 2, 1-6.
- Bandelloni, M., Tucci, M., and Rinaldi, R., 1994. Optimal Resource Leveling Using Non-Serial Dynamic Programming, European Journal of Operational Research, 78, 162-177.
- Baysal, T., 2010. Çelik Yapıların Tasarım, Üretim ve Montaj Sürecinde Kaynak Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bodunwa, O. K. and Makinde, J. O., 2020. Application of Critical Path Method (CPM) and Project Evaluation Review Techniques (PERT) in Project Planning and Scheduling, Journal of Mathematics and Statistical Science, 6, 1-8.
- Boushaala, A. AM., 2014. An Approach for Project Scheduling Using PERT/CPM and Petri Nets (PNs) Tools, International Journal of Modern Engineering Research, 3, 5, 3200-3206.
- Burgess, A., Killebrew, J. B., 1962. Variation in Activity Level on A Cyclical Arrow Diagram, Journal of Industrial Engineering, 13, 2, 76-83. ; alıntıl原因 Albayrı, N. H. F., 2021. A Comparative Study on Resource Leveling Capabilities of Commercial Project Management Software Packages for Projects with Resource Constraints, Master Thesis, Atılım University, Ankara.
- Chua, D. K. H., 1996. Chan, W. T. and Kannan, G., Scheduling with Co-Evolving Resource Availability Profiles, Civil Engineering Systems, 13, 311-329.
- Chung, E., Edward Designer, <https://edward-designer.com/web/short-history-pmbok-guide-pmi/> 24 Haziran 2022.
- Çokgör, O., [http://proje-yonetimi-bilgilendirme-brifingi-gazi-mayis-2016%20\(2\).pdf](http://proje-yonetimi-bilgilendirme-brifingi-gazi-mayis-2016%20(2).pdf) 8 Şubat 2023
- Çimen, S., 1994. Projelerde Başarıyı Belirleyen Faktörler ve Kamu Kuruluşlarında Bu Faktörlere Yaklaşımın Belirlenmesi, Uzmanlık Tezi, Devlet Planlama Teşkilatı, Yatırımlar Sektör Programları ve Koordinasyonu Genel Müdürlüğü Tetkik ve Tahlil Dairesi.
- Demeulemeester, E., Herroelen, W., 1992. A Branch and Bound Procedure for the Multiple Resource Constrained Project Scheduling Problem, Management Science, 38, 12, 1803-1818.
- Easa, S. M., 1989. Resource Leveling in Construction by Optimization, Journal Construction Engineering and Management, 115, 2, 302-316.

- EC, Aid Delivery Methods, 2004. Project Cycle Management Guidelines, Brussels.
- El-Rayes, K. and Jun, D. H., 2009. Optimizing Resource Leveling in Construction Projects, Journal of Construction Engineering and Management, 135, 11, 1172-1180.
- El-Sayegh, S., 2018. Resource Levelling Optimization Model Considering Float Loss Impact, Engineering, Construction and Architectural Management, 25, 639-653.
- Elwany, M. H., Korish, L. E., Barakat, M. A., and Hafez, S. M., 1998. Resource Smoothing in Repetitive Projects, Computers and Industrial Engineering, 35, 3-4, 415-418.
- Erzurum, T., 2017. Kaynak Dengeleme Problemlerinin Arama Uzayının Belirlenmesi, Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi, Samsun, 437-453.
- Erzurum, T., 2019. Kaynak Dengeleme Probleminin Optimum veya Yakın Optimum Çözülmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Geng, J. Q., Weng, L. P. and Liu, S. H., 2011. An Improved Ant Colony Optimization Algorithm for Nonlinear Resource-Leveling Problems, Computers and Mathematics with Applications, 61, 8, 2300-2305.
- Georgy, M. E., 2008. Evolutionary Resource Scheduler for Linear Projects, Automation in Construction, 17, 5, 573–583.
- Harris, R. B., 1990. Packing Method for Resource Leveling (PACK), Journal of Construction Engineering and Management, 116, 2, 331-350.
- He, L. and Zang, L., 2013. Dynamic Priority Rule-Based Forward-Backward Heuristic Algorithm for Resource Levelling Problem in Construction Project, Journal of the Operational Research Society, 64, 8, 1106–1117.
- Hegazy, T., 1999. Optimization of Construction Time–Cost Trade-Off Analysis Using Genetic Algorithms, Can. J. Civ. Eng., 26, 6, 685-697.
- Hegazy, T. and Erşahin, T., 2001. Simplified Spreadsheet Solutions. II: Overall Schedule Optimization, Journal of Construction Engineering and Management, 127, 6, 469-475.
- 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.

- Hussein, S., 2014. The History of Project Management, International Journal of Management & Information System, 18, 4, 232-240.
- Iranagh, M. A., 2012. Sonmez, R., A Genetic Algorithm for Resource Leveling of Construction Projects, Management, 1047-1054.
- Jeetendra, V. A., Chetty, O. V. K. and Reddy, J. P., 2000. Petri Nets for Project Management and Resource Levelling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 7, 516-520.
- Jun, D. H. and El-Rayes, K., 2011. Multiobjective Optimization of Resource Leveling and Allocation During Construction Scheduling, Journal of Construction Engineering and Management, 137, 12, 1080-1088.
- Jun, D. H. and El-Rayes, K., 2011. Fast and Accurate Risk Evaluation for Scheduling Large-Scale Construction Projects, Journal of Computing in Civil Engineering, 25, 5, 407-417.
- Kaiafa, S., Chassiakos, A. P., 2015. A Genetic Algorithm for Optimal Resource-Driven Project Scheduling, Procedia Engineering, 123, 260-267.
- Karaa, F. A. and Nasr, A. Y., 1986. Resource Management in Construction, Journal of Construction Engineering and Management, 112, 3, 346-357.
- Kartam, N. and Tongthong, T., 1998. An Artificial Neural Network for Resource Leveling Problems, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 12, 3, 273-287.
- Kerzner, H., 2017. Project Management A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling, 10th Edition, John Wiley & Sons.
- Kuban, D., 2018. Mimarlık Kavramları, 13.Baskı, Yem Yayın.
- Kwak, Y. H., 2003. Brief History of Project Management, In K. A. Carayannis, The Story of Managing Projects (p. Chapter 2), Quorum Books.
- Leu, S. S., Chen, A. T. and Yang, C. H., 1999. Fuzzy Optimal Model for Resource-Constrained Construction Scheduling, Journal of Computing in Civil Engineering, 13, 3, 207-216.
- Leu, S. S., Yang, C. H. and 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.
- Li, H. and Demeulemeester, E., 2016. A Genetic Algorithm for the Robust Resource Leveling Problem, Journal of Scheduling, 19, 1, 43-60.

- Li, H., Wang, M. and Dong, X., 2019. Resource Leveling in Projects with Stochastic Minimum Time Lags, Journal Construction Engineering and Management, 145, 4, 1-13.
- Li, H. and Dong, X., 2018. Multi-Mode Resource Leveling in Projects with Mode-Dependent Generalized Precedence Relations, Expert Systems with Applications, 97, 193–204.
- Li, H., Xiong, L., Liu, Y. and Li, H., 2018. An Effective Genetic Algorithm for The Resource Levelling Problem with Generalised Precedence Relations, International Journal of Production Research, 56, 5, 2054-2075.
- Mason, A. T. and Moodie, C. L., 1971. A Branch and Bound Algorithm for Minimizing Cost in Project Scheduling, Management Science, 18, 4-part-i, 158-173.
- Mattila, K.G. and Abraham, D. M., 1998. Resource Leveling of Linear Schedules Using Integer Linear Programming, Journal of Construction Engineering and Management, 124, 3, 232-244.
- Mubarak, S., 2010. Construction Project Scheduling and Control, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Mutlu, M. Ç., 2010. A Branch and Bound Algorithm for Resource Leveling Problem, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- Neumann, K. and Zimmermann, J., 1999. Resource Levelling for Projects with Schedule-Dependent Time Windows, European Journal of Operational Research, 117, 3, 591-605.
- Nübel, H., 2001. The Resource Renting Problem Subject to Temporal Constraints, OR Spektrum, 23, 3, 359-381.
- Orozbaev, N., 2022. Yapım İşlerinde Kaynak Dengeleme Problemleri için Sezgisel Yöntemlerin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Pehlivan, Y. V., 2017. Optimizasyon: Temel Kavramlar & Yöntemler, Birinci Baskı, Ankara.
- Piryonesi, S. M., Nasser, M. and Ramezani, A., 2019. Resource Leveling in Construction Projects with Activity Splitting and Resource Constraints: A Simulated Annealing Optimization, Canadian Journal of Civil Engineering, 46, 2, 1-13.
- Piryonesi, S. M., Nasser, M. and Tavakolan, M., 2014. Resource Leveling in Construction Projects Using Simulated Annealing with Activity Splitting Allowed and Limited Resource Availabilities, Proceedings of 8th National Congress on Civil Engineering, May, 1-3.

- PMI, 2000. The Standard for Project Management and A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Second Edition, Project Management Institute, Pennsylvania.
- PMI, 2017. A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Sixth Edition, Project Management Institute, Pennsylvania.
- PMI, 2021. The Standard for Project Management and A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Seventh Edition, Project Management Institute, Pennsylvania.
- Ponz-Tienda, J. L., Salcedo-Bernal, A., Pellicer, E. and Benlloch-Marco, J., 2017. Improved Adaptive Harmony Search Algorithm for the Resource Leveling Problem with Minimal Lags, Automation in Construction, 77, 82-92.
- Ponz-Tienda, J. L., Yepes, V., Pellicer, E. ve Moreno-Flores, J., 2013. The Resource Leveling Problem with Multiple Resources Using an Adaptive Genetic Algorithm, Automation in Construction, 29, 161-172.
- Prayogo, D., Cheng, M. Y., Wong, F. T., Tjandra, D. and Tran, D. H., 2018. Optimization Model for Construction Project Resource Leveling Using A Novel Modified Symbiotic Organisms Search, Asian Journal of Civil Engineering, 19, 5, 625–638.
- Rao, R. V. and Pawar, R. B., 2020. Self-adaptive Multi-population Rao Algorithms for Engineering Design Optimization, Applied Artificial Intelligence an International Journal, 34, 3, 187-250.
- Rao, R. V., 2020. Three Metaphor-less Simple Algorithms for Solving Optimization Problems, International Journal of Industrial Engineering Computations, 11, 1, 107-103.
- Razavi, N., Mozayani, N., 2007. A Resource Leveling Model Based on Genetic Algorithms: Activity Splitting Allowed, IMECS, 109-114.
- Roca, J., Pugnaghi, E. and Libert, G., 2008. Solving an Extended Resource Leveling Problem with Multiobjective Evolutionary Algorithms, World Academy of Science, Engineering and Technology, 46, 712-723.
- Senouci, A. B. and Eldin, N. N., 2004. Use of Genetic Algorithms in Resource Scheduling of Construction Projects, Journal of Construction Engineering and Management, 130, 6, 869-877.
- Seyisoğlu, B., 2020. Integrated Resource Leveling and Cash Flow Optimization for Construction Projects Using Symbiotic Organisms Search Algorithm, Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Shamim, M. I., 2022. Exploring the Success Factors of Project Management, American Journal of Economics and Business Management, 5,7, 64-72.

- Son, J. and Mattila, K. G., 2004. Binary Resource Leveling Model: Activity Splitting Allowed, Journal of Construction Engineering and Management, 130, 6, 887-894.
- Son, J. and 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.
- Stare, A., 2019. Project Management, Ljubljana: Faculty of Economics University of Ljubljana.
- Türkay, Metin, Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodları. <http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/Optimizasyon.pdf>. 8 Şubat 2023
- Tran, H. H. and Hoang, N .D., 2014. A Novel Resource-Leveling Approach for Construction Project Based on Differential Evolution, Journal of Construction Engineering, 1-7.
- Wang, L. and Zheng, D. Z., 2001. An Effective Hybrid Optimization Strategy for Job-Shop Scheduling Problems, Computers & Operations Research, 28, 6, 585-596.
- Woodworth, B. M. and Willie, C. J., 1975. A Heuristic Algorithm for Resource Leveling in Multi-Project, Multi-Resource Scheduling, Decision Sciences, 6, 3, 525-540.
- Yeniocak, H., 2013. An Efficient Branch and Bound Algorithm for the Resource Leveling Problem, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- Yılmaz, Y., 2019. İşgücü Verimliliğini Etkileyen Faktörlerin Analizi: Bütüncül Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Younis, M. A., Saad, B., 1996. Optimal Resource Leveling of Multi-Resource Projects, 19th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 31, 1-2, 1-4.
- Zheng, D. X.M., NG, S. T. and Kumaraswamy, M., 2003. GA-Based Multiobjective Technique for Multi-Resource Leveling, Construction Research Congress: Wind of Change: Integration and Innovation, 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğba SAĞLAM, ilköğretimini 2011 yılında Yomra Merkez İlköğretim Okulu'nda ve ortaöğretimini 2015 yılında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü birincilikle kazandı ve lisans eğitimini 2019 yılında burada tamamladı. Aynı yıl başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine halen devam etmekte olup yabancı dil olarak iyi derecede İngilizce bilmektedir.

