

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAK DENGELEME PROBLEMİNİN
OPTİMUM VEYA YAKIN OPTİMUM ÇÖZÜLMESİ



Tuğba ERZURUM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2019

Tezin Başlığı: Kaynak Dengeleme Probleminin Optimum veya Yakın Optimum özölmesi

Tezi Hazırlayan: Tuğba ERZURUM

Sınav Tarihi: 25.01.2019

Yukarıda Adı Geçen Tez Jürimizce Değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi Olarak Kabul Edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR**
İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. Kâzım TÜRK
İnönü Üniversitesi
Doç. Dr. Hasan POLAT
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kaynak Dengeleme Probleminin Optimum veya Yakın Optimum Çözülmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Tuğba ERZURUM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAYNAK Dengeleme Probleminin Optimum veya Yakın Optimum Çözülmesi

Tuğba ERZURUM

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

172 + xvi sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR

İnşaat sektörünün doğası gereği her proje koşul ve kısıtlarıyla kendine özgüdür. Bu durum her projeye özgü çözümler ve planlamalar uygulamayı zorunlu kılmaktadır. Sektörün kompleks etkileşimleri bu zorunluluklar ile birleşince her projeye özgü yapım yönetim ve planlama uygulamaları ortaya çıkmaktadır. Planlama, ulaşılacak hedefleri belirleyen, bu hedeflerin kısıtlarını ve belirsizliklerini tanımlayan yönlendirme sürecidir. Projeleri doğru bir şekilde yönetmek için planlama gereklidir. Proje yönetim araçlarından biri kaynak dengelemedir.

Kaynak çizelgelerinde gözlemlenen dalgalanmaların işin tamamlanmasında gecikme olmadan asgari düzeye indirilmesi kaynak dengeleme problemi (KDP) olarak adlandırılmaktadır. Kaynak dengeleme işleminin amacı, kaynak kullanım düzeyinin proje takvimi boyunca en az dalgalanmasını sağlamak, proje süresinin belirlenen ilk süreyi aşmayacak şekilde aktiviteleri programlayıp boşta kalan kaynak miktarını asgari düzeyde tutmaktır. Etkin bir kaynak kullanımı ile dalgalanmalar indirgenebilecek ve bu dalgalanmaların oluşturabileceği sorunlar önlenebilecektir.

İnşaat işlerinde müteahhidin amacı mümkün olan en etkin programı hazırlamak ve mevcut kaynakların kullanım verimini maksimize etmektir. Projede kaynakların etkin kullanımını sağlamak, bir bilgisayar programı kullanmadıkça zaman alıcıdır. Hatta bazı durumlarda en uygun iş programını elde etmek müteahhitler için mümkün olamayabilir. Bu çalışmada küçük ve orta ölçekli projelerde en uygun iş programını tüm arama uzayını tarayarak elde eden bir Hesap Cetveli Uygulaması (HCU) geliştirilmiştir. Bu uygulama Ofis yazılımında, VBA (Visual Basic for Applications) programlama dili ile oluşturulmuştur. Literatürden derlenen 28 farklı hipotetik projenin ve 1 tane iki katlı gerçek projenin her birine özgü, optimum çözüme ulaşmak için VB modülü içerisine makro komut ve fonksiyon dizinleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu makro sayesinde önceden el ile arama uzayı hesabı yapılan projelerin arama uzayı hesabının sağlanması yapılmıştır. Ayrıca tüm erteleme seçeneklerini Minimum Moment ölçeği ile analiz ederek KDP'nin optimum sonucuna ulaştıracağı erteleme değerlerini ve bu projeleri çözmek için harcanan hesaplama sürelerini belirlemektedir.

Bu çalışma sonucunda geliştirilen uygulama sayesinde küçük ve orta ölçekli projelerde kaynak dengeleme probleminin tam sonucunu makul hesaplama süresinde elde eden bir Hesap Cetveli uygulaması geliştirilmiştir. Küçük ve orta ölçekli müteahhitlerin uygulaması çok güç olan optimizasyon algoritmaları yerine tüm seçenekleri deneyerek çözüm yapan uygulamanın tüm müteahhitler tarafından uygulanabilmesi mümkündür. Bu sayede bütün yükleniciler için inşaatın tüm aşamalarında kaynakların mümkün olan en üst verimde kullanılması mümkün olacak ve inşaat maliyetlerinde kayda değer düşüşler sağlanabilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Kaynak dengeleme problemi, kapsamlı sayım, optimizasyon, paralel programlama, yüksek başarımlı hesaplama



ABSTRACT

Msc Thesis

OPTIMUM OR NEAR-OPTIMUM SOLUTION OF RESOURCE LEVELING PROBLEMS WITH SPREADSHEET APPLICATION

Tuğba ERZURUM

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

172 + xvi sayfa

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Önder Halis BETTEMİR

Due to the nature of the construction sector, each project is unique because of its conditions and constraints. This situation necessitates the implementation of project-specific solutions and unique planning for each construction project. Construction management and planning practices specific to each project is performed when the complex interactions of the sector is interacted with the aforementioned requirements. Planning is the orientation process which defines the targets to be achieved and forms the constraints and uncertainties of these objectives. Planning is necessary to manage projects correctly. One of the tools of project management is resource leveling.

The reduction of the fluctuations in the resource distribution charts to minimum without delay in the completion of the construction project is called resource leveling problem (RLP). The purpose of the resource leveling process is to minimize the amount of fluctuations of daily resource distribution and idle resources without exceeding the initial project completion time. By using an effective resource allocation, fluctuations can be reduced and adverse consequences of uneven resource distribution can be prevented.

Throughout the construction the aim of the contractor is to prepare the most effective schedule as much as possible and maximize the efficiency of the use of existing resources. Assurance of the effective allocation of the resources is time-consuming unless computer software is used. In fact obtaining the optimum construction schedule may not be possible in some cases. In this study, a spreadsheet application (SA) has been developed which can provide optimum or near-optimum construction schedule by searching the whole problem domain for small and medium sized projects. This application was created with the VBA (Visual Basic for Applications) programming language on Office software. Macro command and function sequences have been created into VB module to reach the optimum solutions of the 28 different hypothetical projects and 1 two floor real construction project. The generated macro performed the search domain calculation of the projects which have previously been determined manually. Moreover, search domain computations are validated by the generated macro. Fluctuations of the resources are assessed by Minimum Moment (MM) metric and

determine the postponing values to be taken by the RLP to the optimum result and the calculation periods used to solve these projects.

In this study, an application which can solve small and medium scale RLP in reasonable time is developed. It is possible for all contractors to implement the proposed algorithm which searches the whole search domain instead of implementing optimization algorithms that are very difficult for small and medium-sized contractors utilize. In this way it will be possible for all contractors to utilize the resources at the highest efficiency at all stages of construction and to reduce construction costs significantly.

KEYWORDS: Resource leveling problem, exhaustive enumeration, optimization, parallel programming, high performance calculation, exhaustive enumeration



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri, bilgi ve tecrübeleri ile desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR'e;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans çalışmalarım süresince de benden desteklerini esirgemeyen kıymetli AİLEM'e ve özellikle bu süreçte beni sabırla destekleyen ebeveynlerime;

sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL-2018-1293 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. Çalışmada İzlenen Yol.....	1
1.3. Çalışmadan Beklenen Sonuçlar.....	2
2. YAPIM YÖNETİMİNDE PLANLAMA.....	3
2.1. Planlamanın Önemi ve Türleri.....	3
2.1.1. Kritik yol metodu.....	3
2.2. Planlamada Kaynak Yönetimi.....	4
2.3. Kaynak Dengeleme Problemi.....	5
2.3.1. Kaynak dengeleme probleminde minimum moment ölçeği.....	7
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	8
3.1. Sezgisel Yöntemler.....	8
3.2. Üst-Sezgisel Yöntemler.....	10
3.3. Kesin Yöntemler.....	14
3.3.1. Kesin yöntemler için paralel programlama.....	17
4. HESAP CETVELİ UYGULAMASI (HCU).....	18
5. VAKA ANALİZİ.....	20
5.1. Proje 1.....	21
5.2. Proje 2.....	30
5.3. Proje 3.....	34
5.4. Proje 4.....	38
5.5. Proje 5.....	41
5.6. Proje 6.....	46
5.7. Proje 7.....	51
5.8. Proje 8.....	56
5.9. Proje 9.....	58
5.10. Proje 10.....	60
5.11. Proje 11.....	64
5.12. Proje 12.....	68

5.13.	Proje 13.....	73
5.14.	Proje 14.....	76
5.15.	Proje 15.....	80
5.16.	Proje 16.....	85
5.17.	Proje 17.....	89
5.18.	Proje 18.....	94
5.19.	Proje 19.....	99
5.20.	Proje 20.....	105
5.21.	Proje 21.....	113
5.22.	Proje 22	121
5.23.	Proje 23	124
5.24.	Proje 24	131
5.25.	Proje 25	136
5.26.	Proje 26	142
5.27.	Proje 27.....	148
5.28.	Proje 28.....	153
5.29.	Proje 29.....	155
6.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	161
7.	KAYNAKLAR.....	165

SİMGELER ve KISALTMALAR

KDP	Kaynak Dengeleme Problemi
HCU	Hesap Cetveli Uygulaması
RLP	Resource Leveling Problem
VBA	Visual Basic for Applications
CPM	Critical Path Method
KYM	Kritik Yol Metodu
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PACK	Paketleme Metodunu
LSM	Linear Scheduling Method
LOB	Line of Balance
VPM	Vertical Production Method
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
EOZ	Erken Olay Zamanı
GOZ	Geç Olay Zamanı
SA	Spreadsheet Application
MM	Minimum Moment
T	Proje süresi
r_i	i. günde ihtiyaç duyulan toplam kaynak miktarı
$r_{i,j}$	i. günde j. Kaynağın ihtiyaç duyulan miktarı
r_k	Farklı kaynak sayısı
PSO	Parçacık sürüsü optimizasyonu
PN	Petri Ağları
GA	Genetik Algoritma
PSO	Parçacık sürüsü optimizasyonu
GE	Evrimsel gelişim
AC	Karınca kolonisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 5.1.	Şebeke ok diyagramı.....	21
Şekil 5.2.	Proje 1- Adım 1 hesap cetveli uygulama ekranı.....	24
Şekil 5.3.	Proje 1- Adım 2 hesap cetveli uygulama ekranı.....	25
Şekil 5.4.	Proje 1- Adım 3 hesap cetveli uygulama ekranı.....	26
Şekil 5.5.	Proje 1- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı.....	28
Şekil 5.6.	Proje 1 kaynak histogramı.....	29
Şekil 5.7.	Şebeke ok diyagramı.....	30
Şekil 5.8.	Proje 2- Adım 1-2-3 hesap cetveli uygulama ekranı.....	32
Şekil 5.9.	Proje 2- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı.....	33
Şekil 5.10.	Proje 2 kaynak histogramı.....	34
Şekil 5.11.	Şebeke ok diyagramı.....	34
Şekil 5.12.	Proje 3- Adım 1-2-3 hesap cetveli uygulama ekranı.....	36
Şekil 5.13.	Proje 3- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı.....	37
Şekil 5.14.	Proje 3 kaynak histogramı.....	37
Şekil 5.15.	Şebeke ok diyagramı.....	38
Şekil 5.16.	Proje 4- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı.....	39
Şekil 5.17.	Proje 4 kaynak histogramı.....	40
Şekil 5.18.	Şebeke ok diyagramı.....	41
Şekil 5.19.	Proje 5- Adım 1-2-3 hesap cetveli uygulama ekranı.....	43
Şekil 5.20.	Proje 5- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı.....	44
Şekil 5.21.	Proje 5 kaynak-1 histogramı.....	45
Şekil 5.22.	Proje 5 kaynak-2 histogramı.....	45
Şekil 5.23.	Proje 5 kaynak-3 histogramı.....	45
Şekil 5.24.	Şebeke ok diyagramı.....	46
Şekil 5.25.	Proje 6 makro.....	49
Şekil 5.26.	Proje 6 kaynak-1 histogramı.....	49
Şekil 5.27.	Proje 6 kaynak-2 histogramı.....	50
Şekil 5.28.	Proje 6 kaynak-3 histogramı.....	50
Şekil 5.29.	Proje 6 kaynak-4 histogramı.....	50
Şekil 5.30.	Şebeke ok diyagramı.....	51
Şekil 5.31.	Proje 7 makro.....	53
Şekil 5.32.	Proje 7 kaynak-1 histogramı.....	54
Şekil 5.33.	Proje 7 kaynak-2 histogramı.....	54
Şekil 5.34.	Proje 7 kaynak-3 histogramı.....	55
Şekil 5.35.	Proje 7 kaynak-4 histogramı.....	55
Şekil 5.36.	Şebeke ok diyagramı.....	56
Şekil 5.37.	Proje 8 makro.....	57
Şekil 5.38.	Proje 8 kaynak histogramı.....	57
Şekil 5.39.	Şebeke ok diyagramı.....	58
Şekil 5.40.	Proje 9 makro.....	59
Şekil 5.41.	Proje 9 kaynak histogramı.....	59
Şekil 5.42.	Şebeke ok diyagramı.....	60
Şekil 5.43.	Proje 10 makro.....	61
Şekil 5.44.	Proje 10 kaynak-1 histogramı.....	62

Şekil 5.45.	Proje 10 kaynak-2 histogramı.....	62
Şekil 5.46.	Proje 10 kaynak-3 histogramı.....	63
Şekil 5.47.	Şebeke ok diyagramı.....	64
Şekil 5.48.	Proje 11 makro.....	66
Şekil 5.49.	Proje 11 kaynak histogramı.....	67
Şekil 5.50.	Şebeke ok diyagramı.....	68
Şekil 5.51.	Proje 12 makro.....	70
Şekil 5.52.	Proje 12 kaynak-1 histogramı.....	71
Şekil 5.53.	Proje 12 kaynak-2 histogramı.....	71
Şekil 5.54.	Proje 12 kaynak-3 histogramı.....	72
Şekil 5.55.	Proje 12 kaynak-4 histogramı.....	72
Şekil 5.56.	Şebeke ok diyagramı.....	73
Şekil 5.57.	Proje 13 makro.....	74
Şekil 5.58.	Proje 13 kaynak-1 histogramı.....	75
Şekil 5.59.	Proje 13 kaynak-2 histogramı.....	75
Şekil 5.60.	Proje 13 kaynak-3 histogramı.....	75
Şekil 5.61.	Proje 13 kaynak-4 histogramı.....	75
Şekil 5.62.	Şebeke ok diyagramı.....	76
Şekil 5.63.	Proje 14 makro.....	78
Şekil 5.64.	Proje 14 kaynak-1 histogramı.....	79
Şekil 5.65.	Proje 14 kaynak-2 histogramı.....	79
Şekil 5.66.	Şebeke ok diyagramı.....	80
Şekil 5.67.	Proje 15 makro.....	82
Şekil 5.68.	Proje 15 kaynak-1 histogramı.....	83
Şekil 5.69.	Proje 15 kaynak-2 histogramı.....	83
Şekil 5.70.	Proje 15 kaynak-3 histogramı.....	84
Şekil 5.71.	Proje 15 kaynak-4 histogramı.....	84
Şekil 5.72.	Şebeke ok diyagramı.....	85
Şekil 5.73.	Proje 16 makro.....	87
Şekil 5.74.	Proje 16 kaynak-1 histogramı.....	88
Şekil 5.75.	Proje 16 kaynak-2 histogramı.....	88
Şekil 5.76.	Proje 16 kaynak-3 histogramı.....	88
Şekil 5.77.	Proje 16 kaynak-4 histogramı.....	88
Şekil 5.78.	Şebeke ok diyagramı.....	89
Şekil 5.79.	Proje 17 makro.....	92
Şekil 5.80.	Proje 17 kaynak histogramı.....	93
Şekil 5.81.	Şebeke ok diyagramı.....	94
Şekil 5.82.	Proje 18 makro.....	97
Şekil 5.83.	Proje 18 kaynak histogramı.....	98
Şekil 5.84.	Şebeke ok diyagramı.....	99
Şekil 5.85.	Proje 19 makro.....	103
Şekil 5.86.	Proje 19 kaynak histogramı.....	104
Şekil 5.87.	Şebeke ok diyagramı.....	105
Şekil 5.88.	Proje 20 makro.....	108
Şekil 5.89.	Proje 20 paralel hat parça sonuçları.....	109
Şekil 5.90.	Proje 20 kaynak-1 histogramı.....	111

Şekil 5.91.	Proje 20 kaynak-2 histogramı.....	111
Şekil 5.92.	Proje 20 kaynak-3 histogramı.....	112
Şekil 5.93.	Proje 20 kaynak-4 histogramı.....	112
Şekil 5.94.	Şebeke ok diyagramı.....	113
Şekil 5.95.	Proje 21 makro.....	116
Şekil 5.96.	Proje 21 paralel hat parça sonuçları.....	117
Şekil 5.97.	Proje 21 kaynak-1 histogramı.....	119
Şekil 5.98.	Proje 21 kaynak-2 histogramı.....	119
Şekil 5.99.	Proje 21 kaynak-3 histogramı.....	120
Şekil 5.100.	Proje 21 kaynak-4 histogramı.....	120
Şekil 5.101.	Şebeke ok diyagramı.....	121
Şekil 5.102.	Proje 22 makro.....	122
Şekil 5.103.	Proje 22 kaynak histogramı.....	123
Şekil 5.104.	Şebeke ok diyagramı.....	124
Şekil 5.105.	Proje 23 makro.....	126
Şekil 5.106.	Proje 23 paralel hat parça sonuçları.....	127
Şekil 5.106.	Proje 23 paralel hat parça sonuçları (devam)	128
Şekil 5.107.	Proje 23 kaynak histogramı.....	130
Şekil 5.108.	Şebeke ok diyagramı.....	131
Şekil 5.109.	Proje 24 kaynak-1 histogramı.....	134
Şekil 5.110.	Proje 24 kaynak-2 histogramı.....	134
Şekil 5.111.	Proje 24 kaynak-3 histogramı.....	135
Şekil 5.112.	Proje 24 kaynak-4 histogramı.....	135
Şekil 5.113.	Şebeke ok diyagramı.....	136
Şekil 5.114.	Proje 25 makro.....	139
Şekil 5.115.	Proje 25 kaynak-1 histogramı.....	140
Şekil 5.116.	Proje 25 kaynak-2 histogramı.....	140
Şekil 5.117.	Proje 25 kaynak-3 histogramı.....	141
Şekil 5.118.	Proje 25 kaynak-4 histogramı.....	141
Şekil 5.119.	Şebeke ok diyagramı.....	142
Şekil 5.120.	Proje 26 makro.....	145
Şekil 5.121.	Proje 26 kaynak-1 histogramı.....	146
Şekil 5.122.	Proje 26 kaynak-2 histogramı.....	146
Şekil 5.123.	Proje 26 kaynak-3 histogramı.....	147
Şekil 5.124.	Proje 26 kaynak-4 histogramı.....	147
Şekil 5.125.	Şebeke ok diyagramı.....	148
Şekil 5.126.	Proje 27 makro.....	150
Şekil 5.127.	Proje 27 kaynak-1 histogramı.....	151
Şekil 5.128.	Proje 27 kaynak-2 histogramı.....	151
Şekil 5.129.	Proje 27 kaynak-3 histogramı.....	152
Şekil 5.130.	Proje 27 kaynak-4 histogramı.....	152
Şekil 5.131.	Şebeke ok diyagramı.....	153
Şekil 5.132.	Proje 28 makro.....	154
Şekil 5.133.	Proje 28 kaynak histogramı.....	154
Şekil 5.134.	Şebeke ok diyagramı.....	155
Şekil 5.135.	Proje 29 seri-1 makro.....	159

Şekil 5.136.	Proje 29 seri-2 makro.....	159
Şekil 5.137.	Proje 29 kaynak histogramı.....	160
Şekil 6.1.	Projelerin kaynak değişimi.....	162
Şekil 6.2.	Projelerin iyileşme yüzdeleri.....	163



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	22
Çizelge 5.2.	B-C-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	22
Çizelge 5.3.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	22
Çizelge 5.4.	Proje 1- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	29
Çizelge 5.5.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	30
Çizelge 5.6.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	31
Çizelge 5.7.	Proje 2- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	33
Çizelge 5.8.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	35
Çizelge 5.9.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	35
Çizelge 5.10.	Proje 3- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	37
Çizelge 5.11.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	38
Çizelge 5.12.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	39
Çizelge 5.13.	Proje 4- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	39
Çizelge 5.14.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	41
Çizelge 5.15.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	42
Çizelge 5.16.	Proje 5- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	44
Çizelge 5.17.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	47
Çizelge 5.18.	G-I Hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	48
Çizelge 5.19.	C-E Hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	48
Çizelge 5.20.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	48
Çizelge 5.21.	Proje 6 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	49
Çizelge 5.22.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	52
Çizelge 5.23.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	53
Çizelge 5.24.	Proje 7 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	53
Çizelge 5.25.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	56
Çizelge 5.26.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	56
Çizelge 5.27.	Proje 8 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	57
Çizelge 5.28.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	58
Çizelge 5.29.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	58
Çizelge 5.30.	Proje 9 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	59
Çizelge 5.31.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	60
Çizelge 5.32.	C-B-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	61
Çizelge 5.33.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	61
Çizelge 5.34.	Proje 10 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	61
Çizelge 5.35.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	64
Çizelge 5.36.	C-F-K-G-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	65
Çizelge 5.37.	E-I-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	65
Çizelge 5.38.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	65
Çizelge 5.39.	Proje 11 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	66
Çizelge 5.40.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	69
Çizelge 5.41.	Proje 12 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	70
Çizelge 5.42.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	73
Çizelge 5.43.	G-F-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	74
Çizelge 5.44.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	74

Çizelge 5.45.	Proje 13 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	74
Çizelge 5.46.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	76
Çizelge 5.47.	J-F-G-E-D-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	77
Çizelge 5.48.	C-I hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	77
Çizelge 5.49.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	78
Çizelge 5.50.	Proje 14 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	78
Çizelge 5.51.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	80
Çizelge 5.52.	F-I-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	81
Çizelge 5.53.	H-C-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	81
Çizelge 5.54.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	81
Çizelge 5.55.	Proje 15 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	82
Çizelge 5.56.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	86
Çizelge 5.57.	I-F-G-C hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	86
Çizelge 5.58.	D-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	86
Çizelge 5.59.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	87
Çizelge 5.60.	Proje 16 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	87
Çizelge 5.61.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	90
Çizelge 5.62.	B-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	90
Çizelge 5.63.	J-D-E-G hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	91
Çizelge 5.64.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	92
Çizelge 5.65.	Proje 17 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	93
Çizelge 5.66.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	95
Çizelge 5.67.	E-S hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	95
Çizelge 5.68.	N-O-P-R hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	96
Çizelge 5.69.	J-G-H-B hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	96
Çizelge 5.70.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	96
Çizelge 5.71.	Proje 18 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	97
Çizelge 5.72.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	100
Çizelge 5.73.	C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	100
Çizelge 5.73.	C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam).....	101
Çizelge 5.73.	C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam).....	102
Çizelge 5.73.	C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam).....	103
Çizelge 5.74.	Proje 19 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	104
Çizelge 5.75.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	106
Çizelge 5.76.	J-M-D-K hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	106
Çizelge 5.77.	O-G-C-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	107
Çizelge 5.78.	N-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	107
Çizelge 5.79.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	107
Çizelge 5.80.	Paralel parça moment değerleri.....	110
Çizelge 5.81.	Proje 20 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	110
Çizelge 5.82.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	114
Çizelge 5.83.	E-S hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	115
Çizelge 5.84.	A-K hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	115
Çizelge 5.85.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	115
Çizelge 5.86.	Paralel parça moment değerleri.....	118
Çizelge 5.87.	Proje 21 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	118

Çizelge 5.88.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	122
Çizelge 5.89.	Proje 22 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	123
Çizelge 5.90.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	125
Çizelge 5.91.	Paralel parça moment değerleri.....	129
Çizelge 5.92.	Proje 23 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	129
Çizelge 5.93.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	132
Çizelge 5.94.	Paralel parça moment değerleri.....	133
Çizelge 5.95.	Proje 24 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	133
Çizelge 5.96.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	137
Çizelge 5.97.	D-B-E-K-C-F-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	138
Çizelge 5.98.	P-M hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	138
Çizelge 5.99.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	138
Çizelge 5.100.	Proje 25 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	139
Çizelge 5.101.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	143
Çizelge 5.102.	F-I-J-M hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	144
Çizelge 5.103.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	144
Çizelge 5.104.	Proje 26 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	145
Çizelge 5.105.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	149
Çizelge 5.106.	Proje 27 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	150
Çizelge 5.107.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	153
Çizelge 5.108.	B-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	153
Çizelge 5.109.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	153
Çizelge 5.110.	Proje 28 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	154
Çizelge 5.111.	Aktivitelere göre bolluk hesabı.....	156
Çizelge 5.112.	W-AB-AD-T-V-Z hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	157
Çizelge 5.113.	K-L-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	158
Çizelge 5.114.	AG-AF-AH hattı kaynak dengeleme kombinasyonu.....	158
Çizelge 5.115.	Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu.....	158
Çizelge 5.116.	Proje 29 optimum sonucu veren hesaplama değerleri.....	159

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Belirlenen bütçe ve zamanda proje hedeflerine ulaşmak için sadece aktivite planlaması değil aynı zamanda verimli kaynak (malzeme, para, ekipler, teçhizatlar vb.) planlaması da gereklidir. İnşaatların yürütülmesi için tayin edilen kaynaklar inşaat süresi boyunca düzgün dağılım gösteremeyebilir. Bu durumda ya sık aralıktaki işçi çıkarma ve işçi alımı yapma ya da boşta duran işçileri istihdam etme yoluna gidilmektedir. İki durumda müteahhitler için önemli miktarda maddi yük getirmektedir. Kaynak dengelemesi yapılarak inşaat süresi boyunca oluşan kaynak kullanımındaki dalgalanmalar en az seviyeye indirilir. Bu sayede inşaatın yürütülmesi sırasında oluşan dolaylı maliyetler mümkün olan en düşük seviyede tutulur.

İnşaat projelerinin planlanmasında yaygın olarak kullanılan paket programlarda yer alan yöntemler kaynak dengeleme probleminin (KDP) etkin bir şekilde çözülmesinde yeterli katkıyı verememektedir (Iranagh ve Sönmez, 2012). Bunun nedeni bu programların inşaat sektörüne özgü olmaması ya da kaynak dengeleme problemini çözebilecek araçlara sahip olmamasıdır. Bu da sektörde projelerden daha iyi sonuçlar üretebilecek optimizasyon yöntemlerinin denenmesine yol açmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen Hesap Cetveli Uygulaması (HCU) da bu yöntemlerden biridir. Yöntemin amacı; KDP'nin arama uzayını sistematik bir şekilde belirlemek ve her projeye özgü hesaplanan arama uzayının tamamını tarayabilen makro oluşturarak projelerin en uygun çözümünü bulmaktır. Bu sayede kaynak yönetimini de kapsayan etkin bir planlamayı küçük ve orta ölçekli müteahhitler de uygulayabilecektir.

1.2. Çalışmada İzlenen Yol

Bu çalışmada aşağıdaki adımlar yerine getirildi:

- Literatürden elde edilen 28 hipotetik proje ile 1 tane temel, zemin ve bir kattan oluşturduğumuz gerçek bir proje üzerinde çalışma yapıldı.
- Projelerin ok diyagramı oluşturularak, kritik hat ve bolluğa sahip aktivitelerin bolluk miktarları hesaplandı.
- Projelerin aktivite sayısına ve kritik olmayan aktivitelerin bolluk miktarlarına bağlı olarak çözüm uzayının ne ölçüde değiştiği hesaplanmış ve problemlerin zorluğunun sistematik biçimde belirlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede kaynak dengeleme problemlerinin çözümü için daha uygun çözüm algoritmaları seçilebilecektir.

Böylece zorluk derecesi değişen problemlerin karmaşıklığı daha yüksek doğrulukta tespit edilebilecek ve uygulanacak yöntemin işlemci gücü ve bellek ihtiyacı öngörülebilecektir.

- Aktivite bağımlılık ilişkisi dikkate alınarak ofis yazılımı hesap cetvelinde, günlük kaynak kullanımını gösteren iş programı oluşturuldu.
- Kritik olmayan aktivitelerin bağımlılık ilişkisi dikkate alınarak VBA'da yazılan makro kodu ile tüm arama uzayını tarayarak optimum sonucu elde eden HCU geliştirildi. Bu uygulama tüm arama uzayını taradığı için elde edilen sonuçlar kesin çözümlerdir.
- Elde edilen sonuçlar ile günlük kaynak histogramları oluşturuldu. Bu sayede maksimum kaynak değişimi ve inşaat projelerinde istenilen çan şekline yakın histogram oluşumu gözlemlendi.

1.3. Çalışmadan Beklenen Sonuçlar

İnşaat projelerinin planlanmasında yaygın olarak kullanılan paket programlarda yer alan yöntemler KDP'yi etkin bir şekilde çözmediği gibi çoğu program ücretlidir. Küçük ve orta ölçekli müteahhitler projelerde kaynak kullanımı için çoğu zaman bu programların ücretinden dolayı ek bir bütçe ayırmamaktadır. Kaynak kullanımı planlanmayan projelerde olası maliyet artışının yanı sıra proje süreside uzayabilir. Bu çalışmada geliştirilen uygulama sayesinde KDP'nin hem optimum çözümü elde edilecek hem de küçük ve orta ölçekli müteahhitlerde herhangi bir ücret ödmeden kaynak planlaması yapabileceklerdir.

2. YAPIM YÖNETİMİNDE PLANLAMA

2.1. Planlamanın Önemi ve Türleri

İnşaat sektörünü doğası gereği her proje koşul ve kısıtlarıyla kendine özgüdür. Sektörün karmaşıklığı her projeye özgü yönetim ve planlama uygulamalarını ortaya çıkarmaktadır. Planlama, ulaşılabilecek hedefleri belirleyen, bu hedeflerin kısıtlarını ve belirsizliklerini tanımlayan yönlendirme sürecidir. Projeleri doğru bir şekilde yönetmek için planlama gereklidir. İnşaat işlerinde bu planlama genellikle zaman temelli oluşturulmaktadır. Hâlbuki sadece zamana odaklanarak planlama yapmak, ulaşılabilmek istenilen diğer proje hedeflerinin göz ardı edilmesine yol açtığı gibi maliyetin artışına da neden olmaktadır. Planlamada hedef proje unsurlarını bir arada değerlendirmek ve bu projeden maksimum faydayı sağlamak için tüm unsurları etkili bir şekilde dengelemektir.

Projelerde optimum faydayı elde etmek amacıyla kullanılan planlama teknikleri vardır. Hangi planlama tekniğinin seçileceğine karar vermek, proje koşullarını değerlendirmekten geçmektedir. Tüm işlemlerin belirlenen zamanda mutlaka gerçekleştiği deterministik proje planlamalarında; benzer işlemi olmayan projelerde, işlem süreleri belirgin ise Kritik Yol Yöntemi veya Kutu Diyagramı tekniği, süreler belirgin değilse PERT (Program Evaluation and Review Technique) tekniği kullanılır. Benzer işlemli; doğrusal-doğrusal olmayan biçimli projelerde LSM (Linear Scheduling Method), yatay-düşey biçimli projelerde LOB (Line of Balance) veya VPM (Vertical Production Method) tekniği kullanılır. Belirli bir olaydan sonra başlayacak olan bazı işlemlerin gerçekleşmeyebileceği, her işlemin süresinin değişik bir kurala bağlı olarak gelişebileceği, rastlantısal stokastik proje planlamalarında, GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) tekniği kullanılır. Kaynak dengeleme ile ilgili çalışmalarda çoğunlukla kritik yol metodu kullanımı tercih edilmektedir (Karakaya, 2007).

2.1.1. Kritik yol metodu

İnşaat projeleri genellikle aktivite sayısı, kaynak kullanım hacmi ve finansal cirosu büyük çaplı işlerdir. Bir projenin tamamında kullanılan kaynaklar gerekli miktarda veya belirli bir zamanda mevcut olmayabilir. Bu nedenle, daha yüksek ücret tutarıyla kısa dönemler için kaynak kullanmak yerine, onları daha düşük miktarlarda ancak daha istikrarlı ve uzun bir süre boyunca kullanmak daha verimlidir. Bu, proje planlaması ile sağlanabilir. Kritik yol metodu, proje planlaması için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. KYM ile projeler küçük iş paketlerine ayrılarak daha kolay yönetilebilmektedir.

Kritik yol metodu (KYM), tüm projeyi oklar ve düğümler olarak gösteren ağ şemalarına dayanır. Bu şemalar aktiviteler arasındaki bağımlılık durumu ve aktivite süre ilişkilerini

temel olarak oluşturulmaktadır. Ağ oluşturulduktan sonra, en erken ve en geç aktivite başlangıç tarihlerini elde ederek ileri ve geri geçiş hesaplamaları yapılır. Erken ve geç başlangıç zamanı arasındaki fark, aktivite bolluk sayısını göstermektedir. Sıfır bolluğa sahip olan aktiviteler, toplam proje süresini tanımlayan kritik aktivitelerdir. KYM, faaliyetler arasında öncelik ilişkilerini karşılamak için mümkün olan en erken zamanda aktiviteleri planlamaya çalışır ancak kaynakları optimize etmez. Bu nedenle, daha sorunsuz bir kaynak profiline sahip olmak için kaynak kullanımı planlanmalıdır. KYM planlamasında kullanılan terminoloji aşağıda verilmiştir:

Aktivite (Faaliyet): Tanımlanmış görev.

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

Kritik Yol: Bir projenin izleyebileceği en uzun yol ve süreyi kapsayan olay dizisidir.

Süre: Bir faaliyetin başlangıcı ve bitiş arasında iş günleri.

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.

$$SB = EOZ_j - EOZ_i - \text{Süre}$$

2.2. Planlamada Kaynak Yönetimi

Günümüzün rekabet gücü yüksek iş ortamında, kaynak maliyetini etkili bir şekilde yönetmeden rekabet edebilmek neredeyse imkânsızdır. Projeleri rekabet koşullarına göre doğru bir şekilde yönetmek için; proje yöneticilerinin malzeme, makine, ekip, para vb. kaynakların nasıl kullanılacağını öngören bir planlama hazırlamaları gereklidir. Planlama yapılırken

aktiviteleri en erken başlangıç zamanlarında başlatmak kaynak histogramında istenmeyen dalgalanmalara neden olabilir. Bu dalgalanmalar projenin toplam bütçesini etkileyebilir. Bu nedenle, daha sorunsuz bir kaynak profiline sahip olmak için kaynak kullanımı planlanmalıdır. Planlamada hedef, proje unsurlarını bir arada değerlendirmek ve bu projeden maksimum faydayı sağlamak için tüm unsurları etkili bir şekilde dengelemektir. Proje maliyetlerini en aza indirmek için inşaat kaynaklarının etkin kullanımı çok önemlidir. Projede kaynakların etkin kullanımı sadece maliyetleri azaltmada etkili değildir. Mevcut kaynaklara olan talebin artması ve kaynakların kısıtlı olması projelerdeki kaynak ihtiyacının önemini arttırmıştır. Planlanmış bir kaynak kullanımı ile iş programında, faaliyetler için gerekli olan kaynaklar önceden temin edilebilecek ve oluşabilecek gecikmeler minimize edilecektir. Ayrıca kaynak ihtiyacı sebebiyle iş programında oluşan gecikmeler sadece proje süresinin uzamasına yol açmakla kalmaz, aynı zamanda bazı durumlarda iş kalemlerinin yeniden yapılması veya yapılan iş kalemlerine koruma-bakım işlemlerinin uzun süre uygulanması gibi kaynak kullanımında artışa yol açabilecek uygulamaları beraberinde getirir. Bu başta çevre kirliliği ve kaynakların verimsiz kullanımı olmak üzere birçok olumsuz etkiye yol açacağı için göz ardı edilemeyecek bir durumdur ve sadece mühendislik uygulamalarında değil kaynak kullanımı olan her amaçta minimum kaynak kullanımını hedef alınmalıdır. Bundan dolayı kaynakları planlama ile yönetmek gerekir. Bu yönetim işlevinin yöntemlerinde biri de kaynak dengelemedir. Kaynak dengeleme, KYM tarafından elde edilen kaynak kullanım histogramlarının proje süresini değiştirmeden optimize edilmesine dayanmaktadır.

2.3. Kaynak Dengeleme Problemi

Projenin bitiş tarihini karşılamak inşaat sektöründe olduğu gibi birçok endüstride son derece önemlidir ve proje vadesinin aşılması durumunda ceza yaptırımını uygulanabilir. Proje bitiş tarihinin korunması kaynak kullanımında dalgalanmalara sebep olabilmektedir. Bu dalgalanmalar olumsuz sonuçlar açığa çıkartır. Bunlardan bazıları; verimsiz işgücü ve donanım kullanımı, geçici tesislerin artan maliyeti, işgücünün kısa süreli istihdamı ve uzun vadeli iş imkânları sağlama konusunda garantisizlik nedeniyle vasıflı işgücünün bulunmasında zorluklardır. Çalışanların yeniden eğitilmesi ve serbest bırakılması da bireylerin motivasyonunu azaltır ve şirket kültürünün kurulmasını zorlaştırır. Ayrıca şirketler, işgücü istikrarlı olmadığından çalışanlarının eğitime sürekli olarak önemli yatırımlar yapmak zorunda kalırlar. Özellikle inşaat sektöründe, bireysel ve şirket düzeyinde bilgi birikimine bağlı olarak bu dalgalanmaların şirketlere maliyeti büyüktür. Bu olumsuz etkilere sahip olabilecek kaynak talebi eğrilerindeki varyasyonlar KDP tarafından ele

alınmaktadır. Bu problemin amacı, projenin yapım aşaması boyunca zamana bağlı olarak kaynak talebindeki dalgalanmaları ortadan kaldırmaktır (Mutlu, 2010). Bu bağlamda kaynak dengeleme işlemleri çok faydalıdır. Bu işlemler yalnızca kullanımdaki dalgalanmaları azaltmakla kalmayıp, proje bitiş tarihini de korumaktadır.

Projede sürenin önemli olduğu (değişmediği) durumlarda, aktiviteler arasındaki mantıksal kısıtlar çerçevesinde, gözlemlenen dalgalanmaların asgari düzeye indirilmesi kaynak dengeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Kaynak dengeleme işleminin amacı, kaynak kullanım oranlarını proje takvimi boyunca yayarak, kaynak talebindeki değişimin asgari düzeyde tutulmasını sağlamak ve proje süresinin belirlenen ilk süreyi aşmaması için proje aktivitelerini programlamaktır. Bu çalışma için de geçerli olan KDP için Harris (1990) tarafından belirtilen varsayımlar aşağıda gösterilmektedir:

- Faaliyetler zamana bağlıdır ve bölünemez. Bir faaliyet başladığında, tamamlanana kadar durdurulamaz.
- Faaliyetler tarafından tüketilen kaynakların, başlangıçtan faaliyetlerin sonuna kadar sabit kaldığı varsayılmaktadır.
- Kaynak oranlarını değiştirerek etkinliklerin süresinde azaltma veya uzanmaya izin verilmez.
- Proje süresinin uzatılmasına veya kısaltılmasına izin verilmez.

KDP'de ulaşılması hedeflenen, kaynak eğrisini dikdörtgen şekle sığdırmaya çalışmak inşaat sektöründe pek anlamlı değildir. Bunun nedeni, inşaat projelerinin doğası gereği, projelerin başlama ve bitiş süreçlerinde daha yavaş ilerleme oranlarına sahip olmalarıdır. Bu nedenle inşaat projelerinde genellikle bir projenin kaynak eğrisinin çan şeklinde olması beklenir. Bu şekle projelerde, aktiviteleri ve bunların kaynak taleplerini programlayarak ulaşmak amaçlanmaktadır. Aynı ya da farklı zaman dilimlerinde yürütülen aktivitelerde, benzer kaynak gruplarına ihtiyaç duyulması projenin ilerlemesinde ciddi kaynak ihtiyacına sebep olmaktadır. Kaynak ihtiyacındaki bu değişim kaynak diyagramında dalgalanmalar meydana getirir ve bu da maliyet artışına yol açmaktadır. Etkin bir kaynak kullanımı ile:

- Çalışanların boşa kalma süreleri azaldığından, çalışan sayısında aşırı değişim, ödenen sigorta vb. tutarlar azalacaktır.
- İş sürekliliğinden dolayı çalışanlarda tecrübe, hız ve iş kalitesi artarken; proje süresi ve maliyet azalacaktır.
- Çalışma alanında bulunan malzeme, makine vb. gereçlerin boşa kalma süreleri indirgenecektir.

2.3.1. Kaynak dengeleme probleminde minimum moment ölçeği

Projelerde kaynak dengeleme işlemlerinde bir ölçüt olarak minimum moment kullanılabilir (Yıldırım ve Bettemir, 2017). Harris (1978) tarafından sunulan minimum moment teorisi, sınırlı proje süresini ve sınırsız kaynağı varsayan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu algoritmanın amacı, toplam proje süresini değiştirmeden günlük kullanımdaki kaynak dalgalanmalarını en aza indirmektir. Algoritma erken başlangıç zamanında başlar ve kritik olmayan faaliyetleri, bolluk sürelerinde kaydırarak proje süresinin gecikmesine neden olmadan minimum momente ulaşmayı hedeflemektedir. Her zaman adımında, histogram momentinde azami azalma sağlayan kaydırmalar seçilmektedir. Teorinin matematiksel ifadesi:

Tek kaynaklı projelerde MM ölçeği:

$$MM = \sum_{i=1}^T r_i^2 \quad (2.1)$$

Çok kaynaklı projelerde MM ölçeği:

$$MM = \sum_{j=1}^{r_k} \sum_{i=1}^T r_{i,j}^2 \quad (2.2)$$

Bu teori, her bir günlük kaynak histogramı için bir moment bulunabileceğini ve tek tek günlük momentlerin toplamını tüm kaynak histogramının momentini olduğunu varsayar. Teoride belirttiği gibi, kaynak histogramın şekli dikdörtgen ise yani zirveleri ve çukurlar yoksa bu süre zarfında kaynaklar asgari düzeyde olma eğilimindedir. Gerçekte bu duruma ulaşmak zordur fakat bu duruma yaklaşılmaya çalışılmaktadır. Teori, kritik olmayan faaliyetleri kritik yol metodu ile elde edilen erken başlangıç konumlarından başka bir konuma kaydırarak kaynak histogramında zirve ve çukurlar arasındaki farklılıkları olabildiğince azaltmayı amaçlamaktadır. Elde edilen kaynak histogramı momentinin başlangıç değerinden daha düşük bir değere sahip olması gerekmektedir. Elde edilebilecek yeni iş programı, aktivitelerin serbest bolluk değeri ile sınırlıdır. Her olası iş programı için moment değeri hesaplanarak optimum bulunmaktadır.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Proje yönetiminde bir projeyi planlamak için KYM uygulanmaya çalışıldığında günlük kaynak kullanım histogramlarında dalgalanmalar oluşmaktadır. Kaynaklarda oluşan dalgalanmalar, inşaatın ilerlemesi sırasında sorunlara yol açabilmektedir. Planlamada kaynak miktarını belirleme, proje bütçesini azaltmak için çok önemlidir. Bu nedenle KDP inşaat yönetiminde önemli bir sorundur. Kaynak dengeleme problemine odaklanan sınırlı çalışma vardır. Literatür taramasında KDP çalışmalar üç kategoride sınıflandırılabilir:

- Sezgisel yöntemler
- Üst-sezgisel yöntemler
- Kesin yöntemler

Birinci ve ikinci kategorideki yöntemler, sezgisel ve üst-sezgisel yöntemler optimal bir çözümü garanti etmez. Üçüncü kategori ise problemin optimal çözümünü garanti eden kesin yöntemlerdir. Kesin yöntemler önemli miktarda hesaplama süresi gerektiren KDP'nin karmaşıklığı nedeniyle, çoğunlukla çok küçük ağları çözmek üzerine yoğunlaşmıştır. Araştırmacılar genellikle kesin yöntemlerden daha basit oldukları için sezgisel ve üst-sezgisel yöntemlere yoğunlaşma eğilimindedirler ve bu eğilim çoğu zaman kabul edilmektedir. Çünkü bu yöntemler, büyük sorunlara en uygun sonuçları makul bir uğraş sonucu bulma yeteneğine sahiptirler. Ancak belirtmek gerekir ki sezgisel ve üst-sezgisel yöntemlerin performans analizi için kesin çözümlere ihtiyaç duyulması kaçınılmazdır. Bu bölümde öncelikle bu yöntemlerin tanımlarından ve literatür taramasından bahsedilmektedir.

3.1. Sezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntemler genellikle bir optimizasyon problemi için geliştirilmiş basit yöntemlerdir. Bu yöntemler hızlı ve kolay çözüm işlemleri önerir fakat en uygun çözümü bulma garantisi yoktur. Performans analizi için kesin sonuçları bilme ihtiyacı kaçınılmazdır. KDP'yi çözmek için ilk sezgisel yöntemlerden birini Burgess ve Killebrew (1962) önermiştir. Bu yöntem, kritik olmayan aktivitelerin başlangıç tarihlerini, en iyi sonucu bulana kadar faaliyetleri kaydırarak değiştirir. Burgess ve Killebrew'den (1962) sonra çalışmaların çoğu da önceliğe dayalı kaydırma tekniklerine odaklanmıştır. Galbreath (1965) ile Woodworth ve Willie (1975), sundukları algoritma ile aktivite başlangıç zamanlarının farklı kombinasyonlarını bir sıralama işlemi yaparak incelemişler. Harris (1978), kaynak kullanımındaki günlük dalgalanmaların en aza indiren bir moment algoritması önerdi. Daha sonra Harris (1990) bu Minimum Moment Algoritmasını, kritik yol yöntemine dayanan

kaynak dengeleme için 'paketleme metodunu (PACK)' adını verdiği sezgisel bir ağ etkileşim yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde kaynakların histogramının minimum momenti, kaynakların dalgalanma seviyesini ölçmek için kullanılmıştır. Belirli günlere atanan aktiviteler kaynak histogramını dikdörtgene ve momenti minimuma yaklaştırmıştır. Tüm aktiviteler CPM veya PERT ağının kısıtlamaları içinde konumlandırılana kadar histogram adım adım oluşturulmuştur. Ortaya çıkan dengelenmiş histogram, optimizasyon ve sezgisel yöntemlerle yapılan benzer çalışmalara yakın sonuçlardır. Martinez ve Ioannou (1993), kaynak profil momentini minimize etmek için Modifiye Minimum Moment Yöntemi ile paketleme metodunu geliştirmişler. Younis ve Saad (1996), düzgün bir histogram ile eşleşen kaynak kullanımını oluşturmak için kullanılabilecek bir kaynak dengeleme optimizasyon modelini matematiksel programlama ile çözmüşler. Neumann ve Zimmermann (1999), hem geleneksel KDP'yi (kaynak kısıtlamaları olmadan) hem de KDP'nin (kısıtlı kaynak) bir varyasyonunu çözmek için bir sezgisel algoritma geliştirmişler. KDP'yi çözmek için birkaç farklı amaç fonksiyonunu kullanan bu algoritma polinom önceliğine dayalıdır. Kullanılan amaç fonksiyonları; dönem başına maksimum kaynak maliyetinin en aza indirilmesi, tek tip bir kaynak seviyesinden sapmaların en aza indirilmesi ve kaynak kullanım eğrilerindeki değişimlerin en aza indirilmesidir. Geliştirilen yöntemin iyi çözümler sağladığı bir performans analizi ile kanıtlanmış fakat bazı problem kümeleri için optimum çözümlerin bilinmediği, daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu da belirtilmiştir. Hiyassat (2000), kaynak dengeleme için kullanılan minimum moment yaklaşımına hesaplamaları önemli ölçüde düşüren bir değişiklik önermiştir. Bu değişikliği değerlendirmek için geleneksel ve önerilen yöntemi kullanılarak bir örnek problem çözmüştür. Sonuçların önemsiz ölçüde birbirinden farklı ve çoğu durumda aynıdır. Önerilen yöntemin kullanıldığı hesaplama işleminin, özellikle geleneksel hesaplamadan daha kolay olduğu sonucuna varmasına rağmen, iki yöntemden hiçbirinin gerçek minimum momenti sağlamadığını belirtmiştir. Hiyassat (2001), değiştirilmiş minimum moment yaklaşımını kullanarak birden fazla kaynağı dengelemek için bir yöntem sunmuştur. Karşılaştırma amacıyla, örnek problemi değiştirilmiş minimum moment yaklaşımı ve geleneksel minimum moment yöntemiyle çözümlenmiştir ve önerdikleri yöntemin daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Christodoulou ve diğerleri (2009), MMY ve PACK yönteminin aktivitenin artmasına izin vermesi gerektiğini ve ayrıca günlük kaynak limitlerinin bu yöntemde dahil edilmesine değinmişler. Bunun için, sistemin düzenini simgeleyen ve istikrarı maksimize etmeye çalışan entropi maksimizasyon yöntemi kullanılmışlar. Cristodoulou ve arkadaşları (2010), faaliyetlerin uzamasına veya sıkıştırılmasına izin veren “entropi maksimizasyon metodu” adı verilen bir yöntem önermişler. Faaliyetlerin kaynak oranının daha iyi kaynak kullanım profilleri ve maksimum günlük kaynak elde etmek için ayarlanabileceğini belirtmişlerdir. Yıldırım ve diğerleri (2016), bina inşaatı için bina bilgi modeli destekli kaynak dengelemesi gerçekleştirebilen bir

uygulama geliştirmiştirler. Minimum moment yöntemi ile kaynak eğrisindeki dalgalanmalar sezgisel yöntemlerle düşürülerek, inşaat maliyetlerinde tasarruf elde etmeyi amaçlamışlar. Qiao ve Li (2018), proje süresini kısaltmak, daha etkili ve esnek işlevler için normalize entropi ve bağıl entropiyi önermişler. Önerilen yöntemin performansını ayrıık PSO kullanarak değerlendirilmiştir. Li ve Dong (2018), çok modlu proje kaynağı dengeleme problemini mod bağımlı genelleştirilmiş öncelik ilişkileri göz önünde bulundurarak incelemişlerdir. Ayrışma ve entegrasyon olarak iki çözüm yaklaşımı üzerine inşa edilen oklu Kaynak Dengeleme Problemi (MRLP)-Genelleştirilmiş ncelik ilişkileri (GPR) için üç sezgisel yöntem önermişler. Bunlar, en dik iniş algoritması ve ayrııştırma yaklaşımına dayanan, nispeten hızlı ve basit öncelik tabanlı bir sezgisel ile donatılmış iniş algoritması ve istatistiksel öğrenme teorisi üzerine inşa edilen dağıtım algoritmasının (EDA) entegrasyon yaklaşımına dayanır. Önerilen keşifleri değerlendirmek için kıyaslama yapılmıştır. Hesaplamalı sonuçlara göre algoritmanın başlangıçtaki algoritmalarından daha iyi performans göstermektedir.

3.2. Üst-Sezgisel Yöntemler

Proje planlamasında ve diğer birçok alanda üst-sezgisel yöntemler, zor problemleri çözmek için uyarlanmış yüksek seviyeli algoritmalarlardır. Bu algoritmalar sezgisel yöntemlerin yerel optimuma yakalanma olasılığını minimize etmeyi amaçlayan hesaplama yöntemlerine sahiptir. Ancak st-sezgisel yöntemler optimum sonucu garanti etmez. Bu yöntemler tercih edilme gücünü, çözümler için gereken düşük hesaplama süresi ve çabasından almaktadır. Kısa sürede optimum bir çözüme ulaşılmasının, daha uzun sürede optimum çözüme ulaşılmasına tercih edildiği durumlarda üst-sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulur. En popüler üst-sezgisel yöntemlerden bazıları; genetik algoritmalar (GA), benzetim tavlama (SA), tabu arama, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi (AC), petri ağları (PN), evrimsel gelişim (GE)'dir.

İlhamını doğal evrim mekanizmasından alan GA, problemlerde ilk çözümlerin bir popülasyonunu üretir. Bunlar kromozomlara kodlanır ve kromozomlar çaprazlanması veya mutasyonu operatörleri ile yeni nesil üretilir. Algoritma, iyi çözümlere hayatta kalma şansı verir ve sonucu her defasında geliştirmek için kromozomlarını gelecek nesillere aktarır. Bu şekilde, en uygun çözümlerin optimuma yaklaşan nesiller boyunca hayatta kalmalarına izin verir. Savin ve diğerleri (1996, 1997) ile Kartam ve Tongthong (1998), KDP için temel üst-sezgisel yöntemlerden biri olan sinir ağı yöntemi de geliştirmişlerdir. Chan ve diğerleri (1996), faaliyetler arasındaki öncelik ilişkilerini göz önünde bulundurarak, ihtiyaç duyulan kaynakların mevcut kaynak profillerinden sapmasının en aza indirilmesini amaçlayan bir

yaklaşım sunmuşlar. Bu yaklaşım herhangi bir kural kümesine bağlı olmayan bunun yerine, gücünü belirli bir proje ağının alanını öğrenmek için seçim ve yeniden birleştirme yeteneğinden alan GA yaklaşımıdır. Leu ve Yang (1999); zaman-maliyet ödünleşim, kaynak dengeleme ve kısıtlı kaynak problemlerini bütünleştirerek optimum proje kriterlerini hesaplayan GA temelli çok kriterli bir planlama modeli önerilmişler. Hegazy (1999), kaynak tayini ve dengelemede sezgisel yöntemler için iyileştirmeler önermiş ve her iki yönü de eşzamanlı dikkate alarak, optimuma yakın çözüm aramak için GA tekniğini kullanmıştır. Yaygın olarak kullanılan bir proje yönetim yazılımını kullanarak, GA prosedürünü otomatikleştirmek için bir makro program yazılmış ve faydaları ile gelecekteki iyileştirmeleri ve uzantılarını göstermek için bir vaka çalışması yapmıştır. Son ve Skibniewski (1999), yerel optimal noktalardan kaçarak arama yeteneklerini geliştirmek için benzetim tavlama (SA-simulated annealing) kullandı. Yerel optimize edici, faaliyet kaydırmak için farklı kurallar kullanan, dört sezgisel (algoritma, bunlardan herhangi biri tarafından belirlenen en iyi çözümden araştırmaya devam eder) algoritmayı içermiştir. Leu ve diğerleri (2000), sezgisel kaynak dengeleme algoritmalarının sakıncalarını gidermek için GA kullanmışlar. Bu algoritma faaliyetlerin başlangıç ve bitiş tarihlerinin yanı sıra, birden fazla inşaat kaynağının optimal veya optimal seviyesine yakın kombinasyonunu etkili bir şekilde sağlayabilir. Ayrıca, uygulayıcıların optimizasyon sürecine dahil olmalarını ve çeşitli kaynak profillerinden seçim yapmalarını sağlamak için genetik algoritmanın yeteneklerini artıran bir karar destek sistemi getirmişler. Geliştirilen modelin, gerçek kaynak kullanımı ile tek tip kaynak kullanımı arasında amaç işlevi olarak mutlak bir sapma olduğu düşünüldükçe tekli ya da çoklu kaynakları etkin bir şekilde dengelenebileceğini belirtmişler. Wang ve Zheng (2001), GA'yı benzetim tavlama ile birleştiren bir hibrit optimizasyon kullanmışlar. Zheng ve diğerleri (2003), çoklu kaynakların dengelenmesine yönelik çok amaçlı yeni bir Genetik Algoritma (GA) tekniği önermiştir. Bu teknik, uyarlanabilir ağırlığı ve RIC'i (Resource Improvement Coefficient), ortak sezgisel yaklaşımların dezavantajlarının üstesinden gelmek için uygunluk formülüne entegre etmektedir. Sunulan örnek vaka çalışmasında GA modeli ve MMY ile çözülerek karşılaştırma yapmışlardır. Sonuçlar önerilen GA yaklaşımının, matematiksel yöntemlerle çözülmesi güç olan büyük ve karmaşık projeler için umut verici bir potansiyel olduğunu göstermektedir. Hegazy ve Kassab (2003), simülasyonu genetik algoritmalar ile birleştiren etkin, kullanımı kolay bir kaynak optimizasyon sistemi sunarak inşaat planlamasını ve kaynak yönetimini geliştirmeyi amaçlayan bir yaklaşım sunmuşlar. Önerilen yaklaşım, bireysel inşaat işlemlerinde en yüksek fayda / maliyet oranını elde eden, en düşük maliyetli ve en verimli kaynak miktarını belirlemektedir. Önerilen yaklaşımın kullanışlılığını göstermek için iki örnek analiz etmişlerdir. Araştırma sonucu, bilgisayar simülasyonu ve genetik algoritmalar verimliliği artırmak ve inşaat süresini ve maliyetini düşürmek için etkili bir kombinasyon

oluşturabileceğini belirtmişler. Oral ve diğerleri (2003) tarafından sunulan GA tabanlı kaynak dengeleme modeli, tek kaynağı olan projelere uygulanabilir. Modelde üç farklı ölçekleme yöntemi kullanılmıştır ve tek tip kaynaktan sapmalar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Senouci ve Eldin (2004), öncelik ilişkilerini dikkate alarak toplam proje maliyet optimizasyon problemlerini çözmek için GA tabanlı (genetik algoritma ve benzetim tavlama kombinasyonu- GASA) bir model geliştirmişler. GA ile karşılaştırıldığında GASA algoritmasının, bireylerin çeşitliliğini arttırdığını, evrim sürecini hızlandığını ve erken yerel optimal çözümden kaçındığını belirtmişler. Oluşturulan GA modelinde doğrudan ve dolaylı maliyetlerin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, kısıtlı KDP'yi sınırsız bir optimizasyon problemine dönüştürmek için amaç fonksiyonu hesaplamalarına bir ceza fonksiyonu dahil edilmiştir. Geliştirilen model örnek olarak sunulmuştur. Bu modelin, uygulayıcılar tarafından büyük ölçekli projelerde başarılı bir şekilde kullanılabileceği öne sürülmüştür. Chen ve diğerleri (2005), hibrit genetik algoritma ve benzetim tavlama olmadan oluşan karma bir üst-sezgisel bir algoritma geliştirmişler. Hwang ve He (2006), gerçek parametrelere uyarlanabilir yeni bir benzetim tavlama genetik algoritması önermişler. Roca ve diğerleri (2008) ve Jun ve El-Rayes (2011), kaynak dengeleme ve kısıtlı kaynak problemlerini aynı anda çözmek için GA kullandılar. El-Rayes ve Jun (2009), kaynakların sayısını azaltmayı hedefleyen, iki yeni kaynak kullanım ölçütü ve farklı amaç fonksiyonlarını kullanarak GA tabanlı bir model geliştirdi. Bettemir (2009), zaman-maliyet-kaynak ödünleşim ve kaynak dengeleme problemlerinin optimum veya yakın optimum sonuçlarının bulunabilmesi için farklı GA tabanlı üst-sezgisel algoritma geliştirmiş ve test etmiştir. 5 farklı GA temelli üst-sezgisel yöntemin KDP üzerindeki performanslarını karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, kritik olmayan aktivitelerin başlangıç zamanları algoritmanın genlerinde kodlanmış ve bu başlangıç zamanları algoritma tarafından yeniden düzenlenmiş, böylece dengeli bir kaynak profiline ulaşmış. Yöntemleri doğrulamak ve performanslarını ölçmek için farklı projeler çözmüştür. Deney sonuçlarına göre, test problemlerinin en iyi bilinen çözümleri algoritmalar tarafından belirlenmiş ve tüm algoritmalar çoklu kaynak projelerini makul hesaplama sürelerinde çözmüştür. Doulabi ve diğerleri (2010), KDP'yi çözmek için yerel sezgisel arama ve onarım mekanizmasını GA ile entegre etmiştir. Hossein ve diğerleri (2010), büyük ölçekli çoklu kaynağa sahip projelerde, kaynak dengelemede aktivite bölünmesine izin veren yerel arama ve onarım mekanizmasına sahip yeni bir hibrid genetik algoritma önermişler. Algoritmanın performansını değerlendirmek için 2.000'e kadar aktiviteye sahip ağların birkaç örneğini içeren bir dizi deney problemi ve küçük örnekler için, literatürde mevcut bir karma tamsayı programlama modelini, karşılaştırmaya bir temel sağlamak için çözmüşlerdir. Hesaplama sonuçları, 5.000 faaliyete kadar büyük boyutlu ağlar için önerilen algoritmanın, sorunları makul bir süre içinde çoklu kaynaklarla gerçekten çözebileceğini ve başlangıç program çözümlerini en az % 76 oranında iyileştirebileceğini

belirtmektedir. Iranagh ve Sonmez (2012), kaynak dengeleme problemini GA ile çözmüştür. GA'nın performansı, bir kaç örnek proje için Microsoft Project 2010'un performansı ile karşılaştırmışlar ve örnek problemler için doğrusal-tamsayı programlama tekniği kullanılarak kesin çözümler elde etmişlerdir. Kesin çözümler, algoritmanın yeterli çözümleri bulma yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla GA'nın, kaynak dengeleme problemi için güçlü bir alternatif sunduğunu belirtmişler. Ponz-Tienda ve diğerleri (2013), proje son tarihinin bir ceza ile uzatılmasına izin veren çok sayıda kaynağı olan KDP için Uyarlanabilir Genetik Algoritma (AGA) sunmuşlar. Bu amaçla, Weibull dağılımını bir sonlandırma koşulu olarak küresel optimumun tahminini yapmak için kullanmışlar. Önerilen algoritmada, uygulayıcıların bir probleme farklı uygulanabilir çözümler arasında seçim yapmalarını sağlamak için Excel 2010 için VBA kullanarak uygulamışlardır. Önerilen AGA'nın zor problemler için sezgisel yöntemlerden her zaman daha iyi olduğunu belirtmişler. Lin ve Gen (2018), KDP'yi genelleştirilmiş öncelikli ilişkilerle verimli bir şekilde çözmek için GA geliştirmişler. Algoritmik performansı artırmak için iki aşamalı yerel arama tabanlı bir araç tasarlanmış ve GA'ya entegre edilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki, 1000 aktiviteye kadar büyük kıyaslama örnekleri için en gelişmiş algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Üst-sezgisel yöntemlerden biri de parçacık sürüsü optimizasyonudur (PSO). Qi ve diğerleri (2007) ile Guo ve diğerleri (2009), birden fazla kaynağa sahip birden fazla projeye uygulanabilecek bir PSO yöntemi geliştirmişler. Bu yöntemin GA'ya göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Pang ve diğerleri (2008), bu performansı algoritmanın, yerel optimalin erken yaklaşmasını önlemek için bir daralma faktörü tanımlayarak sağlamıştır. Bu performansın tepe kırpma, vadi dolgusu ve azaltılmış varyans yöntemi gibi algoritmalarından çok daha iyi olduğunu belirtmişler. Wang ve Qi (2009), sadece kaynak kullanım doğruluğunu değil aynı zamanda kaynak kısıtlı koşullar altında en kısa proje süresini de dikkate alan bir problem tanımlamışlar. Bu probleme göre hedef fonksiyonu tanımlamış ve problemi çözmek için PSO algoritmasını sunmuşlar. Problem sonucu, bu algoritmanın gerçek projelerde kullanılabileceğini göstermektedir.

Li ve diğerleri (2010), kısıtlı kaynak dengeleme problemini çözmek için karınca kolonisi algoritmasına dayalı bir yöntem geliştirmişler. Bunun için bir permütasyon kodlaması tasarlamışlar. Bu kodlamayı bulmak ve seri üretim programı ile optimum proje planını oluşturmak için Karınca kolonisi sistemini kullanmışlar. Standart örnekleri kullanarak yöntemi denemişlerdir. Sonuçlar algoritmanın KDP için etkili olduğunu göstermektedir. Geng ve diğerleri (2011), kritik olmayan aktivitelerinde en iyi başlama zamanını araştırmak ve doğrusal olmayan bir kaynak dengeleme problemini çözmek için yönlü karınca kolonisi optimizasyonu (DACO) algoritması kullanmışlar. Bu algoritma ile meta-sezgisel

yaklaşımların (ACO- karınca kolonisi optimizasyonu dâhil) erken yakınsama ve verimsiz kullanma gibi zayıf yönlerini indirgemişler. Sunulan DACO algoritması, gerçek proje planlaması için yakınsama oranını ve çözüm kalitesini etkin bir şekilde geliştirmiştir. Xiong ve Kuang (2006), seri programlama üretim şemasını karınca kolonisi algoritması ile birleştirerek bir hibrit model önermişler ve Geng ve diğerleri (2011), yönlendirilmiş bir karınca kolonisi önermişler.

Jeetendra ve diğerleri (2000), geleneksel yönetim araçlarının uygulamaları kısıtladığına ve petri ağları (PN) gibi güçlü grafiksel ve analitik araçların gerekliliğine değinmiştir. Bir sistemin davranışını, durum denklemlerini, cebirsel denklemleri ve diğer matematiksel modellerini oluşturarak petri ağlarının birçok karmaşık durumu çözmek için başarılı bir şekilde uyguladığını belirtmiş, ayrıca ağların avantajları ve proje yönetiminde kullanılmasını ele almıştır. Boushaala (2014); Petri ağının başta kaynak kısıtlı durumlar olmak üzere, proje yönetim ağlarını modellemek ve doğrulamak için nasıl kullanılacağını göstermiş ve ağın fonksiyonel analizi için PN tabanlı bir modelleme yazılımı geliştirmiştir. Önerilen PN tabanlı yaklaşım, proje yöneticisinin sadece kaynakları değil, aynı zamanda bir faaliyetle ilgili tüm değişkenleri ve kısıtlamaları göz önünde bulundurmasını sağlamıştır.

Iyer ve diğerleri (2015), herhangi bir projede kaynak dengeleme standardını optimize etmek için, MATLAB uygulamasında Bulanık Mantık yöntemini kullanarak kaynak dengeleme aracı geliştirmişler. Geliştirdikleri araç ile geleneksel KDP'den daha iyi sonuç elde etmişler. Salcedo-Bernal ve diğerleri (2017), çoklu kaynaklarda, yerel optimuma erken yakınsama problemini azaltmak için Geliştirilmiş ve Uyarlanabilir Uyum Araştırması (Improved and Adaptive Harmony Search - IAHS) algoritması KDP'ye uygulamışlardır. Bu algoritması, dikdörtgenden zil şekillerine kadar farklı seviyeli kaynak profilleri sağlayan problemler ile test edilmiştir. IAHS'ın diğer tekniklerden hem daha iyi hem de daha hızlı performans sergilemiştir. Tzanetos ve diğerleri (2018), sonar dalgalarından esinlenen optimizasyon (sonar inspired optimization -SIO) algoritmasını hibrit genetik algoritma ile kıyaslayarak kaynakları dengelemişlerdir. Dengeleme sonucunda diğer yaklaşımlara eşit ya da daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

3.3. Kesin Yöntemler

Literatürde KDP için kesin çözüm yöntemleri öneren çalışmalar sınırlıdır. Bunun yanı sıra bir problemin en uygun çözümünün kesin yöntemlerle çözülmedikçe bulunmasının hiçbir yolu yoktur. Çalışmalar sınırlı olmasının temelinde kesin yöntemlerin diğer yöntemlere kıyasla daha fazla hesaplama süresi ve çabası gerektirmesidir. Bu dezavantajlara

rağmen kesin yöntemle çözülen problemlere ve geliştirilecek olan algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer bir deyişle sezgisel ve üst-sezgisel yöntemlerin çözümlerinin doğruluğu kesin yöntemler ile belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları; dinamik programlama, dal ve sınır algoritması ve doğrusal tamsayılı programlamadır.

Kaynak dengeleme probleminin kesin çözümüne yönelik ilk çalışma Petrovic (1969) tarafından sunulan, çok kademeli bir dinamik programlama yaklaşımıdır. Bandelloni ve diğerleri (1994), hedeflenen bir kaynak seviyesinden mutlak sapmaları azaltan seri olmayan dinamik programlama modeli önermiştir. Younis ve Saad (1996), çok kaynaklı projelerde kaynak kullanımını optimize etmek için matematiksel bir model kullanmışlar ve modelin analizine yardımcı bir bilgisayar programı geliştirmişler.

Agin (1966), dal ve sınır algoritmasının temel özelliklerini açıklayarak genel bir tanımını yapmıştır ve yöntemin performansını etkileyen noktaları belirtmiştir. Mason ve Moodie (1971); maliyet, proje süresi ve kaynak kullanımını birlikte kullanarak bir dal ve sınır algoritması sunmuşlar. Bu çalışmada, kaynak talebi maliyetinin ve proje tamamlamadaki gecikmelerin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Sunulan algoritma, proje süresinin uzamasına izin verir, ancak gecikmeleri ve fazla tahsis edilmiş kaynakları bir maliyet fonksiyonu kullanarak cezalandırır. Algoritmanın performansını araştırmak için 25 problem çözülmüş. Geliştirilen algoritmanın, yeni sezgisellerin performanslarının test edilmesinde yardımcı olduğu belirtilmiştir. Demeulemeester ve Herroelen (1992), öncelik ve kaynak kısıtlamaları altında bir projenin süresini indirmek için aktiviteleri planlayan bir dal ve sınır metodu açıklamışlar. Metodu C dilinde, her biri en fazla üç kaynak türünü gerektiren 7 ila 50 aktivite arasında standart bir test kümesi kullanılarak programlamışlar. Programlanan projelerin çözüm hızlarının kendisinden önceki programların neredeyse on iki katı daha hızlıdır. Demeulemeester (1995), kaynak miktarlarının maliyetini minimize etmek için dal ve sınır algoritması kullanılmasını önermiştir. Neumann ve Zimmermann (2000), KDP ve net bugünkü değer problemini çözmeyi amaçladılar. Bu amaçlar için dal ve sınır ile kesilmiş dal ve sınır algoritmaları kullanılmıştır. Kesilmiş dal ve sınır algoritmasında, ümit vaat etmeyen dalları kesmek ve yalnızca ümit vaat eden dalların büyümesine izin vermek için bir sezgisel yöntem kullanılmıştır. Ayrıca, yukarıda belirtilen algoritmalara bir tabu arama işlemi entegre edilmiştir. Nübel (2001), kaynak kiralama problemini çözmek için bir dal ve sınır algoritması geliştirmiştir. Mutlu ve Sönmez (2010), kaynak dengeleme problemini çözmek için 4 farklı kaynak dengeleme ölçütüne uygulanabilen dal ve sınır algoritması geliştirmişler. Önerilen algoritmayı test etmek amacıyla sezgisel/üst-sezgisel yöntemlerle literatürde çözülmüş olan bazı problemlerle karşılaştırmışlar. Bu yöntem sonucunda algoritmanın küçük ölçekli problemleri çözebileceğini belirtmişler. Gather ve diğerleri (2011), KDP'yi çözmek için ayrıntılı sayımı dal ve sınır algoritması ile birleştiren bir çözüm sunmuşlar. Önerilen

çözümün literatürde bilinen metotlardan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Yeniocak (2013), KDP'de kaynak kullanım eğrilerini optimal yapmak için, birbirinden farklı amaç fonksiyonlarını çözebilen dal ve sınır algoritması esaslı prosedür ve karma tamsayılı doğrusal model geliştirmiştir. KDP'nin çözümünde ilk defa ikili alt sınır değeri hesabı kullanılmış ve bunları geliştirmek için aktivite seçim metotları sunmuştur. Geliştirilen algoritması literatürde yer alan diğer dal ve sınır tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır ve görülmüş ki algoritma, 20 aktiviteye kadar olan problemlerin çözümünde işlem süresi bakımından literatürdeki en iyi performansı sergilemiştir.

Karaa ve Nasr (1986), proje ömrü boyunca kaynakların yönetimi için, inşaat projelerini optimum kaynak kullanım şemasına dayalı olarak planlayan karmaşık tamsayılı doğrusal programlama modeli sunmuşlar. Easa (1989), küçük ve orta ölçekli ağlarda KDP'yi en iyi şekilde çözmek için kaynak talebinden sapmaları en aza indiren bir tamsayı-doğrusal programlama modeli önermiştir. Bu model, tek tip bir kaynak seviyesinden mutlak sapmaları en aza indirerek optimum dengelemeyi garanti eder. Ayrıca ardışık zaman dilimlerinde kaynak dalgalanmalarını en aza indiren gelişmiş bir amaç fonksiyonu önerdi. Geliştirilen model, örnek bir proje üzerinde test edilmiş ve optimum kaynak histogramları ile erken başlangıç kaynak histogramları karşılaştırılmıştır. Karshenas ve Haber (1990), kaynakların maliyetini ve proje süresini en aza indirmeyi amaçlayan doğrusal tamsayı programlama tabanlı bir yöntem geliştirdi. Bu yöntemin performansını göstermek için iki örnek proje çözüldü. Modelden elde edilen programlar en uygun süreye ve kaynak kullanımına sahiptir. Shah ve diğerleri (1993), bir projeyi tamamlayan minimum kaynakları bulmak için doğrusal tamsayı modeli üzerinde çalışmışlar. Mattilal and Abraham (1998), kritik yol yönteminin doğrusal inşaat projelerinde yetersiz olduğuna değinmiş ve bu projeler için doğrusal programlama yöntemini kullanarak planlanan, doğrusal bir projenin kaynaklarını dengelemek için bir prosedür sundular. Bir otoyol projesinin kaynak dağılımı, doğrusal programlama yazılımı LINDO kullanılarak dengelenmiştir. Tamsayılı doğrusal programlama ile uğraşan çoğu araştırmacıya gibi Mattila ve Abraham (1998)'da bu yöntemde çok sayıda değişkene ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Son ve Mattila (2004), projeleri daha gerçek temsil etmesi için kaynak dengeleme probleminde aktivite bölünmesine izin verdiler. Aktivite bölünmesine izin verilen projenin kaynak kullanım seviyesine modellemek için ikili değişkenli doğrusal bir program kullanmışlar. Bu program ile iki örnek proje çözülmüş ve model gerçek inşaat süreçlerini başarıyla temsil etmiştir. Rieck ve diğerleri (2012), klasik kaynak dengeleme problemi ve belirli bir kaynak kullanım eşliğinin aşılması durumunda maliyetlerin olduğu “aşırı yük problemi” olarak adlandırdıkları problemi çözmek için karma tamsayılı doğrusal programlama tekniği sunmuşlar. Bu tekniği güçlendirmek için belirli noktalarda kaynak gereksinim alt ve üst sınırları, kesme düzlemleri ve probleme özel

ön işleme teknikleri uygulanarak CPLEX 12.1. yardımıyla algoritma oluşturulmuştur. Rieck ve Zimmermann (2015), benzer şekilde CPLEX 12 kullanılarak KDP'ye kesin çözümler uygulamışlardır. Atan ve Eren (2018); kaynak dengelemede sabit süreler varsayımını gevşeterek, minimum proje süresini en iyi kaynak profilinde elde eden karma tamsayılı doğrusal ve ikinci dereceden modeller kullanarak hesaplamıştır.

3.3.1 Kesin yöntemler için paralel programlama

Arama uzayı büyük olan projelerde, orijinal problemi daha basit alt problemlere bölerek, paralel hesaplama kullanmak daha makuldür. Paralel hesaplama daha önce önerilmiş ve inşaat mühendisliğinde kullanılan algoritmaların daha hızlı performans göstermelerini sağlamak için kullanılmıştır. Paralel hesaplamanın zorluğu her probleme özgü paralel algoritmalar geliştirmek ve hesaplama taktikleri tasarlamaktır. Wah ve diğerleri (1985), tamsayılı programlama kullanarak paralel hesaplama çalışmıştır. Adeli ve Vishnubhotla (1987), güçlü mikro işlemcileri paralelleştirerek kullanmanın yüksek performans sağlayacağını belirtmiş ve çalışmasında, paralel programlama dilleri ve algoritmaları içeren işlemlerin bir derlemesini sunmuştur. Daha sonra Adeli ve Kamal (1989), yapısal analiz ve performans sonuçları için paralel bir algoritma tanıttı. C'de uygulanan yapısal analiz kodunun bölümleri, çok işlemcili bilgisayarda Encore Paralel İş Parçacığı kullanılarak paralelleştirilmiştir. Sonuç olarak, 11 işlemci için % 90–95 genel verimlilik elde edilmiştir. Adeli ve diğerleri (1993), yapısal mekanik ve mühendislik alanındaki yüksek performanslı bilgi işlem tekniklerini çalışmışlar. Tekniklerin; doğrusal yapısal analiz, doğrusal olmayan yapısal analiz ve geçici yapısal analizini incelemişler. Clausen ve Perregaard (1999), en iyi ilk arama stratejisi ve derinlik ilk arama stratejisini kullanarak birleştirici optimizasyon problemlerini paralel dal ve sınır (Branch and Bound-B & B) yöntemi ile çözmüşlerdir. Benzer olarak Lai ve Sahni (1984), Perregaard ve Clausen (1998), Crainic ve diğerleri (2006) ve Chakroun ve Melab (2015), dal ve sınır algoritması ile paralel optimizasyon yapmışlar. Ismail ve diğerleri (2014), hiyerarşik yönetici-usta-alt usta-işçi algoritması ile büyük ölçekli tamsayılı programlama problemlerini çözmek için paralel bir dal ve sınır algoritması önermişler. Önerilen algoritma, daha küçük ölçekli problemlerde diğer algoritmalara kıyasla zamanın önemli ölçüde azaltılmasını sağlayabileceği belirtilmiştir. Ponz-Tienda ve diğerleri (2017), KDP için bir paralel dal ve sınır algoritması önermektedir. Algoritma, 490 çekirdekli bilgisayar kullanılarak C++ dilinde geliştirilen bir uygulamada uygulanmış ve bu algoritma en az gecikmeyle 50 problemin optimum sonucunu vermektedir.

4. HESAP CETVELİ UYGULAMASI (HCU)

Projelerde kaynak kullanımını optimize etmek için tüm arama uzayını tarayarak en uygun iş programını elde eden bir uygulamadır. Bu uygulama ofis yazılımında VBA (Visual Basic for Applications) programlama dili ile hazırlandı ve uygulamanın projelerde optimum çözüme ulaşması için VB modülü içerisine makro komut ve fonksiyon dizinleri oluşturuldu. Oluşturulan bu makro sayesinde önceden el ile arama uzayı hesabı yapılan projelerin arama uzayı hesap sağlaması yapılırken, öte yandan bu makro tüm geciktirme seçeneklerini Minimum Moment ölçeği yardımı ile deneyerek KDP'nin optimum sonucuna ulaştıracağı erteleme değerlerini ve bu projeleri çözmek için harcanan hesaplama sürelerini belirlemektedir. Moment değerlerini kıyaslayarak en iyi moment değerini bulmayı amaçlayan HCU'nun hazırlanma ve projelere uygulanma adımları aşağıda belirtilmiştir.

Adım 1: Kombinasyon (arama uzayı) hesabında elde edilen erken olay zamanı, geç olay zamanı, bolluk hesabı, faaliyet süresi değerleri kullanılarak, aktivite gecikme, başlama ve tamamlanma değerleri oluşturulur.

Adım 2: Aktivitelere atanan her bir kaynak için ayrı bir iş programı hazırlanır.

Adım 3: Hazırlanan iş programlarının günlük kaynak ihtiyacı, günlük moment miktarı ve toplam moment miktarı hesaplanır. Her farklı aktivite erteleme ihtimali için değişen moment değeri vardır ve bu moment değerleri MM ölçeği ile hesaplanmaktadır.

Adım 4: Makro kodu oluşturulur. Bu kod, her döngüdeki moment değerini kendinden önce gelen moment değeri ile kıyaslayarak en küçük olanı bulmayı amaçlamaktadır. Döngü sayısı, her projeye özgün bağımlılık ve bolluk kısıtlarını gözетerek kodlanmasıyla elde edilen arama uzayı sayısı kadardır.

Adım 4.1: Hesaplama süresi makul (azami bir gün) olan projelerde kodlama yapılırken, projeyi bölmeden uygulanmaktadır.

Adım 4.2: Arama uzayı ve çözümü süresi büyük olan projelerde, orijinal problemi daha basit alt problemlere bölerek, paralel hesaplama kullanmak daha makuldür. Paralel hesaplamanın zorluğu her probleme özgü paralel algoritmalar geliştirmek ve hesaplama taktikleri tasarlamaktır. Paralel hesaplama inşaat mühendisliğinde kullanılan algoritmaların daha hızlı performans göstermelerini

sağlamak için kullanılmıştır. Hesaplama süresi makul olmayan (bir günü aşan) projelerde Paralel Programlama kullanılır. Paralel Programlama ile arama uzayı fazla ve karmaşık problemler, farklı işlemciler üzerinde eş zamanlı çalışabilen farklı komut serilerine bölünür. Bu sayede:

- i. Problemin çözümünde birden çok kaynak ayrıldığından zaman ve para kazanılacaktır.
- ii. Çok büyük problemlerin bilgisayarda çözüm imkânsızlığı azaltılmış olacaktır.
- iii. Literatürde kesin çözümü var olan projeler artacaktır.

Adım 5: Makro çalışması sonlandığında; KDP'nin en iyi çözümü için harcanan hesaplama süresi, hesapladığı kaynak dengeleme kombinasyon sayısı, optimum sonucun elde edileceği aktivite erteleme değerleri çalışma sayfasına yazdırılır. Hesaplanan projelerde optimizasyon öncesi ve sonrası günlük en fazla kullanılan kaynak sayısı değerlendirilir. Aynı zamanda daha önce el ile arama uzayı hesabı yapılan projelerin doğruluğu kontrol edilmiş olacaktır.

Adım 6: Analiz edilen projelerin, kaynak histogramı oluşturuldu.

Optimizasyon sonunda çözülen tüm projelerin günlük kullanılan maksimum kaynak sayısının değişimi ve kaynak iyileşme miktarları hesaplanarak grafikleştirildi.

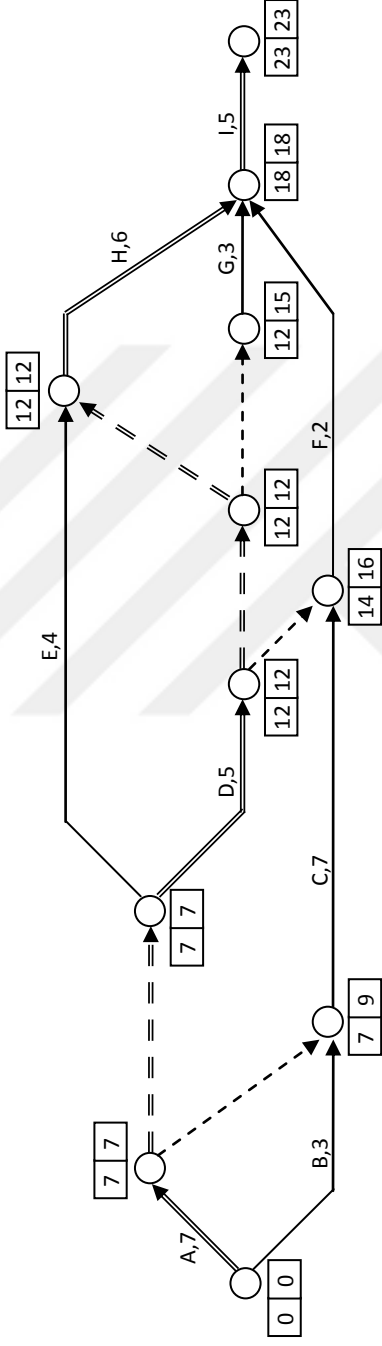
5. VAKA ANALİZİ

Tezin bu bölümünde, önceden açıklanan bilgiler kullanılarak ve harmanlanarak bir kaynak dengeleme çalışması yapılmıştır. Literatürden derlenen; kaynak sayısı 1 ile 4 arasında ve aktivite sayısı 5 ile 36 arasında değişen, 28 farklı hipotetik proje ve 1 adet iki katlı bina inşaatı olan proje analiz edildi. Projelerin ok diyagramları kritik yol metodu ile oluşturuldu ve aktivitelerin bolluk miktarları belirlendi. Bolluk miktarları yardımıyla projelerin el ile arama uzayı hesabı yapılmıştır. İş programı hazırlanan projeler, geliştirilen HCU ile analiz edildi. Analiz sürecinde optimum değere ulaşmak için minimum moment ölçeği kullanıldı. Analiz sonucuna göre projelerin iyileşme performansları değerlendirildi.

Tüm deneyler, 7,95 GB RAM ve bir Intel Core 2 i5 2.70 GHz İşleme Ünitesi bulunan bir PC üzerinde yapılmıştır. Bilgisayar Windows 7 Professional (64 bit) işletim sistemi tarafından çalıştırılmıştır.

5.1. Proje 1 (Geng et al., 2011)

9 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.1'de sunulduğu gibi kritik olmayan E, G ve B-C-F hatlarından oluşmaktadır. Kritik hat çift çizgi stili ile belirtilen, bolluğu olmayan A-D-H-I aktivitelerinden oluşan hattır.



Şekil 5.1. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.1. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	7	-	0	0	7	7	5	0	0
B	3	-	0	0	7	9	6	4	6
C	7	A-B	7	9	14	16	7	0	2
D	5	A	7	7	12	12	8	0	0
E	4	A	7	7	12	12	6	1	1
F	2	C-D	14	16	18	18	2	2	2
G	3	D	12	15	18	18	4	3	3
H	6	D-E	12	12	18	18	3	0	0
I	5	F-G-H	18	18	23	23	4	0	0

Aktivite süreleri yardımıyla diyagram üzerinde, erken başlama ve bitiş ile geç başlama ve bitiş süreleri hesaplanarak aktivitelerin bollukları belirlenmiştir. Olay zamanları, bolluk ve kaynak değerleri Çizelge 5.1'de verilen projede, B aktivitesinin 4, E aktivitesinin 1, F aktivitesinin 2, G aktivitesinin 3 gün serbest bolluğu hesaplanmıştır. Bolluk sahibi kritik olmayan; B-C-F, E ve G hatlarının bollukları kullanılarak problemin arama uzayı araştırılmıştır.

Çizelge 5.2. B-C-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

B	C	F	Kombinasyon Sayısı
0-1-2-3-4	0	0-1-2	3*5=15
0-1-2-3-4-5	1	1-2	2*6=12
0-1-2-3-4-5-6	2	2	1*7=7
Toplam			34

Hattın çözümünde C aktivitesi temel alınmıştır. 2 gün toplam bolluğa sahip C aktivitesinin ertelenmesi, 2 gün bolluğa sahip F aktivitesinin ertelenme miktarında kısıt oluştururken, 4 gün serbest bolluğa sahip B aktivitesinin ertelenme miktarını arttırmaktadır. C aktivitesinin 0 gün ertelenmesiyle, B aktivitesinde 0-1-2-3-4 gün olmak üzere 5 erteleme ihtimali ve F aktivitesinde 0-1-2 gün olmak üzere 3 erteleme ihtimali oluşmaktadır. C aktivitesinin 0-1-2 gün ertelendiği ihtimaller sonucunda 34 farklı kombinasyon mevcuttur.

Çizelge 5.3. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
E	2
B-C-F	34
G	4
Toplam	=2*34*4= 272

Çizelge 5.3'te kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. E, B-C-F ve G aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez ve şebeke üzerinde oluşturulabilecek toplam geciktirme kombinasyonu sayısı, bu yolların sahip olduğu gecikme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 272 farklı kombinasyon bulunmuştur.

Bulunan toplam kaynak dengeleme kombinasyon miktarlarının her biri için moment değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen uygulama sayesinde her döngüdeki moment değeri kendinden önce gelen moment değeri ile kıyaslanır ve bu moment değerleri arasındaki farkı en aza indirgeyen aktivite erteleme değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplama sonucunda bulunan başlangıç ile erteleme (makro sonrası-optimizasyon sonrası) arasındaki kaynak değişimi incelenmiştir. Bu işlem adımlarını analiz etmek için ofis programı kullanılmıştır.

Ofis yazılımında kaynak dengeleme problemini çözen HCU'nun işlem adımları:

Adım 1: Kombinasyon hesabında elde edilen olay zamanı, bolluk hesabı vs. değerler kullanılarak projede gecikme, başlama ve tamamlanma değerleri oluşturuldu ve projenin tamamlanma süresi 23 gün olarak bulundu.

EĞER															=MAK(O13:O21)														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P														
10																													
11																													
12																													
13																													
14																													
15																													
16																													
17																													
18																													
19																													
20																													
21																													
22																													
23																													
24																													
25																													

Aktiviteler	Süre	Bağımlılık	EOZİ	GOZİ	EOZj	GOZj	K1	serbest bolluk	toplam bolluk	gecikme	başlama	tamamlanma
A	7	-	0	0	7	7	5	0	0	0	0	7
B	3	-	0	0	7	9	6	4	6	0	0	3
C	7	A-B	7	9	14	16	7	0	2	2	9	16
D	5	A	7	7	12	12	8	0	0	0	7	12
E	4	A	7	7	12	12	6	1	1	0	7	11
F	2	C-D	14	16	18	18	2	2	2	2	16	18
G	3	D	12	15	18	18	4	3	3	3	15	18
H	6	D-E	12	12	18	18	3	0	0	0	12	18
I	5	F-G-H	18	18	23	23	4	0	0	0	18	23
SÜRE	=MAK(D13:O21)											

[MAK(sayı1; sayı2; ...)]

Şekil 5.2. Proje 1- Adım 1 hesap cetveli uygulama ekranı

$$\text{günlük moment} = (\text{günlük kullanılan kaynak miktarı})^2 \quad (5.1)$$

$$\text{günlük teorik kaynak miktarı} = \frac{\text{toplam günlük kullanılan kaynak miktarı}}{\text{proje süresi}} \quad (5.2)$$

$$\text{günlük teorik moment} = (\text{günlük teorik kaynak miktarı})^2 \quad (5.3)$$

$$\text{toplam teorik moment} = (\text{günlük teorik moment})(\text{proje süresi}) \quad (5.4)$$

Adım 4: Tüm arama uzayının da tarama yapan, her döngüdeki moment değerini kendinden önce gelen moment değeri ile kıyaslayarak optimum moment değerine yakınsamayı amaçlayan makro kodu oluşturuldu.

```

Sub Makrol()
    ' Makrol Makro
    ' Klavye Kısayolu: Ctrl+s

    Dim bGecikme As Integer
    Dim cGecikme As Integer
    Dim eGecikme As Integer
    Dim fGecikme As Integer
    Dim gGecikme As Integer
    Dim moment As Long
    Dim araRakam As Long
    Dim sayac As Long
    Dim gunBas As Long
    Dim saatBas As Long
    Dim dakikaBas As Long
    Dim saniyeBas As Long
    Dim gunBit As Long
    Dim saatBit As Long
    Dim dakikaBit As Long
    Dim saniyeBit As Long
    Dim sure As Long

    Cells(43, "AG").Calculate
    Cells(44, "AG").Calculate
    Cells(45, "AG").Calculate
    Cells(46, "AG").Calculate
    gunBas = Cells(43, "AG").Value
    saatBas = Cells(44, "AG").Value
    dakikaBas = Cells(45, "AG").Value
    saniyeBas = Cells(46, "AG").Value

    moment = 50000
    sayac = 0

    For cGecikme = 0 To 2
        For bGecikme = 0 To 4 + cGecikme
            For fGecikme = cGecikme To 2
                For eGecikme = 0 To 1
                    For gGecikme = 0 To 3
                        Range("M14").Select
                        ActiveCell.FormulaR1C1 = bGecikme
                        Range("M15").Select
                        ActiveCell.FormulaR1C1 = cGecikme
                        Range("M17").Select
                        ActiveCell.FormulaR1C1 = eGecikme
                        Range("M18").Select
                        ActiveCell.FormulaR1C1 = fGecikme
                        Range("M19").Select
                        ActiveCell.FormulaR1C1 = gGecikme
                        Range("AG29").Select
                        araRakam = Cells(29, "AG").Value
                        sayac = sayac + 1
                        If araRakam < moment Then
                            moment = araRakam
                            Cells(34, 33).Value = bGecikme
                            Cells(35, 33).Value = cGecikme
                            Cells(36, 33).Value = eGecikme
                            Cells(37, 33).Value = fGecikme
                            Cells(38, 33).Value = gGecikme
                            Cells(33, 33).Value = moment
                        End If
                    Next gGecikme
                Next fGecikme
            Next eGecikme
        Next bGecikme
    Next cGecikme

    Cells(32, 33).Value = sayac
    gunBit = Cells(43, "AG").Value
    saatBit = Cells(44, "AG").Value
    dakikaBit = Cells(45, "AG").Value
    saniyeBit = Cells(46, "AG").Value

    sure = (gunBit - gunBas) * 3600 * 24 + (saatBit - saatBas) * 3600 + (dakikaBit - dakikaBas) * 60 + saniyeBit - saniyeBas
    Cells(39, 33).Value = sure
End Sub

```

Şekil 5.5. Proje 1- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı

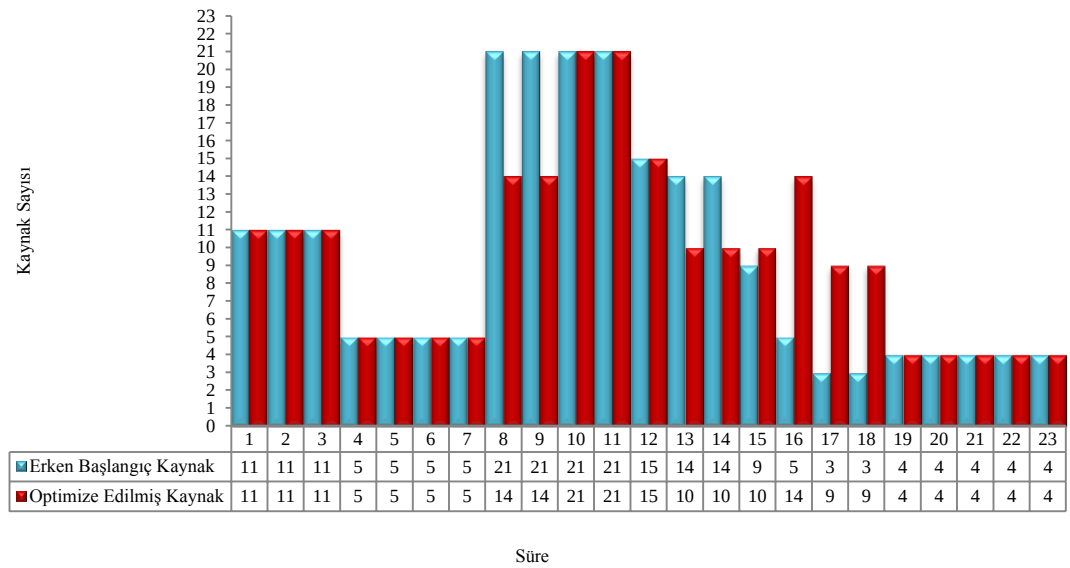
Adım 5: Algoritma tamamlandığında optimum sonucu veren; kritik olmayan aktivitelerin gecikme değerleri, elde edilen en iyi moment değeri, KDP'nin en iyi çözümü için harcanan hesaplama süresi ve hesapladığı kaynak dengeleme kombinasyon sayısı ile çalışma sayfasına yazdırılır. Hesaplama değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Proje 1- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
C-gecikme	2
E-gecikme	0
F-gecikme	2
G-gecikme	3
Arama uzayı sayısı	272
Hesaplama süresi (sn)	8
Başlangıç moment değeri	3048
Optimum moment değeri	2700

Arama uzayı sayısı 272 olan bir projeyi 8 saniyede, B aktivitesini 0 gün erteleyerek, C aktivitesini 2 gün erteleyerek, E aktivitesini 0 gün erteleyerek, F aktivitesini 2 gün erteleyerek ve G aktivitesini 3 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri (optimum moment) 2700 olarak hesaplandı.

Adım 6: Geliştirilen HCU öncesi ve sonrası günlük en fazla kullanılan kaynak sayısı değerlendirildi ve kaynak histogramı oluşturuldu.

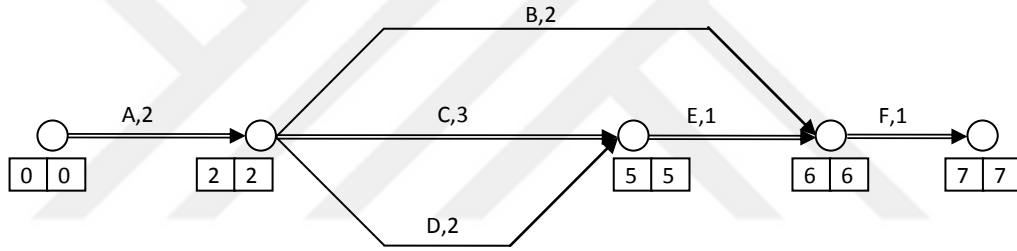


Şekil 5.6. Proje 1 kaynak histogramı

Histogramda mavi sütun (aynı süredeki ilk sütun) “aktivitelerin erken başlamasıyla ortaya çıkan kaynak dağılımını” ve kırmızı sütun (aynı süredeki ikinci sütun) “optimizasyon sonrası ortaya çıkan en uygun kaynak dağılımını” göstermektedir. Kaynak dengeleme işlemi sonucunda histogramda oluşan dalgalanma azalmış ve inşaat projelerinde istenilen kaynak histogramında çan şekline yaklaşmıştır. Günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir fakat maksimum kaynağın kullanıldığı gün sayısı 4'ten 2'ye azalmıştır.

5.2. Proje 2 (Gordon and Tulip, 1997)

6 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.7'de sunulduğu gibi kritik olmayan D ve B hatlarından oluşmaktadır. Kritik hat ise bolluğu olmayan A-C-E-F aktivitelerinden oluşan hattır.



Şekil 5.7. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.5. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	1	0	0
B	2	A	2	2	6	6	2	2	2
C	3	A	2	2	5	5	1	0	0
D	2	A	2	2	5	5	1	1	1
E	1	C-D	5	5	6	6	0	0	0
F	1	B-E	6	6	7	7	1	0	0

Aktivite süreleri yardımıyla diyagram üzerinde, erken başlama ve bitiş ile geç başlama ve bitiş süreleri hesaplanarak aktivitelerin bollukları belirlenmiştir. Olay zamanları ve bolluk

değerleri Çizelge 5.5'te verilen projede, birbirinden bağımsız olan B aktivitesinin 2, D aktivitesinin 1 gün serbest bolluğu hesaplanmıştır. Bolluk sahibi kritik olmayan, B ve D hatlarının bollukları kullanılarak problemin arama uzayı araştırılmıştır.

Çizelge 5.6. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

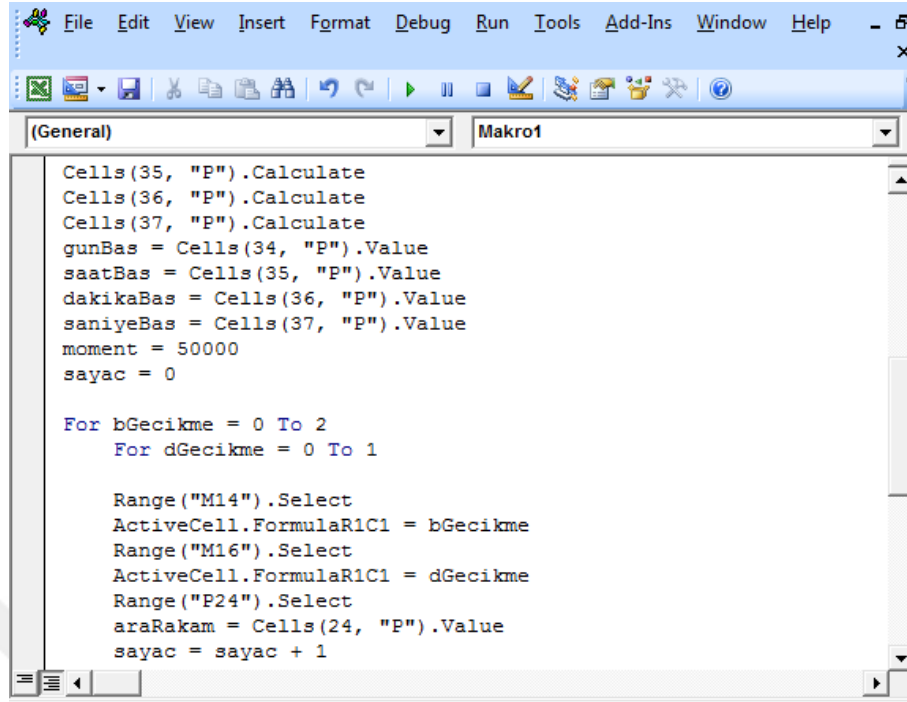
Hatlar	K.Sayısı
D	2
B	3
Toplam	$=2 \times 3 = 6$

Çizelge 5.6'da bağımsız B ve D aktivitelerinin dengeleme işlemindeki kombinasyonları verilmiştir. D hattı 0-1 gün ve B hattı ise 0-1-2 gün ertelenebilir. İhtimaller toplandığında D hattının 2 ve B hattının 3 farklı ihtimali $2 \times 3 = 6$ farklı kombinasyon oluşturmaktadır.

HCU'nun işlem adımları:

.

Adım 4: Makro kodu oluşturuldu.



Şekil 5.9. Proje 2- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı

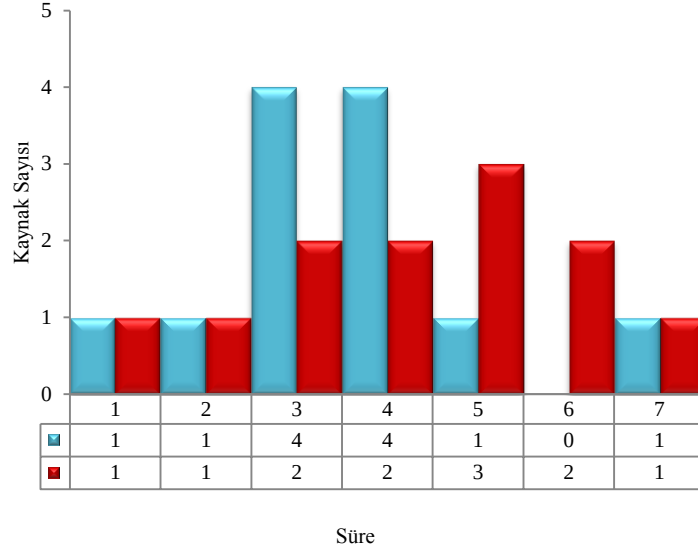
Adım 5: Hesaplama değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Proje 2- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	2
D-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	6
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	36
Optimum moment değeri	24

Arama uzayı sayısı 6 olan bir projeyi sıfırdan daha az saniyede, B aktivitesini 2 gün erteleyerek ve D aktivitesini 0 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı.

Adım 6: Kaynak histogramı oluşturuldu.

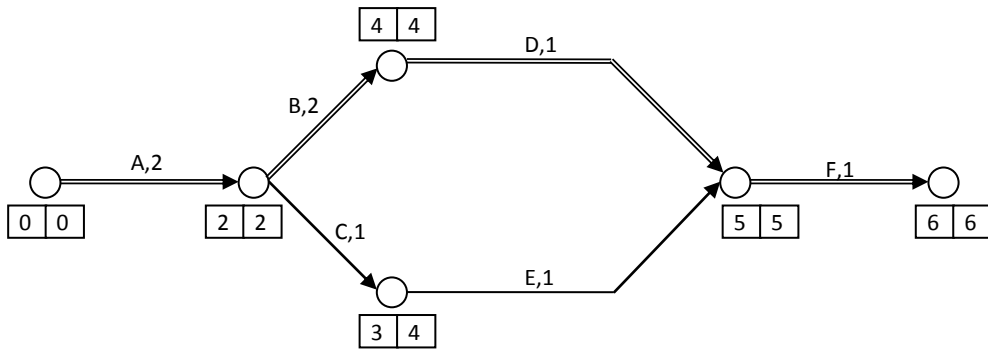


Şekil 5.10. Proje 2 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 4'ten 3'e düşmüştür.

5.3. Proje 3 (Gordon and Tulip, 1997)

Proje 6 aktiviteden oluşmaktadır. Aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.11'de sunulduğu gibi çizilmiştir. Diyagram, kritik olmayan C-E hattı ve kritik olan A-B-D-F hattından oluşmaktadır.



Şekil 5.11. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.8. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	1	0	0
B	2	A	2	2	4	4	1	0	0
C	1	A	2	2	3	4	2	0	1
D	1	B	4	4	5	5	2	0	0
E	1	C	3	4	5	5	1	1	1
F	1	D-E	5	5	6	6	1	0	0

Olay zamanları ve bolluk değerleri Çizelge 5.8'de verilen projede, C aktivitesinin 1 gün toplam bolluğu ile E aktivitesinin 1 gün toplam ve serbest bolluğu hesaplanmıştır. Bolluk sahibi kritik olmayan C-E hattının bollukları kullanılarak problemin arama uzayı araştırılmıştır.

Çizelge 5.9. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

C	E
0	0-1
1	1
K.Sayısı	3

Çizelge 5.9'da hesaplanan aktivitelerin kaynak dengeleme kombinasyonları verilmiştir. Çizelge 5.9'a göre C aktivitesinin ertelenmesine karşın E aktivitesinde oluşabilecek değişiklikler gösterilmiştir. C aktivitesinin ertelenmemesi durumunda E aktivitesi 0 veya 1 gün ertelenebilir. C aktivitesinin 1 gün ertelenmesi durumunda E aktivitesi 1 gün ertelenebilir. Sonuçta toplam 3 farklı kombinasyon oluşmuştur.

HCU'nun işlem adımları:

Adım 4: Makro kodu oluşturuldu.

```
gunBas = Cells(34, "P").Value  
saatBas = Cells(35, "P").Value  
dakikaBas = Cells(36, "P").Value  
saniyeBas = Cells(37, "P").Value  
moment = 50000  
sayac = 0  
  
For cGecikme = 0 To 1  
    For eGecikme = cGecikme To 1  
        Range("M17").Select  
        ActiveCell.FormulaR1C1 = cGecikme
```

Şekil 5.13. Proje 3- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı

Adım 5: Hesaplama değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Proje 3- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

C-gecikme	0
E-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	3
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	20
Optimum moment değeri	20

Arama uzayı sayısı 3 olan bir projeyi sıfırdan daha az saniyede, C ve E aktivitesini 0 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı.

Adım 6: Kaynak histogramı oluşturuldu.

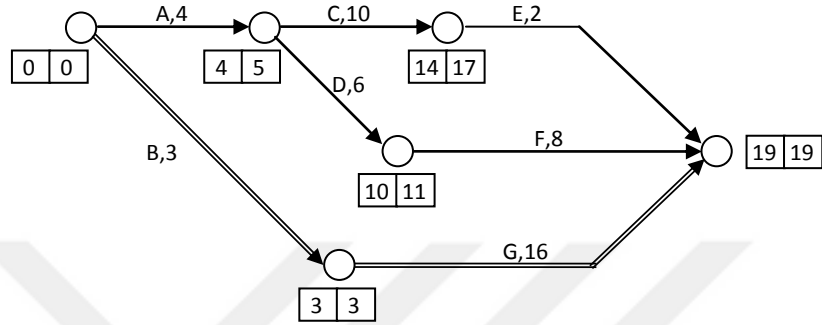


Şekil 5.14. Proje 3 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmedi. Arama uzayı sayısının azlığı kaynak dengelemede kısıt oluştururken, hesaplama süresinde kolaylık sağlamaktadır.

5.4. Proje 4 (Chelaka et al., 2001)

Proje, 7 aktiviteden oluşmaktadır. Aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.15'te sunulduğu gibi çizilmiştir. Diyagram, kritik olmayan birbirine bağımlı A-C-D-E-F hattından oluşmaktadır.



Şekil 5.15. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.11. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	4	-	0	0	4	5	4	0	1
B	3	-	0	0	3	3	1	0	0
C	10	A	4	5	14	17	2	0	3
D	6	A	4	5	10	11	4	0	1
E	2	C	14	17	19	19	4	3	3
F	8	D	10	11	19	19	1	1	1
G	16	B	3	3	19	19	3	0	0

Çizelge 5.11'de görüldüğü gibi E aktivitesinin 3 ve F aktivitesinin 1 gün serbest bolluğu bulunmuştur. Şebeke A-C-E-D-F aktivitelerinden oluşan kritik olmayan, birbirine bağımlı 7 aktiviteden oluşmaktadır. Şebeke, A aktivitesi temel alınarak çözülmüştür.

Çizelge 5.12. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

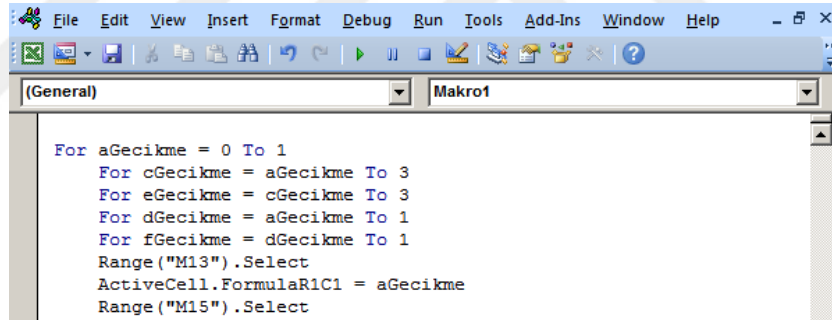
A	C	E	D	F	Kombinasyon Sayısı
0	0	0-1-2-3	0	0-1	
	1	1-2-3	1	1	
	2	2-3			
	3	3			=10×3=30
1	1	1-2-3	1	1	
	2	2-3			
	3	3			=6×1=6
Toplam					36

A aktivitesinin ertelenmesi ile C-E ve D-F hattında oluşan ihtimaller çarpılarak toplanmıştır. Bu ihtimaller toplamına 36 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU'nun işlem adımları:

Adım 1-2-3 hesaplamaları yapıldı.

Adım 4: Makro kodu oluşturuldu.



Şekil 5.16. Proje 4- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı

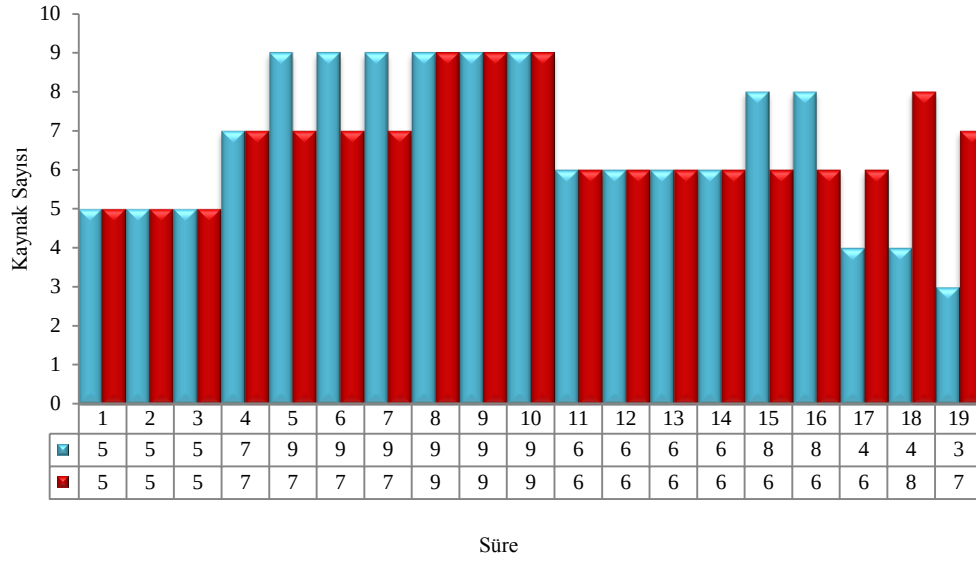
Adım 5: Hesaplama değerleri Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13. Proje 4- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

A-gecikme	0
C-gecikme	3
D-gecikme	0
E-gecikme	3
F-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	36
Hesaplama süresi (sn)	2
Başlangıç moment değeri	923
Optimum moment değeri	915

Arama uzayı sayısı 36 olan bir projeyi 2 saniyede, A aktivitesini 0 gün erteleyerek, C aktivitesini 3 gün erteleyerek, D aktivitesini 0 gün erteleyerek, E aktivitesini 3 gün erteleyerek ve F aktivitesini 0 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı.

Adım 6: Kaynak histogramı oluşturuldu.

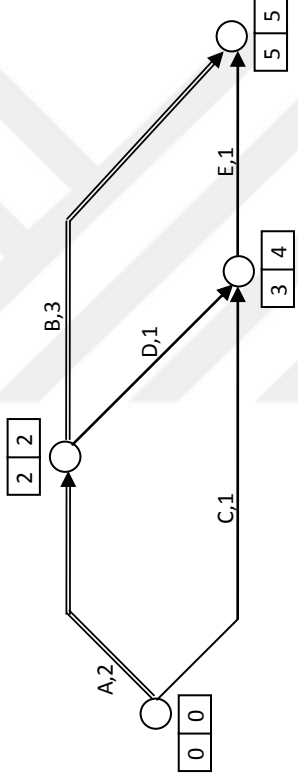


Şekil 5.17. Proje 4 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmedi fakat maksimum kaynak kullanılan gün sayısı 3 gün azaltıldı.

5.5. Proje 5 (Younis and Saad, 1996)

Proje, 5 aktiviteden oluşmaktadır. Aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.18'de sunulduğu gibi çizilmiştir. Diyagram, kritik olmayan birbirine bağımlı C-D-E ve kritik olan A-B hattından oluşmaktadır.



Şekil 5.18. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.14. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	10	7	3	0	0
B	3	A	2	2	5	5	6	2	8	0	0
C	1	-	0	0	3	4	4	1	10	2	3
D	1	A	2	2	3	4	2	4	5	0	1
E	1	C-D	3	4	5	5	2	1	10	1	1

C aktivitesinin 2 gün ve E aktivitesinin 1 gün serbest bolluğu hesaplanan şebekede kritik olmayan D-E ve C-E hattı Şekil 5.14'te görüldüğü gibi E aktivitesinin ortak olmasından ötürü, E aktivitesi temel alınarak çözülmüştür.

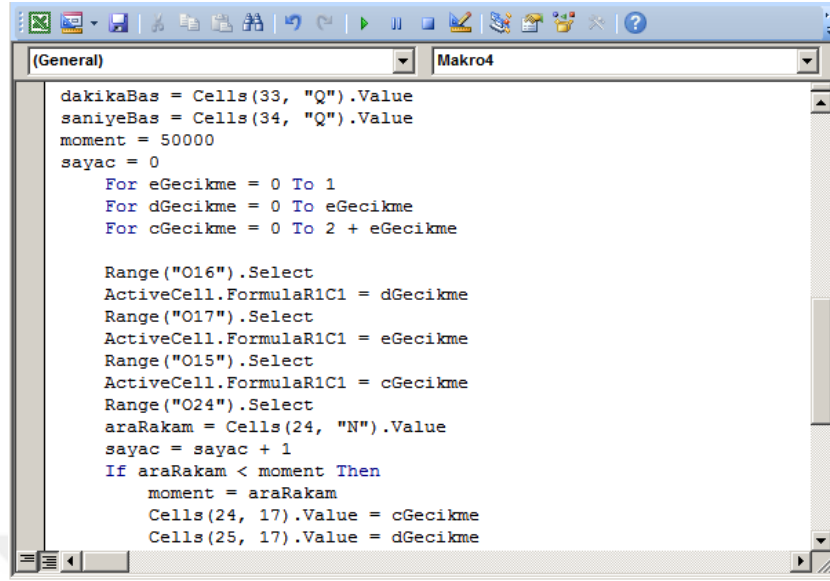
Çizelge 5.15. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

E	C	D	K. Sayısı
0	0	0	
	1		
	2		$=3 \times 1 = 3$
1	0	0	
	1	1	
	2		
	3		$=4 \times 2 = 8$
Toplam			11

E aktivitesinin 0 gün ertelenmesiyle C aktivitesi 0-1-2 gün ve D aktivitesi 0 gün ertelenebilecek. Toplamda $3 \times 1 = 3$ ihtimal oluşacak. E aktivitesinin 1 gün ertelenmesiyle C aktivitesi 0-1-2-3 gün ve D aktivitesi 0-1 gün ertelenebilecek. Toplamda $4 \times 2 = 8$ ihtimal oluşacak. Sonuç olarak 11 kombinasyon oluşmaktadır.

HCU'nun işlem adımları:

Adım 4: Makro kodu oluşturuldu.



Şekil 5.20. Proje 5- Adım 4 hesap cetveli uygulama ekranı

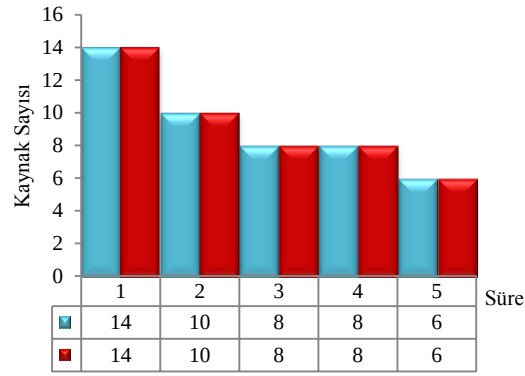
Adım 5: Hesaplama değerleri Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16. Proje 5- Adım 5 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

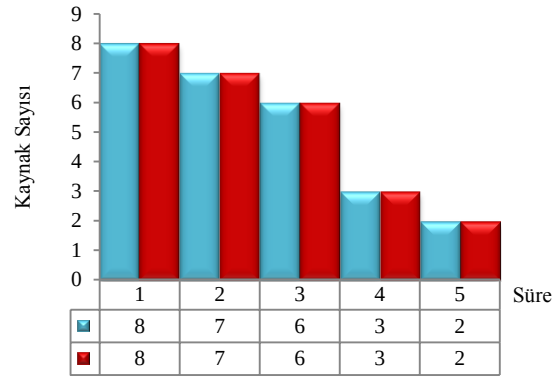
C-gecikme	0
D-gecikme	0
E-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	11
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	1357
Optimum moment değeri	1357

Optimum momente; arama uzayı sayısı 11 olan projede sıfırdan daha az saniyede C, D ve E aktivitelerini ertelemeyerek ulaşılmıştır.

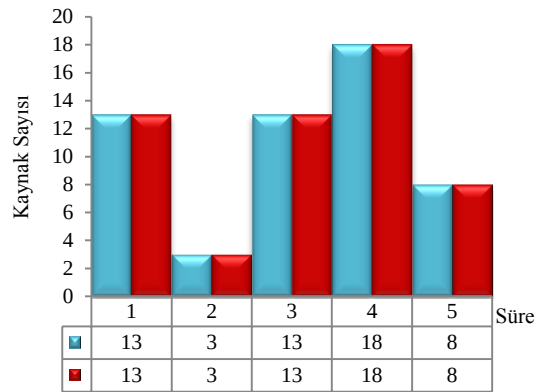
Adım 6: Kaynak histogramı oluşturuldu.



Şekil 5.21. Proje 5 kaynak-1 histogramı



Şekil 5.22. Proje 5 kaynak-2 histogramı



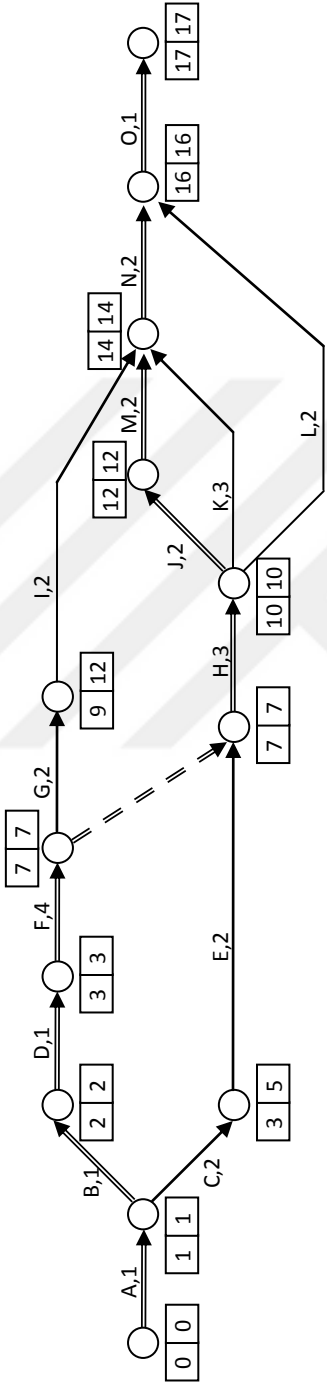
Şekil 5.23. Proje 5 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda kaynak histogramlarında değişme oluşmadı.

Bu projeden sonra tezde, HCU analizlerinin makro döngüleri ve optimum sonucu veren değerleri sunulacaktır.

5.6. Proje 6 (Hinze, 2006)

15 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.24'te sunulduğu gibi kritik olmayan C-E, G-I, K ve L hatlarından oluşmaktadır. Kritik hat çift çizgi stili ile belirtilen, bolluğu olmayan A-B-D-F-H-J-M-N-O aktivitetlerinden oluşan hattır.



Şekil 5.24. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.17. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	1	-	0	0	1	1	3	6	2	3	0	0
B	1	A	1	1	2	2	4	5	1	1	0	0
C	2	A	1	1	3	5	4	3	1	3	0	2
D	1	B	2	2	3	3	1	5	4	6	0	0
E	2	C	3	5	7	7	3	4	2	2	2	2
F	4	D	3	3	7	7	2	2	1	6	0	0
G	2	F	7	7	9	12	3	6	2	2	0	3
H	3	E-F	7	7	10	10	3	6	5	3	0	0
I	2	G	9	12	14	14	2	4	6	4	3	3
J	2	H	10	10	12	12	5	6	1	4	0	0
K	3	H	10	10	14	14	2	6	5	3	1	1
L	2	H	10	10	16	16	3	1	2	4	4	4
M	2	J	12	12	14	14	2	3	2	2	0	0
N	2	I-K-M	14	14	16	16	6	4	6	5	0	0
O	1	L-N	16	16	17	17	2	5	5	5	0	0

E aktivitesinin 2, I aktivitesinin 3, K aktivitesinin 1, L aktivitesinin 4 gün serbest bolluğu hesaplanan problemde kritik olmayan dört bağımsız hat bulunmaktadır.

Çizelge 5.18. G-I Hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

G	I
0	0-1-2-3
1	1-2-3
2	2-3
3	3
Toplam	10

G aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile I aktivitesi 0-1-2-3, 1 gün ertelenmesi ile 1-2-3 şeklinde devam eden ihtimaller toplandığında $4 \times 5 / 2 = 10$ dengeleme kombinasyonu bulunmuştur.

Çizelge 5.19. C-E Hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

C	E
0	0-1-2
1	1-2
2	2
Toplam	6

C aktivitesinin ertelenmesiyle E aktivitesinde $3 \times 4 / 2 = 6$ dengeleme kombinasyonu bulunmuştur.

Çizelge 5.20. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
G-I	10
C-E	6
K	2
L	5
Toplam	$= 10 \times 6 \times 2 \times 5 = 600$

Çizelge 5.20'de kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. C-E, G-I, K ve L aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez ve şebeke üzerinde oluşturulabilecek toplam geciktirme kombinasyonu sayısı, bu yolların sahip olduğu gecikme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 600 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:

```

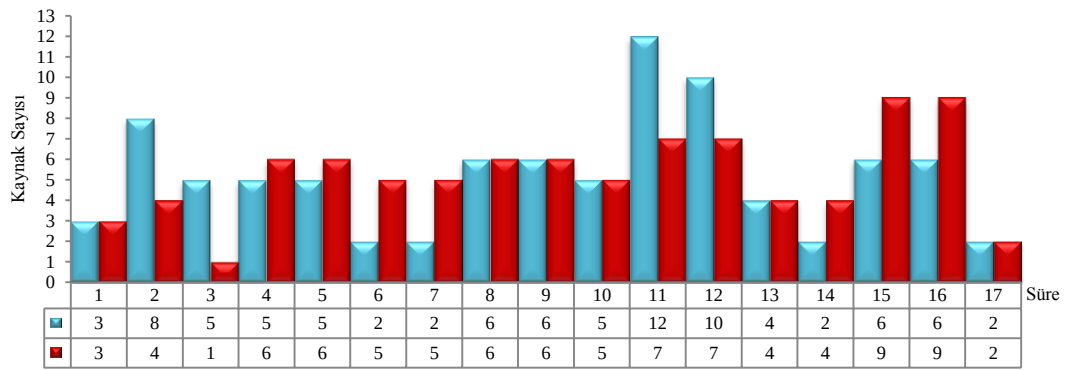
(Makro1)
dakikaBas = Cells(50, "Z").Value
saniyeBas = Cells(51, "Z").Value
moment = 50000
sayac = 0
For cGecikme = 0 To 2
    For eGecikme = cGecikme To 2
        For gGecikme = 0 To 3
            For iGecikme = gGecikme To 3
                For kGecikme = 0 To 1
                    For lGecikme = 0 To 4
                        Range("P15").Select
                    
```

Şekil 5.25. Proje 6 makro

Çizelge 5.21. Proje 6 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

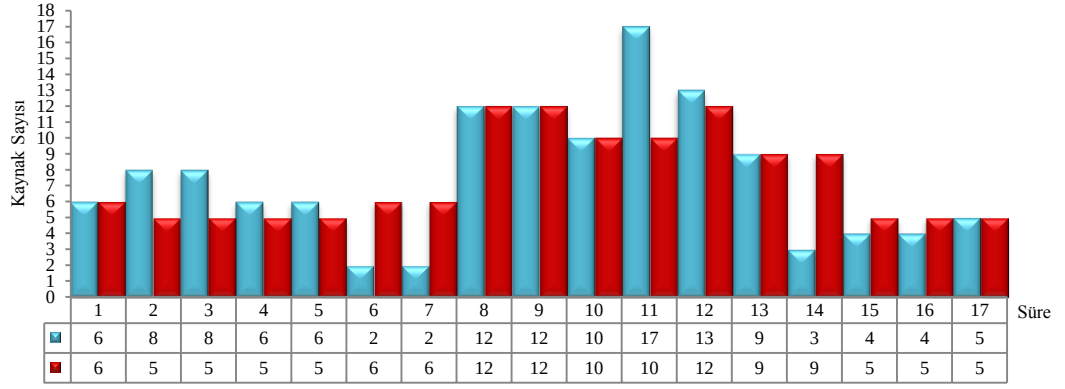
C-gecikme	2
E-gecikme	2
G-gecikme	0
I-gecikme	0
K-gecikme	1
L-gecikme	4
Arama uzayı sayısı	600
Hesaplama süresi (sn)	39
Başlangıç moment değeri	3367
Optimum moment değeri	3005

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



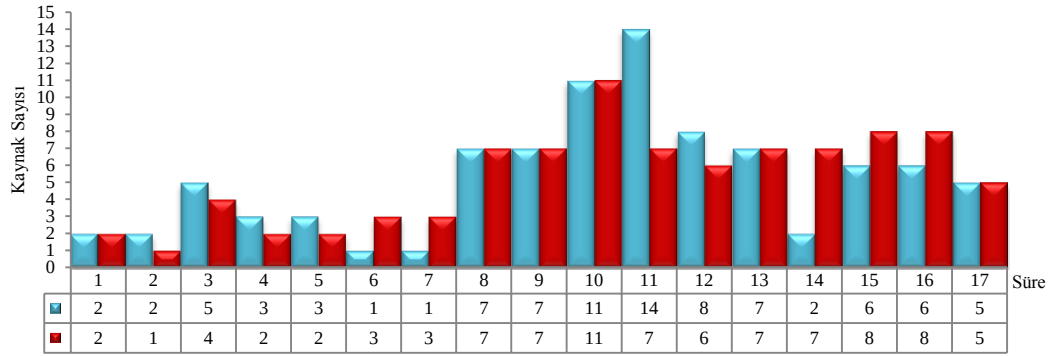
Şekil 5.26. Proje 6 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 12'den 9'a indirildi.



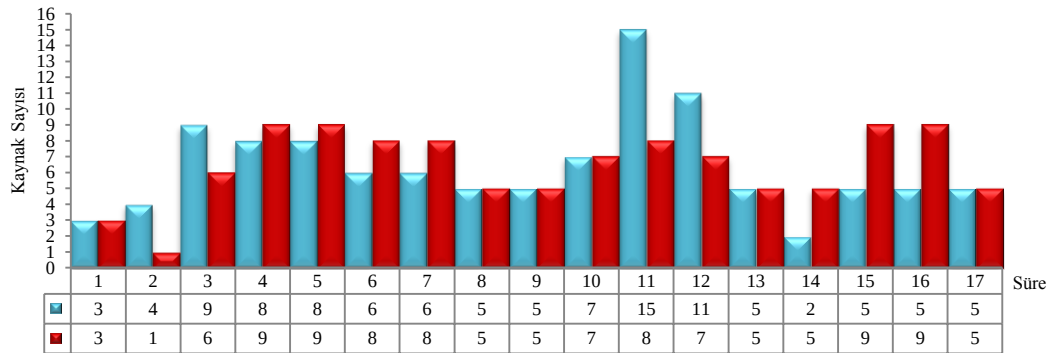
Şekil 5.27. Proje 6 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 17'den 12'ye indirildi.



Şekil 5.28. Proje 6 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 14'den 11'e indirildi.

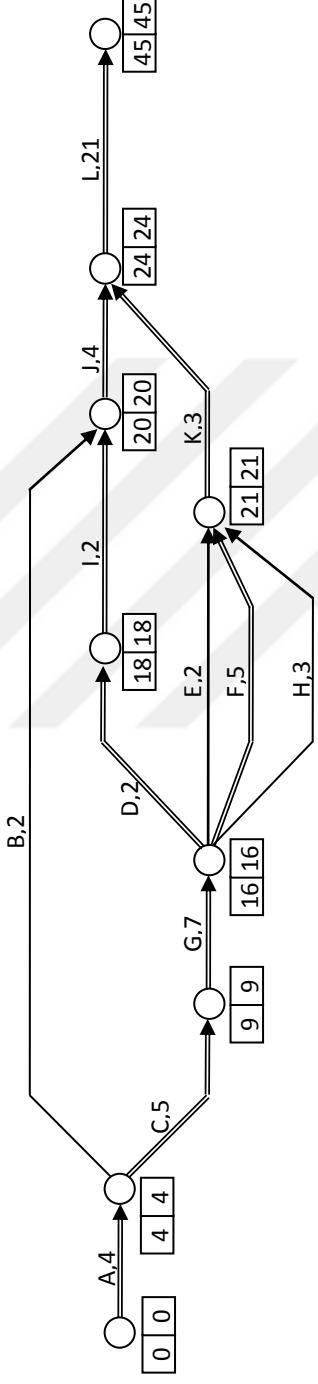


Şekil 5.29. Proje 6 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 15'den 9'a düşmüştür.

5.7. Proje 7 (Newitt, 2004)

12 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılıklarını temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.30'da sunulduğu gibi çizilmiştir.



Şekil 5.30. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.22. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	4	-	0	0	4	4	4	2	1	6	0	0
B	2	A	4	4	20	20	2	4	0	3	14	14
C	5	A	4	4	9	9	6	0	3	6	0	0
D	2	G	16	16	18	18	0	0	5	1	0	0
E	2	G	16	16	21	21	6	6	0	0	3	3
F	5	G	16	16	21	21	2	5	6	6	0	0
G	7	C	9	9	16	16	4	6	6	6	0	0
H	3	G	16	16	21	21	6	1	0	3	2	2
I	2	D	18	18	20	20	3	0	6	6	0	0
J	4	B-I	20	20	24	24	5	5	2	3	0	0
K	3	E-F-H	21	21	24	24	1	4	5	6	0	0
L	21	J-K	24	24	45	45	0	5	4	2	0	0

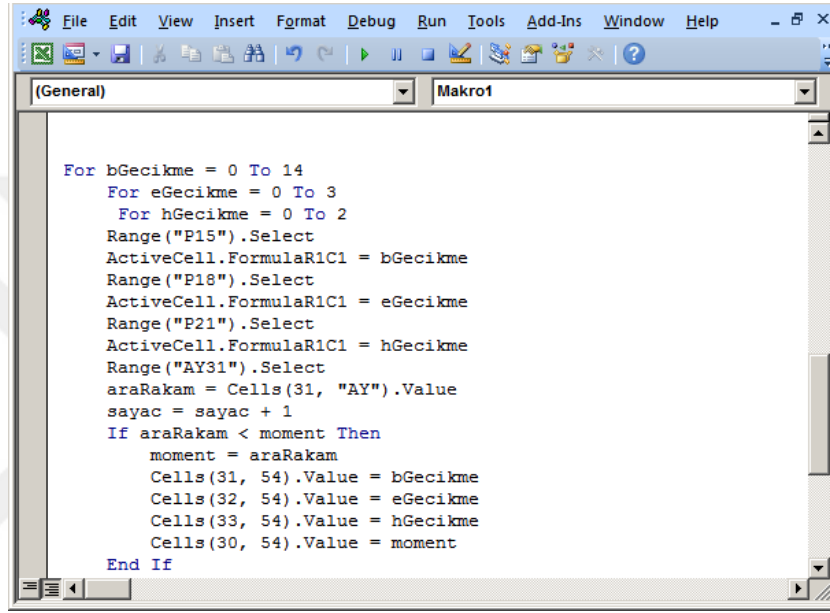
B aktivitesinin 14, E aktivitesinin 3, H aktivitesinin 2 serbest bolluğu hesaplanan şebekede birbirinden bağımsız ve kritik olmayan 3 hat mevcuttur. Hatlar serbest bollukları yardımıyla hesaplandı ve bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 180 farklı kombinasyon bulunmuştur.

Çizelge 5.23. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar		K. Sayısı
B	$0 \leq B \leq 14$	15
E	$0 \leq E \leq 3$	4
H	$0 \leq H \leq 2$	3
Toplam		$=15 \times 4 \times 3 = 180$

HCU'nun işlem adımları:

Makro kodu oluşturuldu.

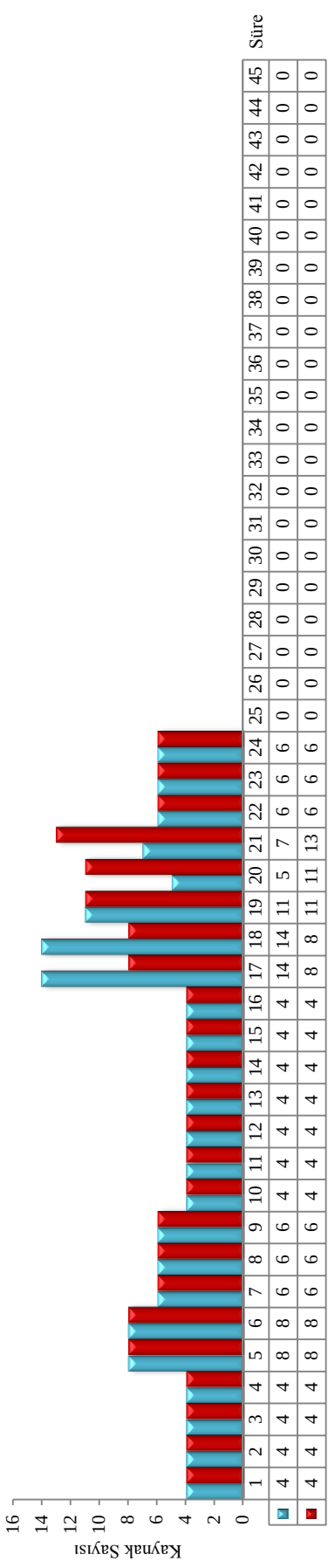


Şekil 5.31. Proje 7 makro

Çizelge 5.24. Proje 7 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

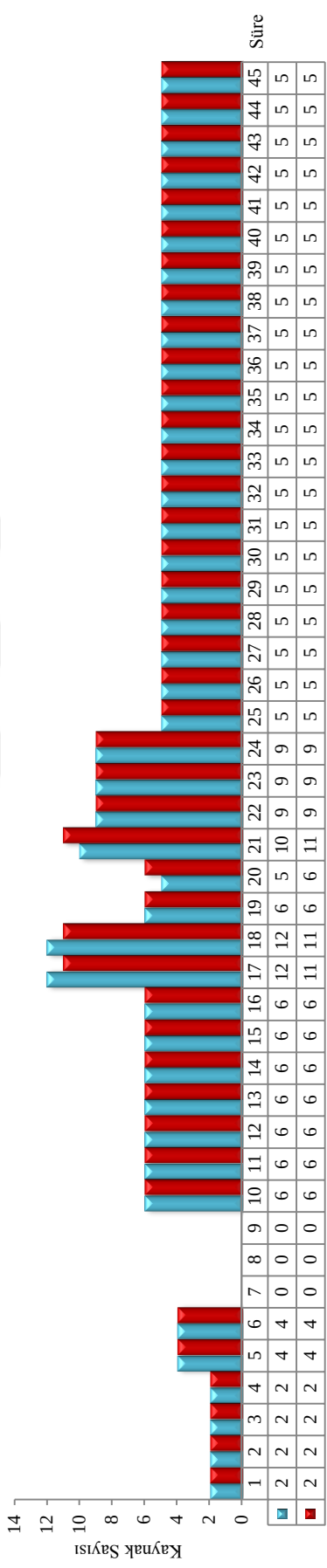
B-gecikme	0
E-gecikme	0
H-gecikme	2
Arama uzayı sayısı	180
Hesaplama süresi (sn)	6
Başlangıç moment değeri	5645
Optimum moment değeri	5625

Arama uzayı sayısı 180 olan bir projeyi 6 saniyede, B aktivitesini 0 gün ertelerek, E aktivitesini 0 gün ertelerek ve H aktivitesini 2 gün ertelerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



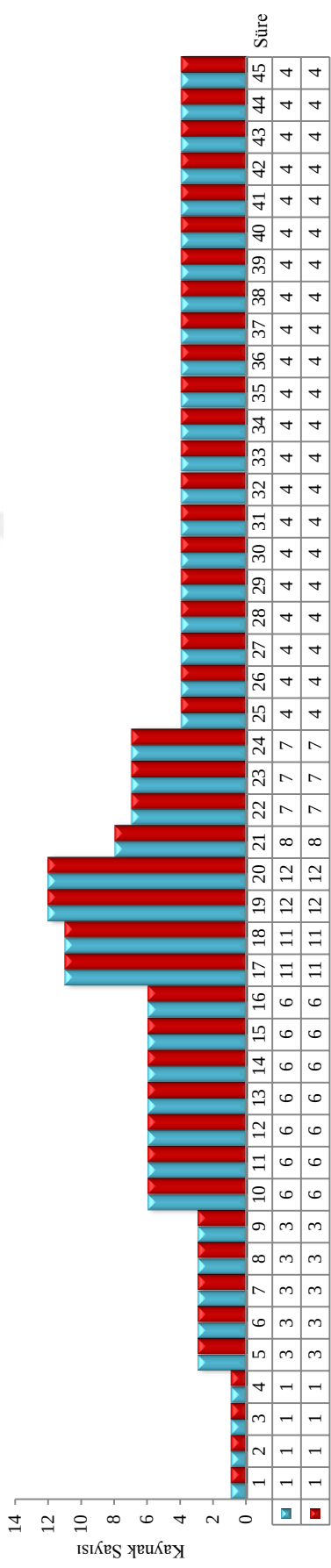
Şekil 5.32. Proje 7 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 14'ten 13'e düşmüştür.

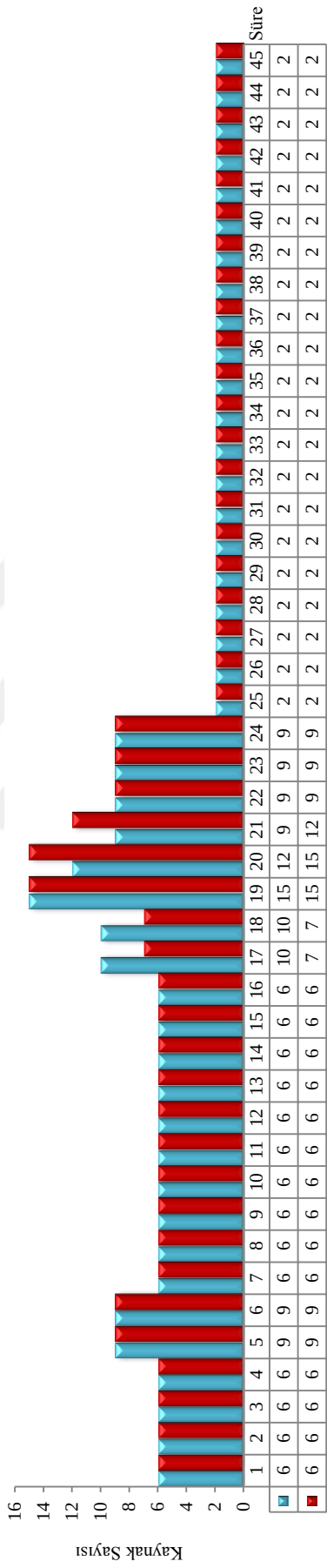


Şekil 5.33. Proje 7 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 12'den 11'e düşmüştür.



Şekil 5.34. Proje 7 kaynak-3 histogramı

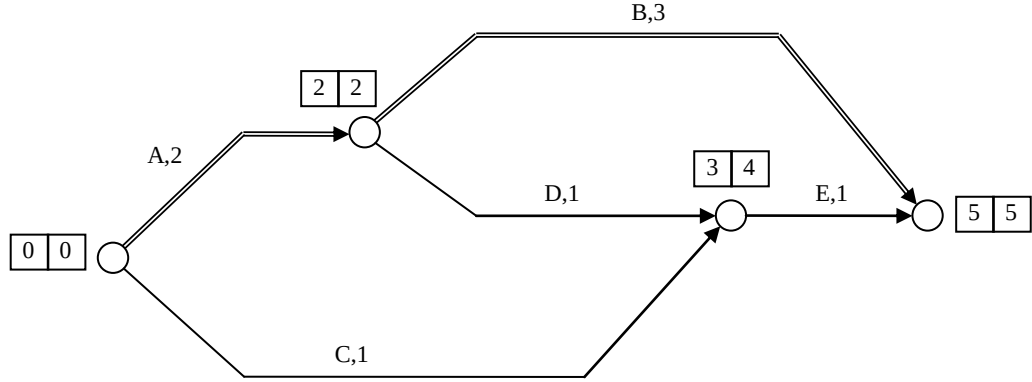


Şekil 5.35. Proje 7 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.

5.8. Proje 8 (Easa, 1989)

5 aktiviteden oluşan proje şekilde verilmiştir.



Şekil 5.36. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.25. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	10	0	0
B	3	A	2	2	5	5	6	0	0
C	1	-	0	0	3	4	2	2	3
D	1	A	2	2	3	4	4	0	1
E	1	C-D	3	4	5	5	2	1	1

Çizelge 5.26. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

E	D	C
0	0	0-1-2
1	0	0-1-2-3
	1	0-1-2-3
K. Sayısı		11

HCU işlemleri:

```

(General) Makro4
Cells(34, "Q").Calculate
gunBas = Cells(31, "Q").Value
saatBas = Cells(32, "Q").Value
dakikaBas = Cells(33, "Q").Value
saniyeBas = Cells(34, "Q").Value
moment = 50000
sayac = 0
For eGecikme = 0 To 1
For dGecikme = 0 To eGecikme
For cGecikme = 0 To 2 + eGecikme
Range("M16").Select

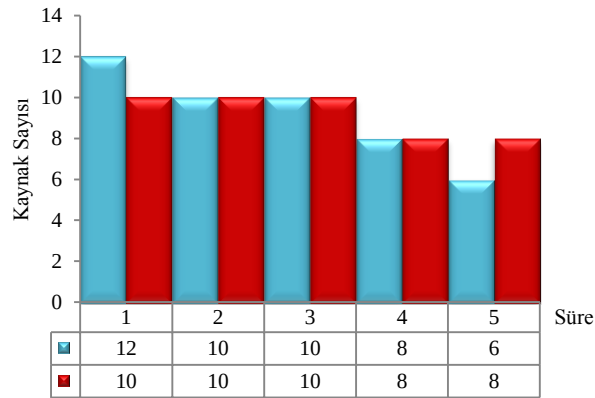
```

Şekil 5.37. Proje 8 makro

Çizelge 5.27. Proje 8 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

C-gecikme	3
D-gecikme	0
E-gecikme	1
Arama uzayı sayısı	11
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	444
Optimum moment değeri	428

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

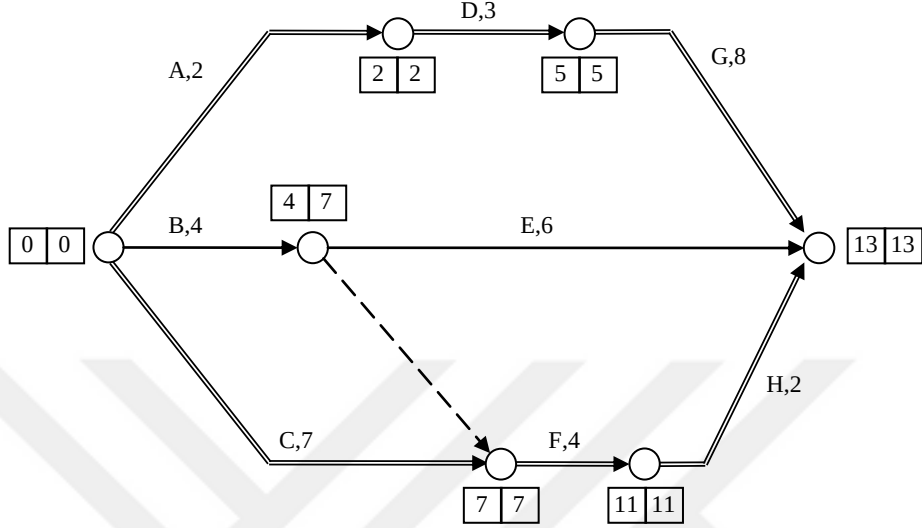


Şekil 5.38. Proje 8 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 12'den 10'a düşmüştür.

5.9. Proje 9 (Qi et al., 2007)

Proje 8 aktiviteden, 2 kritik ve 1 bolluğa sahip hattan oluşmaktadır.



Şekil 5.39. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.28. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	2	0	0
B	4	-	0	0	4	7	4	0	3
C	7	-	0	0	7	7	3	0	0
D	3	A	2	2	5	5	4	0	0
E	6	B	4	7	13	13	2	3	3
F	4	B-C	7	7	11	11	3	0	0
G	8	D	5	5	13	13	3	0	0
H	2	F	11	11	13	13	1	0	0

Çizelge 5.29. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

B	E
0	0-1-2-3
1	1-2-3
2	2-3
3	3
K. Sayısı	10

HCU işlemleri:

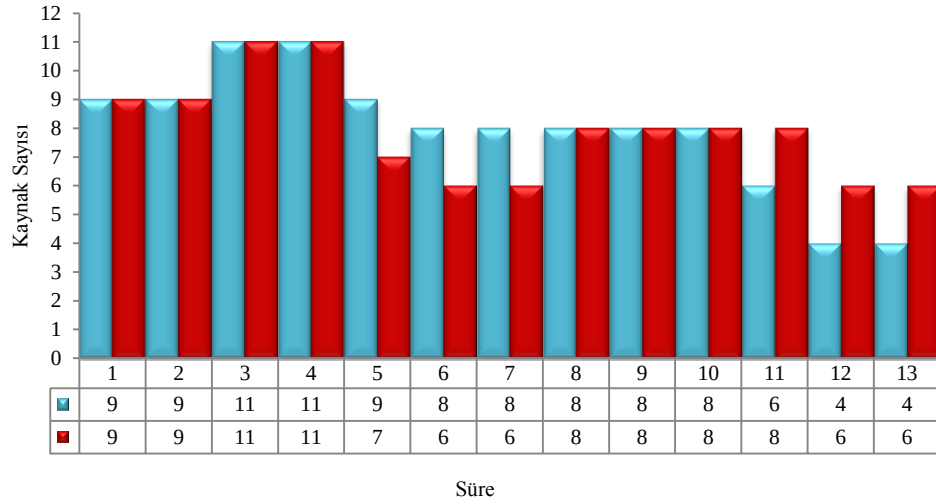
```
(General) Makro1
sayac = 0
For bGecikme = 0 To 3
  For eGecikme = bGecikme To 3
    Range("M14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = bGecikme
```

Şekil 5.40. Proje 9 makro

Çizelge 5.30. Proje 9 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
E-gecikme	3
Arama uzayı sayısı	10
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	873
Optimum moment değeri	853

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

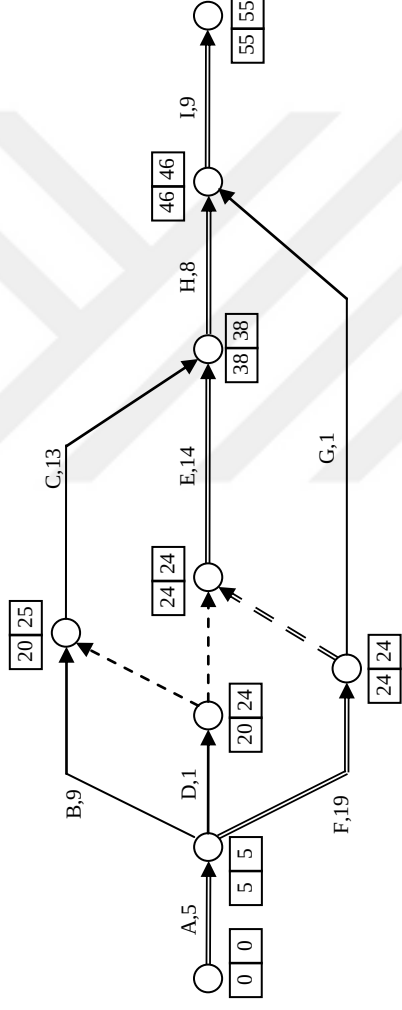


Şekil 5.41. Proje 9 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.

5.10. Proje 10 (Leu et al., 2000)

Proje, 9 aktivite ve bolluk sahibi 2 hattan oluşmaktadır.



Şekil 5.42. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.31. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	5	-	0	0	5	5	5	4	5	0	0
B	9	A	5	5	20	25	4	5	2	6	11
C	13	B-D	20	25	38	38	3	6	5	5	5
D	15	A	5	5	20	24	5	2	4	0	4
E	14	D-F	24	24	38	38	1	5	2	0	0
F	19	A	5	5	24	24	3	1	1	0	0
G	14	F	24	24	46	46	3	2	5	8	8
H	8	C-D	38	38	46	46	6	3	2	0	0
I	9	H-G	46	46	55	55	5	5	5	0	0

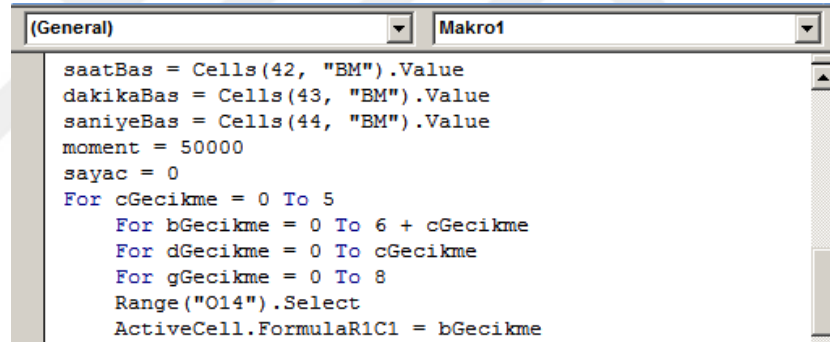
Çizelge 5.32. C-B-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

C	B	D	K. Sayısı
0	$0 \leq B \leq 6$	0	7
1	$0 \leq B \leq 7$	0-1	16
2	$0 \leq B \leq 8$	0-1-2	27
3	$0 \leq B \leq 9$	0-1-2-3	40
4	$0 \leq B \leq 10$	0-1-2-3-4	55
5	$0 \leq B \leq 11$	0-1-2-3-4-5	72
Toplam			217

Çizelge 5.33. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
C-B-D	217
G	9
Toplam	1953

HCU işlemleri:



```

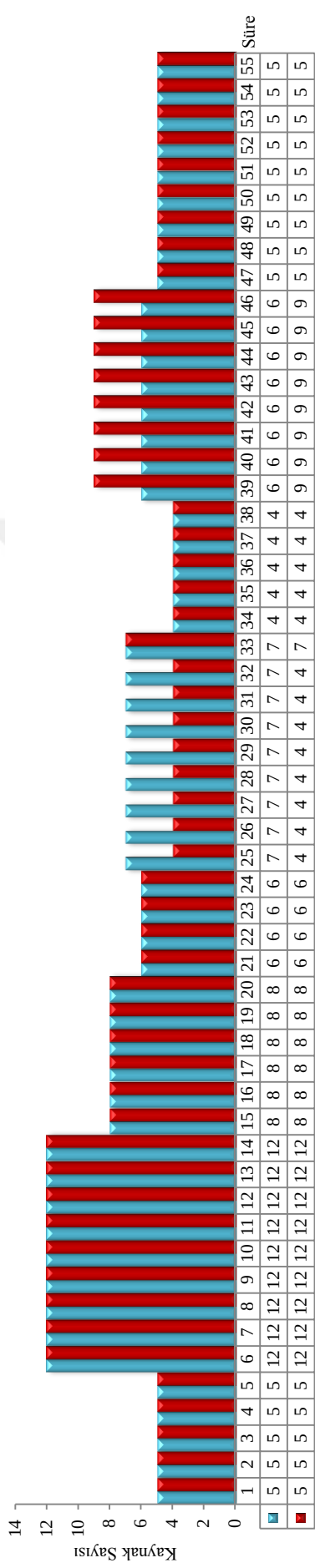
(General) Makro1
saatBas = Cells(42, "BM").Value
dakikaBas = Cells(43, "BM").Value
saniyeBas = Cells(44, "BM").Value
moment = 50000
sayac = 0
For cGecikme = 0 To 5
    For bGecikme = 0 To 6 + cGecikme
        For dGecikme = 0 To cGecikme
            For gGecikme = 0 To 8
                Range("O14").Select
                ActiveCell.FormulaR1C1 = bGecikme
            
```

Şekil 5.43. Proje 10 makro

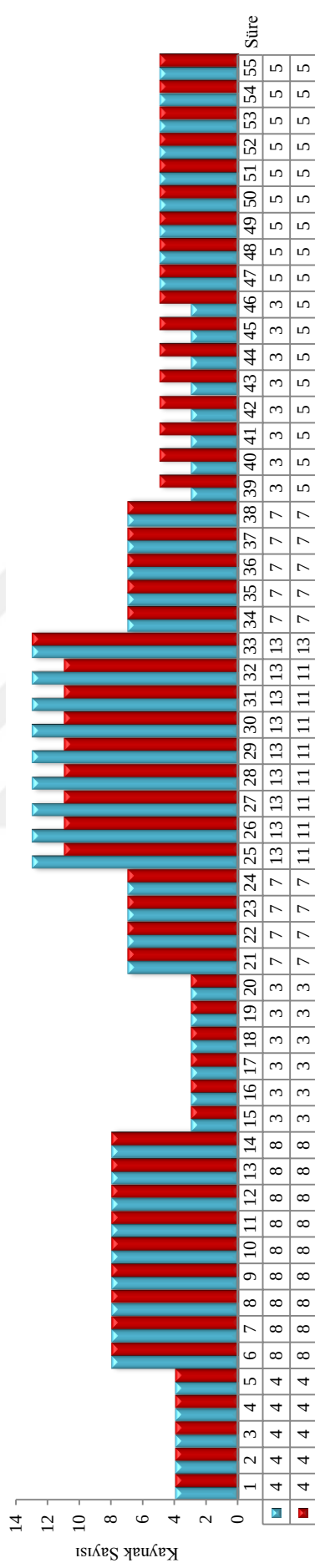
Çizelge 5.34. Proje 10 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
C-gecikme	0
D-gecikme	0
G-gecikme	8
Arama uzayı sayısı	1953
Hesaplama süresi (sn)	12
Başlangıç moment değeri	8610
Makro sonrası moment değeri	8050

Çizelgedeki hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



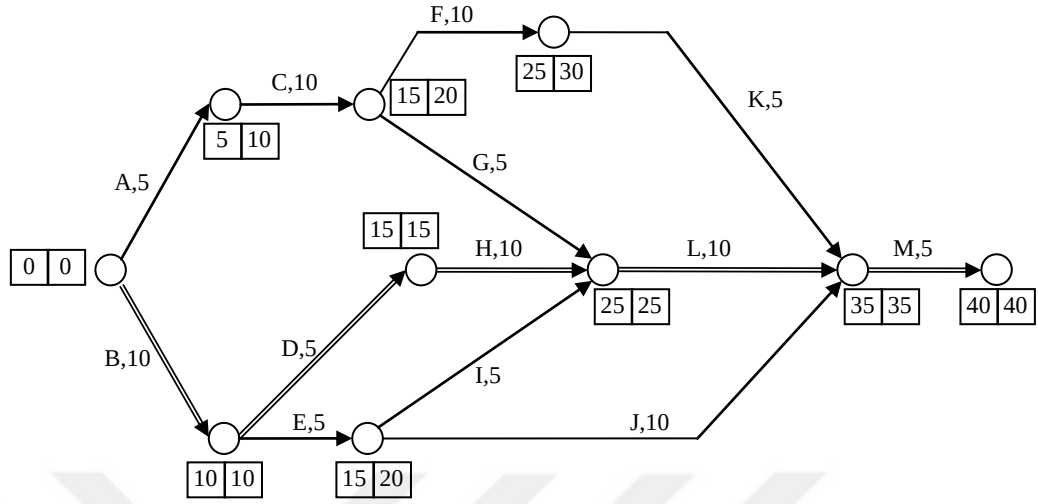
Şekil 5.44. Proje 10 kaynak-1 histogramı



Şekil 5.45. Proje 10 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.

5.11. Proje 11 (Son and Skibniewski, 1999)



Şekil 5.47. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.35. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZi	GOZi	EOZj	GOZj	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	5	-	0	0	5	10	6	0	5
B	10	-	0	0	10	10	3	0	0
C	10	A	5	10	15	20	5	0	5
D	5	B	10	10	15	15	4	0	0
E	5	B	10	10	15	20	6	0	5
F	10	C	15	20	25	30	4	0	5
G	5	C	15	20	25	25	7	5	5
H	10	D	15	15	25	25	0	0	0
I	5	E	15	20	25	25	5	5	5
J	10	E	15	20	35	35	6	10	10
K	5	F	25	30	35	35	8	5	5
L	10	G-H-I	25	25	35	35	8	0	0
M	5	K-L-J	35	35	40	40	9	0	0

Çizelge 5.36. C-F-K-G-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

C	F	K	G	A	K. Sayısı
0	0	$0 \leq K \leq 5$	$0 \leq K \leq 5$	0	36
	1	$1 \leq K \leq 5$			30
	2	$2 \leq K \leq 5$			24
	3	$3 \leq K \leq 5$			18
	4	$4 \leq K \leq 5$			12
	5	$5 \leq K \leq 5$			6
1	1	$1 \leq K \leq 5$	$1 \leq K \leq 5$	0	50
	2	$2 \leq K \leq 5$			40
	3	$3 \leq K \leq 5$			30
	4	$4 \leq K \leq 5$			20
	5	$5 \leq K \leq 5$			10
2	2	$2 \leq K \leq 5$	$2 \leq K \leq 5$	$0 \leq A \leq 2$	48
	3	$3 \leq K \leq 5$			36
	4	$4 \leq K \leq 5$			24
	5	$5 \leq K \leq 5$			12
3	3	$3 \leq K \leq 5$	$3 \leq K \leq 5$	$0 \leq A \leq 3$	36
	4	$4 \leq K \leq 5$			24
	5	$5 \leq K \leq 5$			12
4	4	$4 \leq K \leq 5$	$4 \leq K \leq 5$	$0 \leq A \leq 4$	20
	5	$5 \leq K \leq 5$			10
5	5	$5 \leq K \leq 5$	$5 \leq K \leq 5$	$0 \leq A \leq 5$	6
Toplam					504

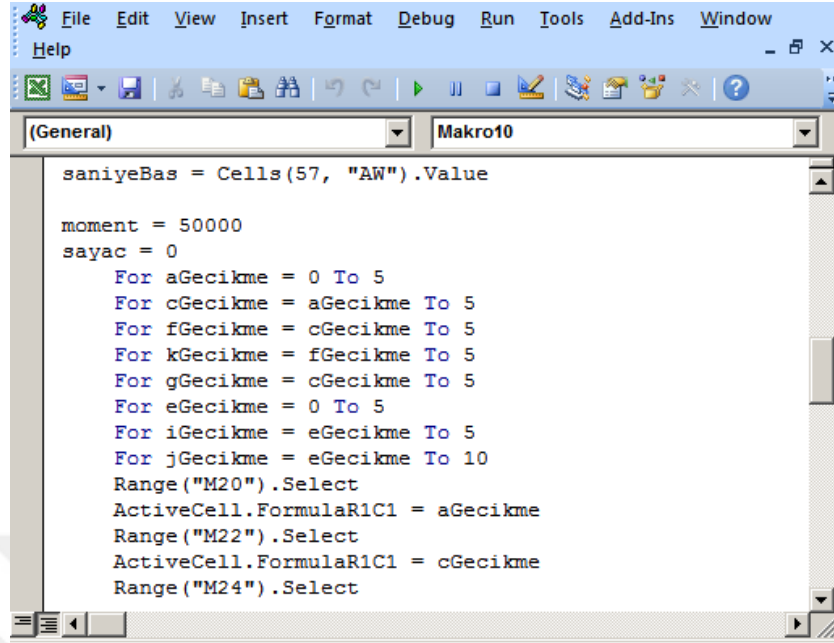
Çizelge 5.37. E-I-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

E	I	J	K. Sayısı
0	$0 \leq I \leq 5$	$0 \leq J \leq 10$	66
1	$1 \leq I \leq 5$	$1 \leq J \leq 10$	50
2	$2 \leq I \leq 5$	$2 \leq J \leq 10$	36
3	$3 \leq I \leq 5$	$3 \leq J \leq 10$	24
4	$4 \leq I \leq 5$	$4 \leq J \leq 10$	14
5	$5 \leq I \leq 5$	$5 \leq J \leq 10$	6
Toplam			196

Çizelge 5.38. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
C-F-K-G-A	504
E-I-J	196
Toplam	98784

HCU işlemleri:

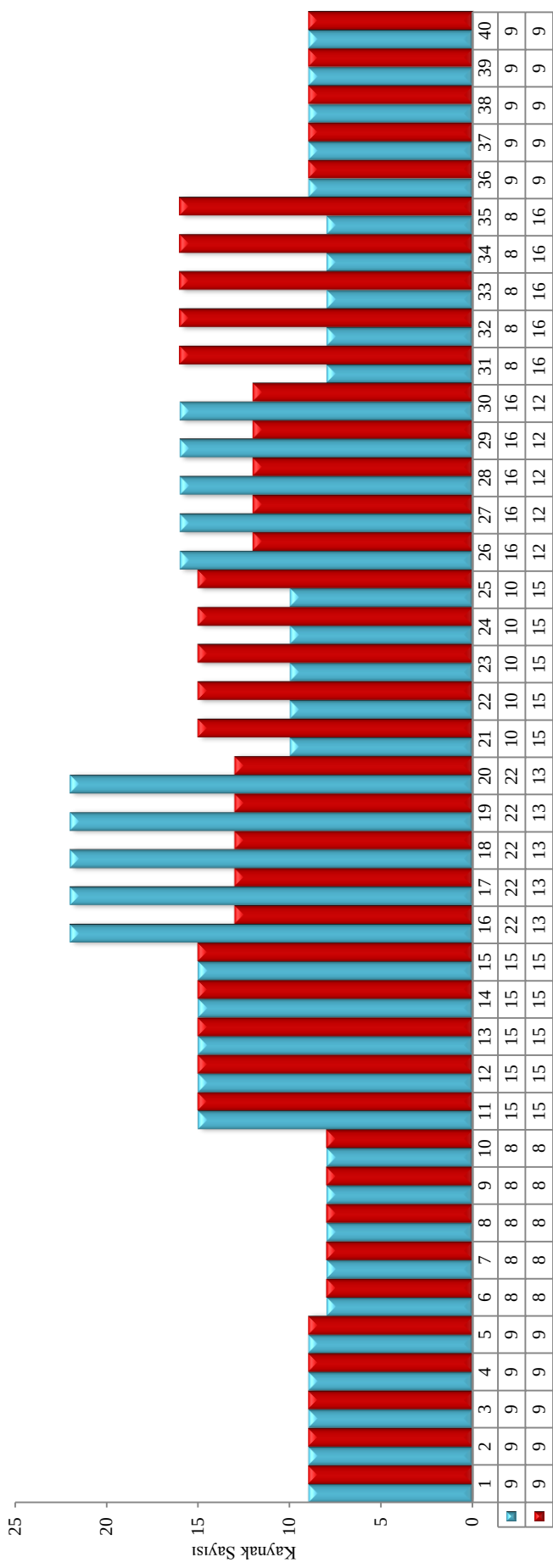


Şekil 5.48. Proje 11 makro

Çizelge 5.39. Proje 11 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

A-gecikme	0
C-gecikme	0
E-gecikme	0
F-gecikme	5
G-gecikme	0
I-gecikme	5
J-gecikme	0
K-gecikme	5
Arama uzayı sayısı	98784
Hesaplama süresi (sn)	843
Başlangıç moment değeri	6775
Optimum moment değeri	6225

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

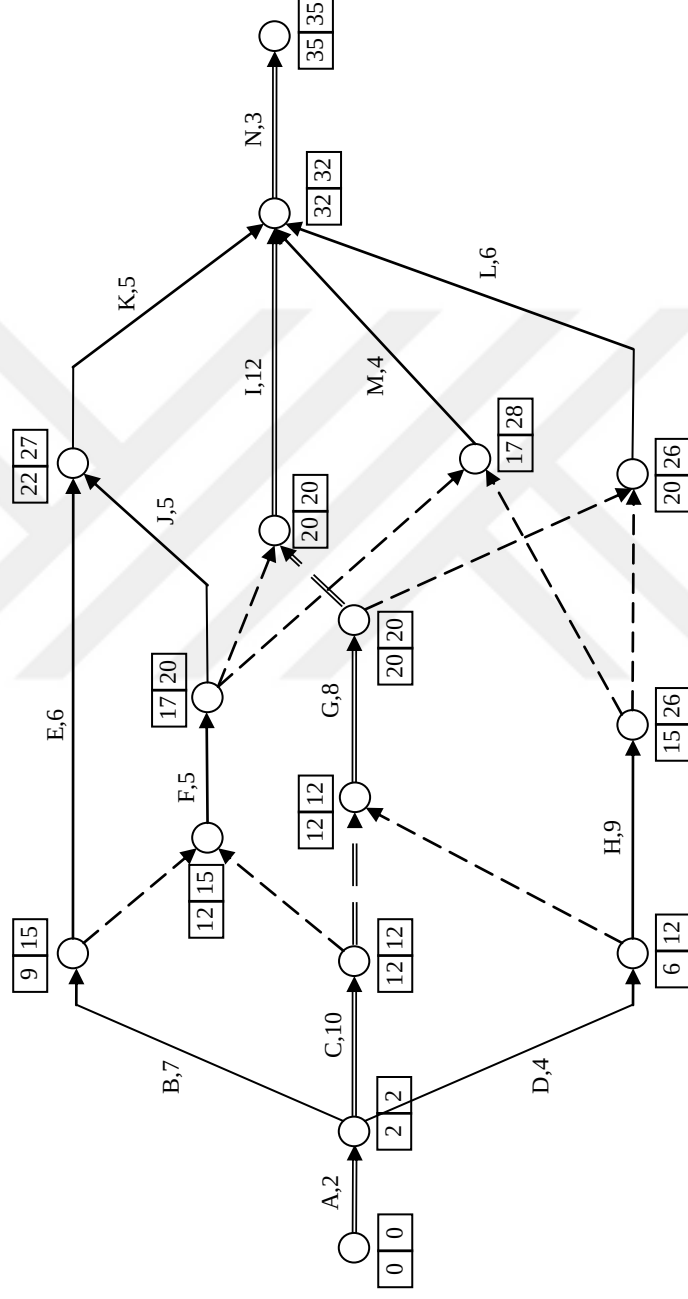


Süre

Şekil 5.49. Proje 11 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 22'den 16'ya düşmüştür.

5.12. Proje 12 (Mubarak, 2010)



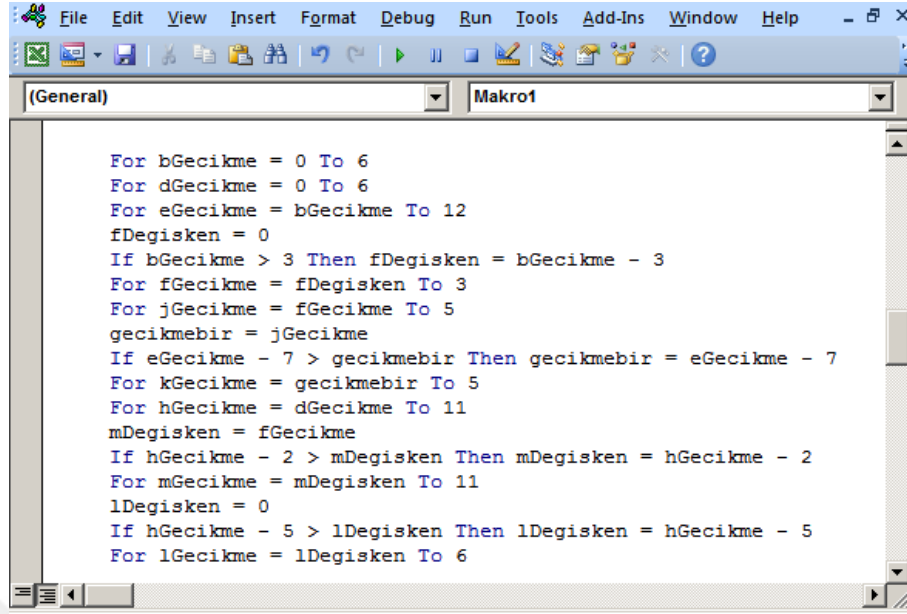
Şekil 5.50. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.40. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	2	5	6	3	0	0
B	7	A	2	2	9	15	0	3	2	4	0	6
C	10	A	2	2	12	12	3	1	6	2	0	0
D	4	A	2	2	6	12	0	4	0	2	0	6
E	6	B	9	15	22	27	2	1	2	3	7	12
F	5	B-C	12	15	17	20	1	5	6	6	0	3
G	8	C-D	12	12	20	20	4	4	2	4	0	0
H	9	D	6	12	15	26	3	3	6	3	0	11
I	12	F-G	20	20	32	32	6	6	6	5	0	0
J	5	F	17	20	22	27	0	0	0	0	0	5
K	5	E-J	22	27	32	32	5	5	3	0	5	5
L	6	G-H	20	26	32	32	5	5	4	5	6	6
M	4	F-H	17	28	32	32	1	1	3	6	11	11
N	3	I-K-L-M	32	32	35	35	4	4	4	5	0	0

Bu projede olduğu gibi birbirine bağımlı bolluk sahibi aktivitelerin sayısının fazla olması, projenin elle arama uzayı hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. El ile hesabın makul olmadığı projelerde arama uzayı sayısı HCU yardımı ile belirlenmiştir.

HCU işlemleri:

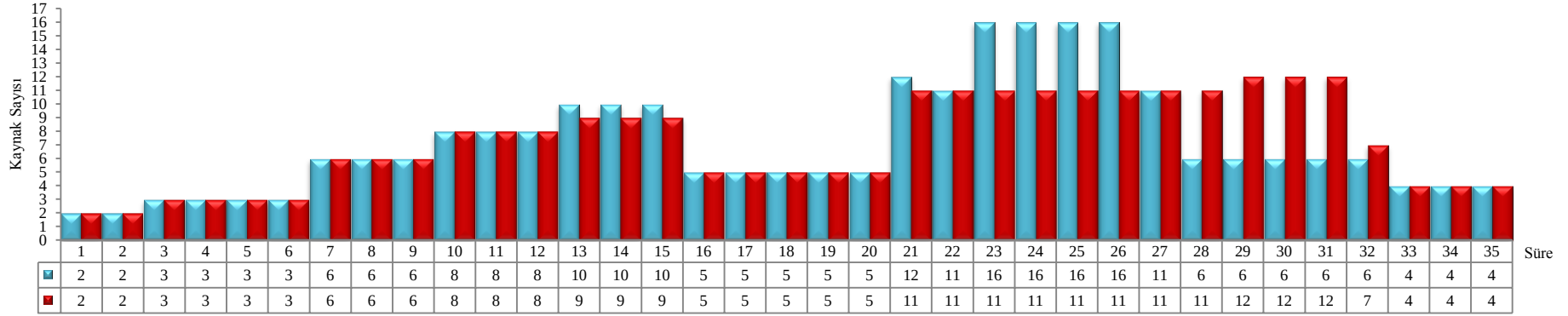


Şekil 5.51. Proje 12 makro

Çizelge 5.41. Proje 12 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

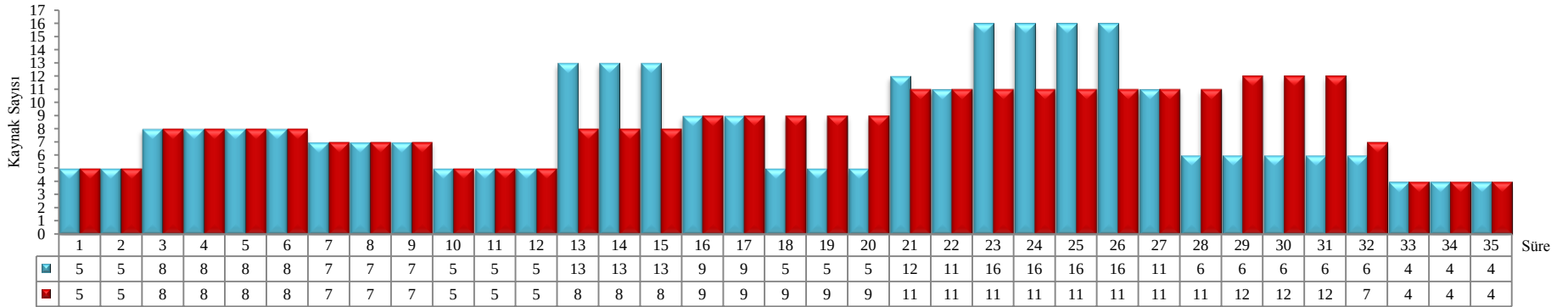
B-gecikme	0
D-gecikme	0
E-gecikme	0
F-gecikme	3
H-gecikme	0
J-gecikme	3
K-gecikme	4
L-gecikme	0
M-gecikme	11
Arama uzayı sayısı	6.030.269
Hesaplama süresi (saat)	46,63
Başlangıç moment değeri	12004
Optimum moment değeri	10996

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



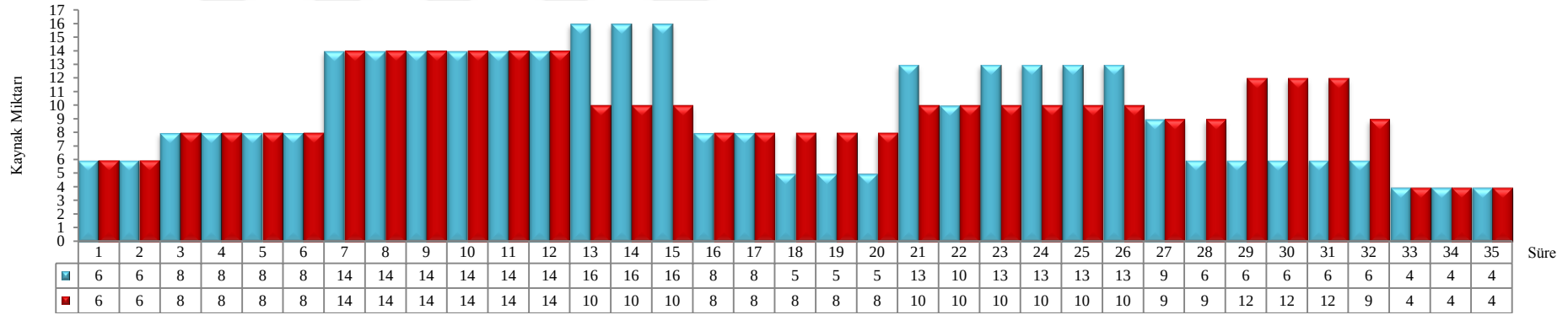
Şekil 5.52. Proje 12 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 12'ye düşmüştür.



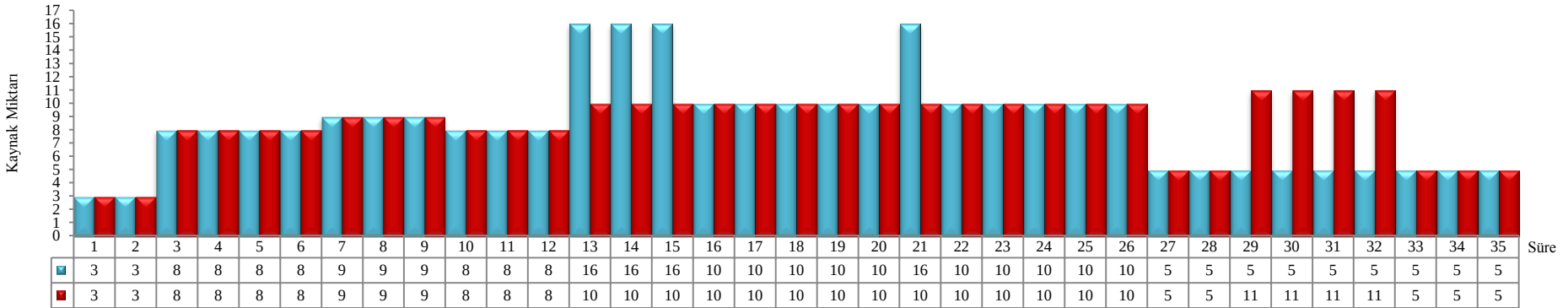
Şekil 5.53. Proje 12 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 12'ye düşmüştür.



Şekil 5.54. Proje 12 kaynak-3 histogramı

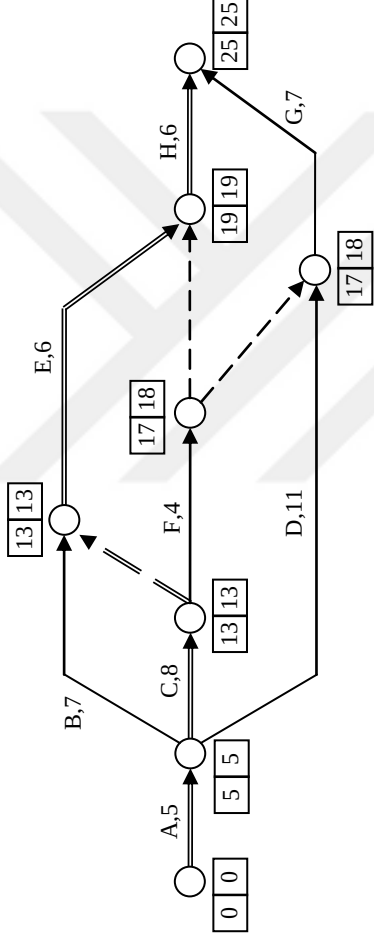
Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 14'e düşmüştür.



Şekil 5.55. Proje 12 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 11'e düşmüştür.

5.13. Proje 13 (Mubarak, 2010)



Şekil 5.56. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.42. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZi	GOZi	EOZj	GOZj	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	5	-	0	0	5	5	1	3	1	1	0	0
B	7	A	5	5	13	13	2	1	4	5	1	1
C	8	A	5	5	13	13	4	0	5	5	0	0
D	11	A	5	5	17	18	5	2	3	0	1	2
E	6	B-C	13	13	19	19	6	3	3	4	0	0
F	4	C	13	13	17	18	1	6	1	6	0	1
G	7	D-F	17	18	25	25	4	2	2	6	1	1
H	6	E-F	19	19	25	25	0	3	6	0	0	0

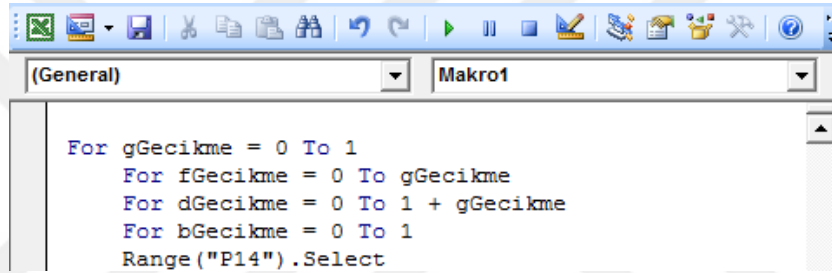
Çizelge 5.43. G-F-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

G	F	D	K. Sayısı
0	0	0-1	2
1	0-1	0-1-2	6
Toplam			8

Çizelge 5.44. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
G-F-D	8
B	2
Toplam	16

HCU işlemleri:

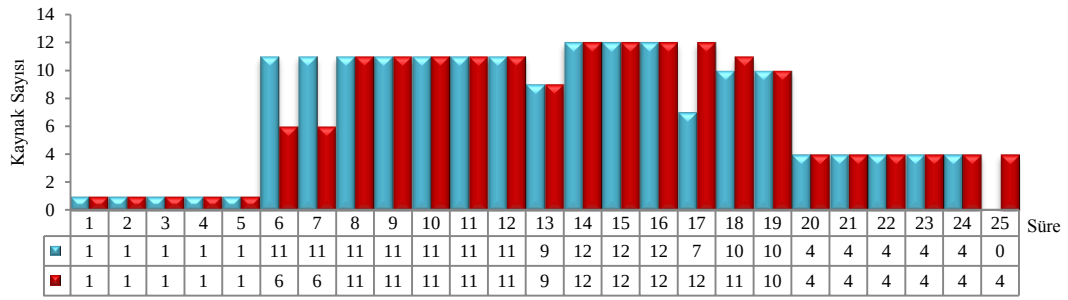


Şekil 5.57. Proje 13 makro

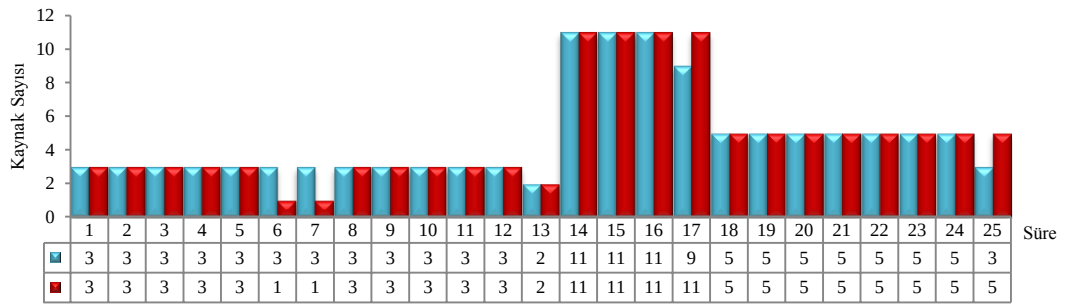
Çizelge 5.45. Proje 13 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
D-gecikme	2
F-gecikme	0
G-gecikme	1
Arama uzayı sayısı	16
Hesaplama süresi (sn)	0
Başlangıç moment değeri	4850
Optimum moment değeri	4710

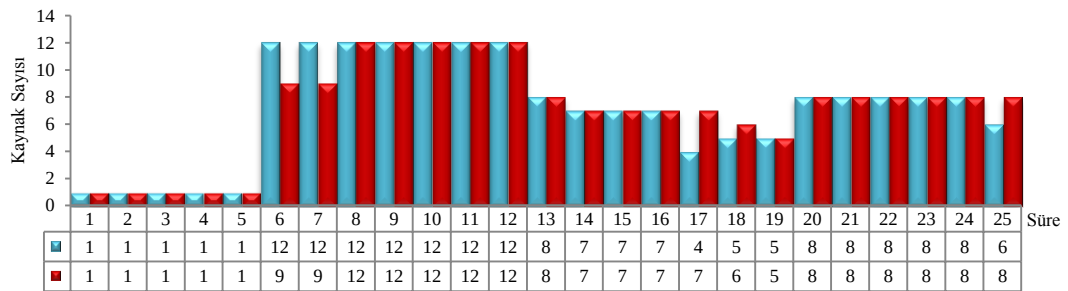
Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



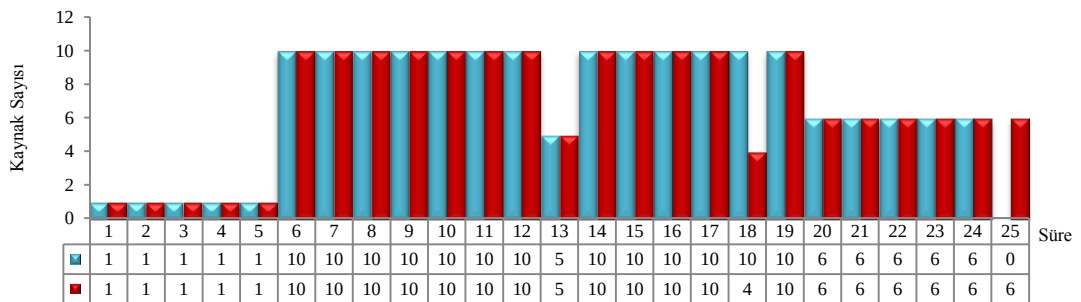
Şekil 5.58. Proje 13 kaynak-1 histogramı



Şekil 5.59. Proje 13 kaynak-2 histogramı



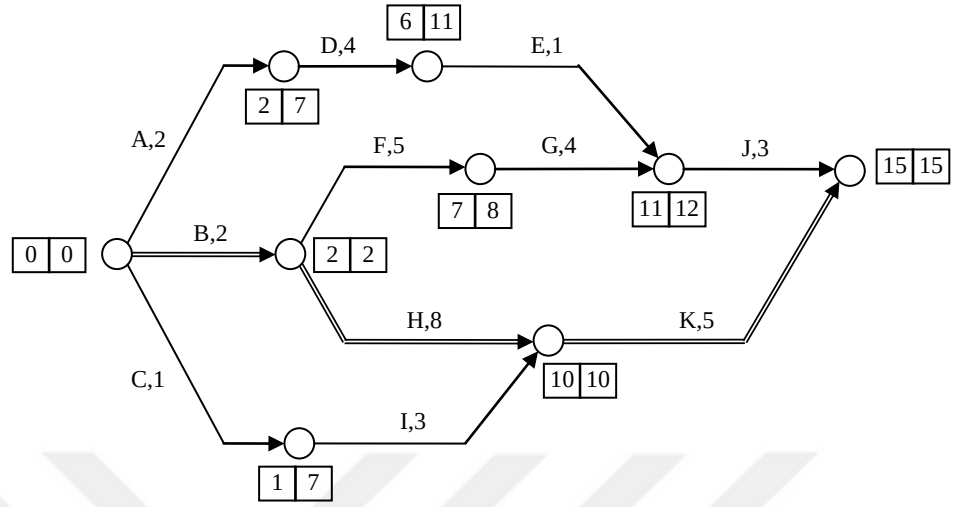
Şekil 5.60. Proje 13 kaynak-3 histogramı



Şekil 5.61. Proje 13 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.

5.14. Proje 14 (Akpan, 2000)



Şekil 5.62. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.46. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	K1	K2	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	7	3	0	0	5
B	2	-	0	0	2	2	6	0	0	0
C	1	-	0	0	1	7	3	0	0	6
D	4	A	2	7	6	11	0	2	0	5
E	1	D	6	11	11	12	4	0	4	5
F	5	B	2	2	7	8	0	2	0	1
G	4	F	7	8	11	12	2	0	0	1
H	8	B	2	2	10	10	4	4	0	0
I	3	C	1	7	10	10	5	0	6	6
J	3	E-G	11	12	15	15	0	5	1	1
K	5	H-I	10	10	15	15	2	0	0	0

Çizelge 5.47. J-F-G-E-D-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

J	F	G	E	D	A	K. Sayısı
0	0	0	0	0	0	1
			1	0	0	
				1	0-1	3
			2	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	6
			3	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	
				3	0-1-2-3	10
			4	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	
				3	0-1-2-3	
				4	0-1-2-3-4	15
1	0	0-1	0	0	0	3
	1	1	1	0	0	
				1	0-1	9
			2	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	18
			3	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	
				3	0-1-2-3	30
			4	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	
				3	0-1-2-3	
				4	0-1-2-3-4	45
			5	0	0	
				1	0-1	
				2	0-1-2	
				3	0-1-2-3	
				4	0-1-2-3-4	
				5	0-1-2-3-4-5	63
Toplam						203

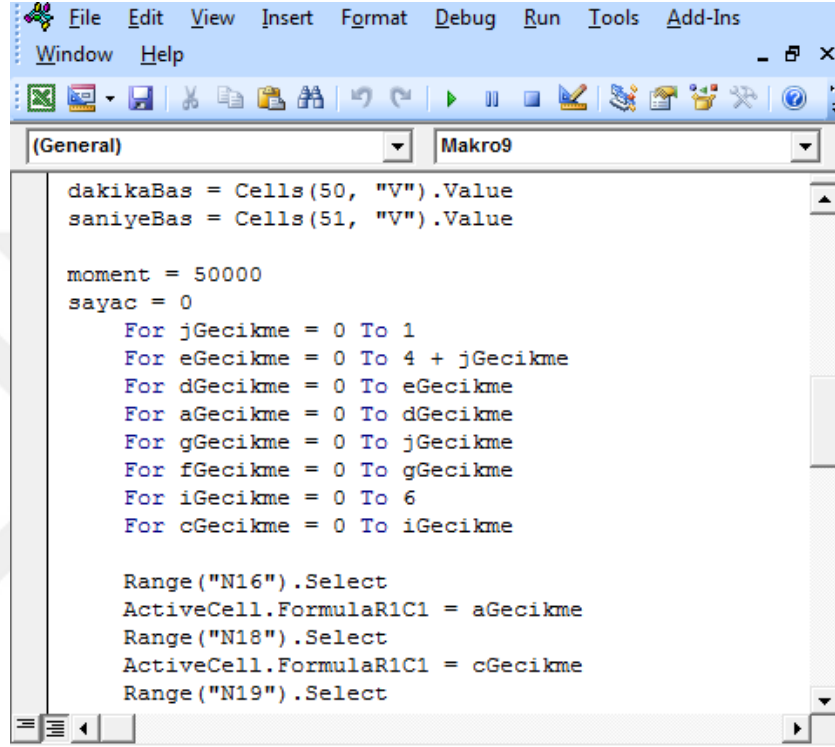
Çizelge 5.48. C-I hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

C	I	K. Sayısı
0	$0 \leq I \leq 6$	7
1	$1 \leq I \leq 6$	6
2	$2 \leq I \leq 6$	5
3	$3 \leq I \leq 6$	4
4	$4 \leq I \leq 6$	3
5	$5 \leq I \leq 6$	2
6	$6 \leq I \leq 6$	1
Toplam		28

Çizelge 5.49. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
J-F-G-E-D-A	203
C-I	28
Toplam	5684

HCU işlemleri:

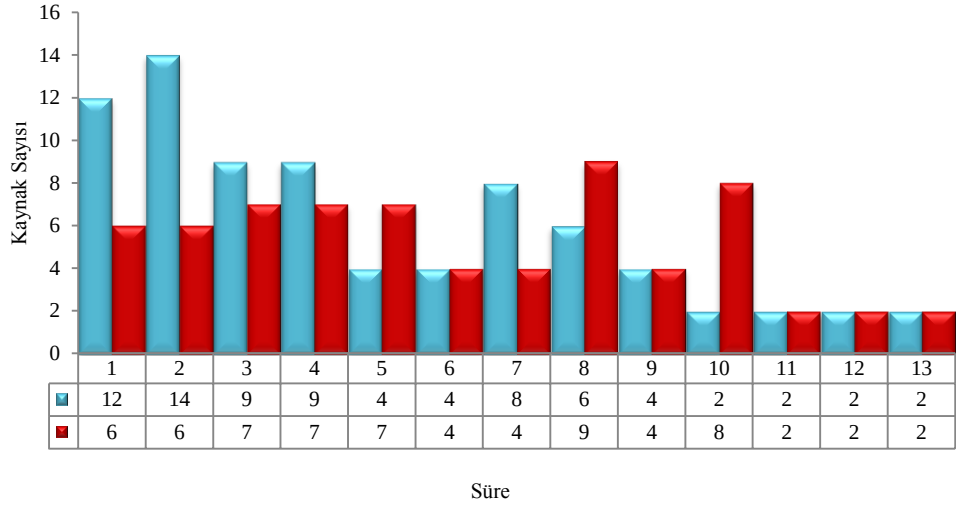


Şekil 5.63. Proje 14 makro

Çizelge 5.50. Proje 14 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

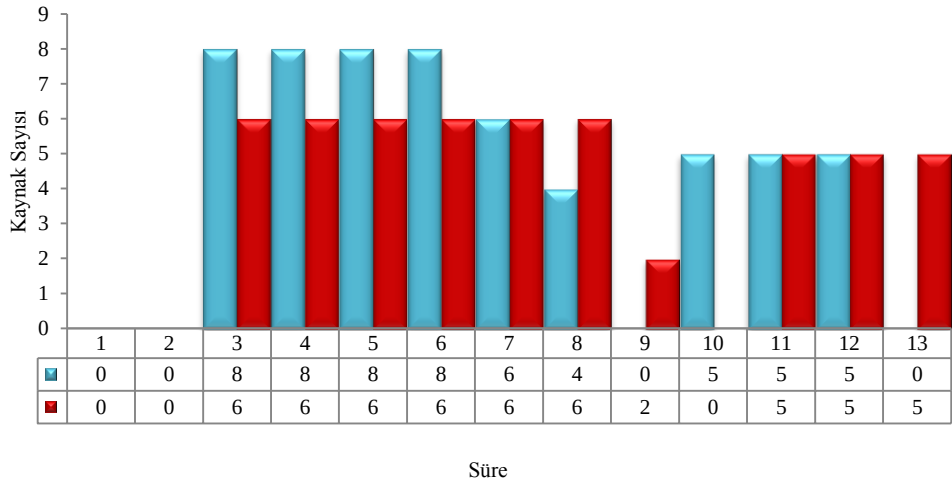
A-gecikme	2
C-gecikme	4
D-gecikme	5
E-gecikme	5
F-gecikme	0
G-gecikme	1
I-gecikme	6
J-gecikme	1
Arama uzayı sayısı	5684
Hesaplama süresi (sn)	47
Başlangıç moment değeri	1049
Optimum moment değeri	719

Hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



Şekil 5.64. Proje 14 kaynak-1 histogramı

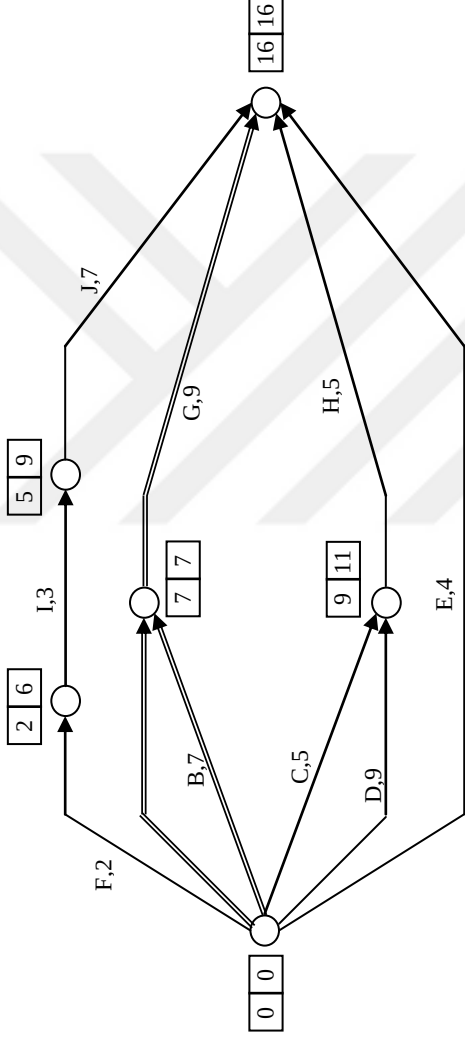
Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 14'ten 9'a düşmüştür.



Şekil 5.65. Proje 14 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 8'den 6'ya düşmüştür.

5.15. Proje 15 (Demeulemeester and Herroelen, 2002)



Şekil 5.66. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.51. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	7	-	0	0	7	7	7	4	4	0	0	0
B	7	-	0	0	7	7	4	4	3	1	0	0
C	5	-	0	0	9	11	2	0	6	3	4	6
D	9	-	0	0	9	11	3	1	1	0	0	2
E	4	-	0	0	16	16	5	4	5	6	12	12
F	2	-	0	0	2	6	4	6	2	5	0	4
G	9	A-B	7	7	16	16	2	3	6	3	0	0
H	5	C-D	9	11	16	16	5	0	2	5	2	2
I	3	F	2	6	5	9	3	5	2	0	0	4
J	7	I	5	9	16	16	6	6	5	0	4	4

Çizelge 5.52. F-I-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

F	I	J	K. Sayısı
0	0	0-1-2-3-4	
	1	1-2-3-4	
	2	2-3-4	
	3	3-4	
	4	4	$5*6/2=15$
1	1	1-2-3-4	
	2	2-3-4	
	3	3-4	
	4	4	$4*5/2=10$
2	2	2-3-4	
	3	3-4	
	4	4	$3*4/2=6$
3	3	3-4	
	4	4	3
4	4	4	1
Toplam			35

Çizelge 5.53. H-C-D hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

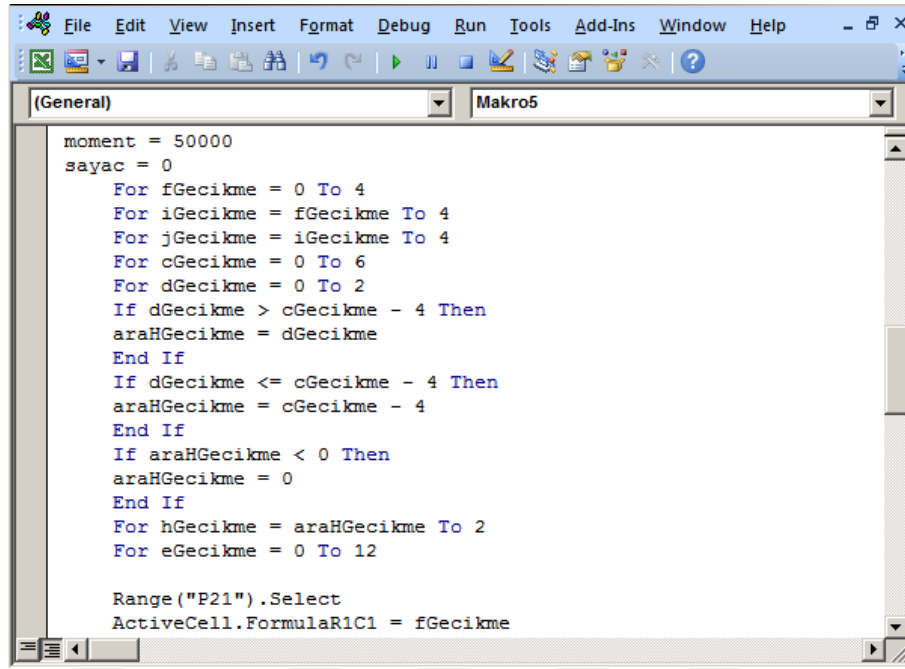
H	C	D	K. Sayısı
0	$0 \leq C \leq 4$	0	$5*1=5$
1	$0 \leq C \leq 5$	0-1	$6*2=12$
2	$0 \leq C \leq 6$	0-1-2	$7*3=21$
Toplam			38

Çizelge 5.54. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
F-I-J	35
H-C-D	38
E	13
Toplam	$=35*22*13=17290$

Kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları Çizelge 5.54'te verilmiştir. F-I-J, H-C-D ve E aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 17290 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:

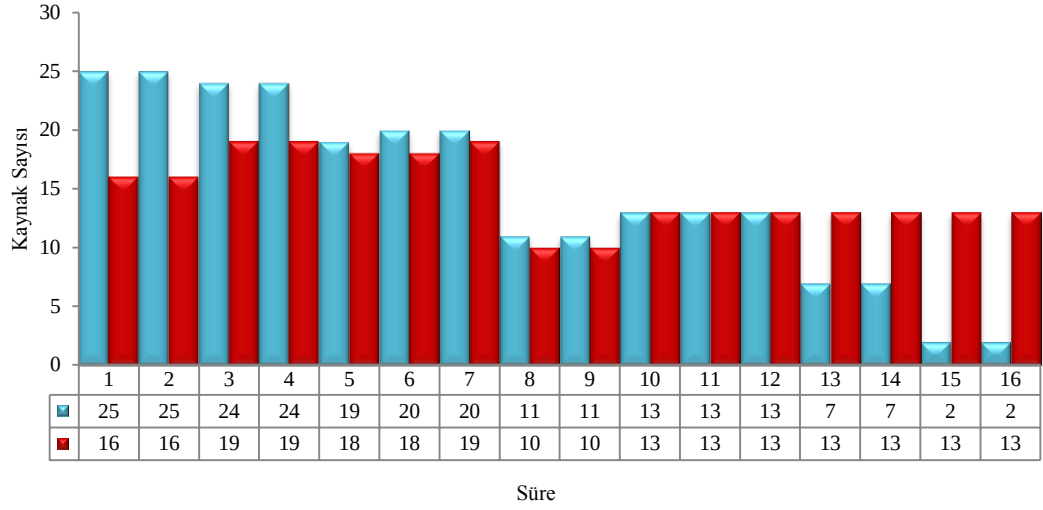


Şekil 5.67. Proje 15 makro

Çizelge 5.55. Proje 15 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

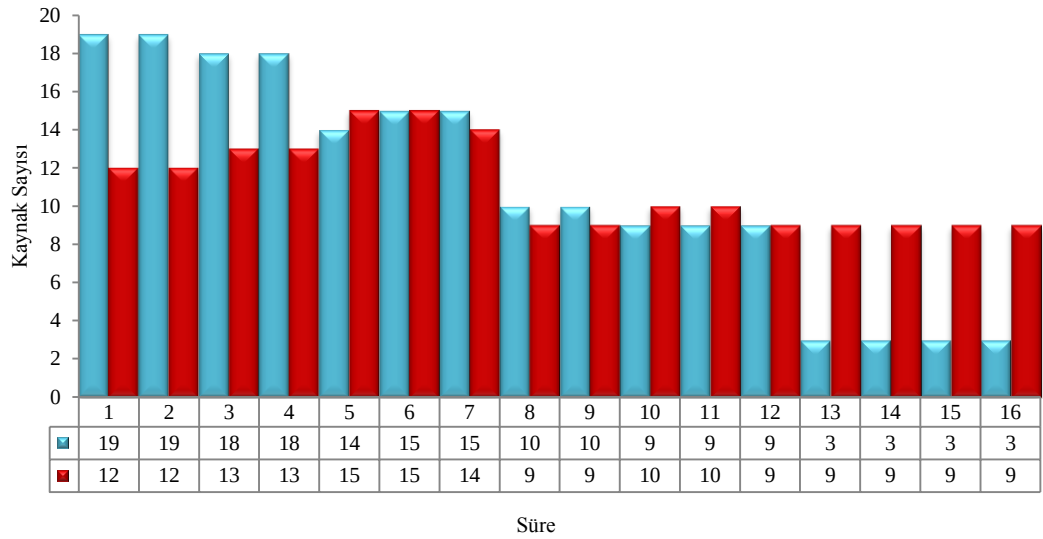
F-gecikme	4
I-gecikme	4
J-gecikme	4
H-gecikme	2
C-gecikme	6
D-gecikme	2
E-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	17290
Hesaplama süresi (sn)	575
Başlangıç moment değeri	11290
Optimum moment değeri	9438

Arama uzayı sayısı 17290 olan bir projeyi 9,58 dakikada, F aktivitesini 4 gün, I aktivitesini 4 gün, J aktivitesini 4 gün, H aktivitesini 2 gün, C aktivitesini 6 gün, D aktivitesini 2 gün ve E aktivitesini 0 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



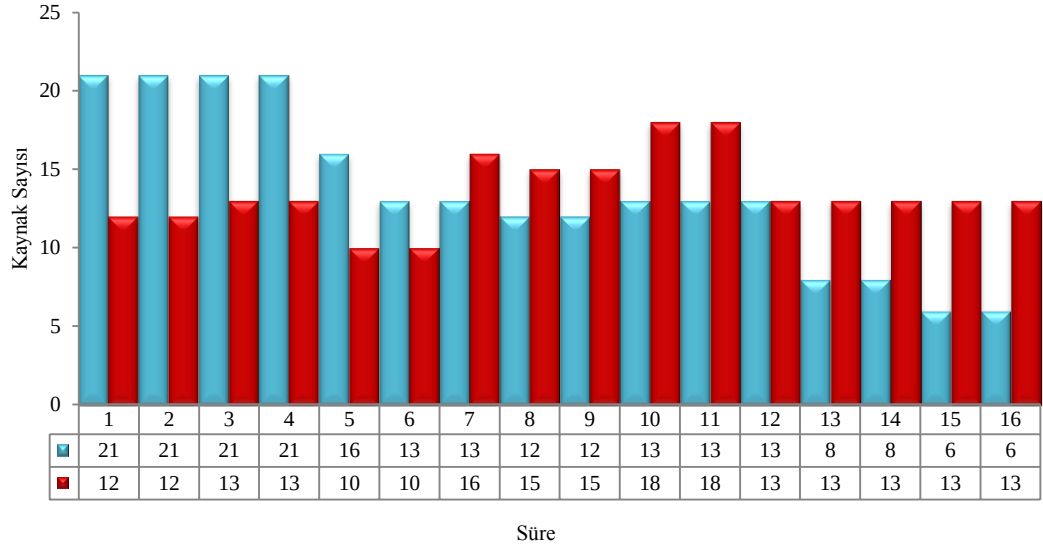
Şekil 5.68. Proje 15 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 25'ten 19'e düşmüştür.



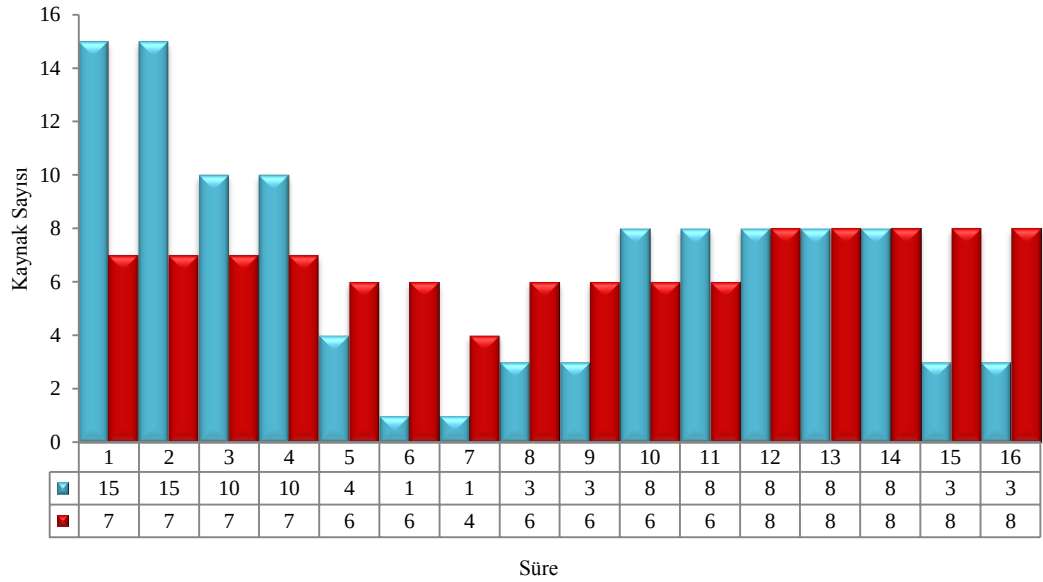
Şekil 5.69. Proje 15 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 19'dan 15'e düşmüştür.



Şekil 5.70. Proje 15 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 21'den 18'e düşmüştür.

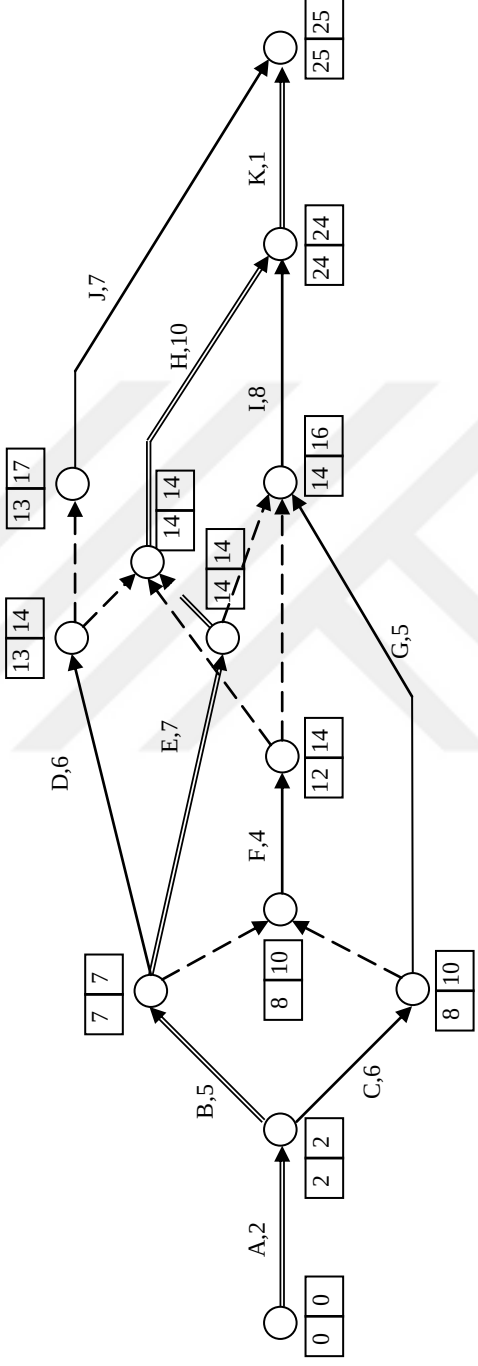


Şekil 5.71. Proje 15 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 15'ten 8'e düşmüştür.

5.16. Proje 16 (Mubarak, 2010)

11 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak Şekil 5.72'de verildiği gibi çizildi. Diyagram A-B-E-H-K kritik ve I-F-G-C, D-J kritik olmayan hatlardan oluşmaktadır.



Şekil 5.72. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.56. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	2	4	6	2	0	0
B	5	A	2	2	7	7	5	4	3	3	0	0
C	6	A	2	2	8	10	0	2	4	1	0	2
D	6	B	7	7	13	14	1	1	6	6	0	1
E	7	B	7	7	14	14	5	2	5	0	0	0
F	4	B-C	8	10	12	14	3	2	4	5	0	2
G	5	C	8	11	14	16	2	6	2	2	1	3
H	10	D-E-F	14	14	24	24	5	5	5	1	0	0
I	8	E-F-G	14	16	24	24	5	0	5	3	2	2
J	7	D	13	17	24	24	0	1	1	1	4	4
K	1	H-I-J	24	24	25	25	3	4	6	6	0	0

Çizelge 5.57. I-F-G-C hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

I	F	G	C	K. Sayısı
0	0-1-2	0	0	3*3=9
1	0-1-2-3	0	0	4*6=24
2	0-1-2-3-4	0	0	
		1	0-1	
		2	0-1-2	
		3	0-1-2-3	5*10=50
Toplam				83

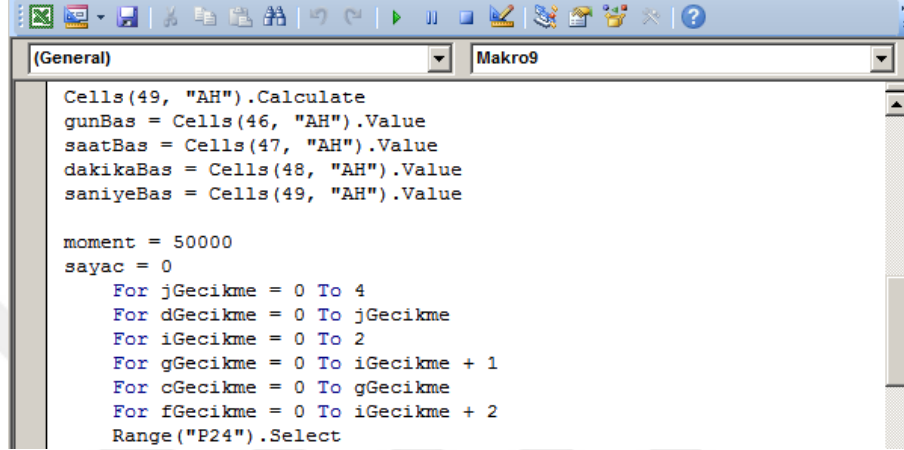
Çizelge 5.58. D-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

J	D	K. Sayısı
0	0	
1	0-1	
2	0-1-2	
3	0-1-2-3	
4	0-1-2-3-4	
Toplam		=5*6/2=15

Çizelge 5.59. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	Kombinasyon Sayısı
I-F-G-C	83
D-J	15
Toplam	=83*15=1245

HCU işlemleri:

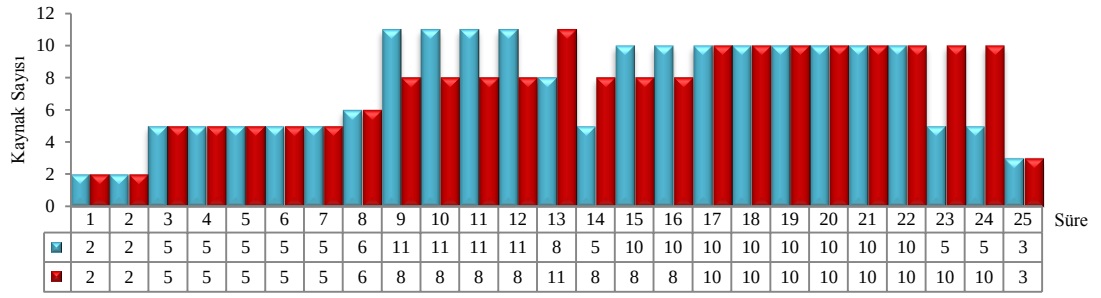


Şekil 5.73. Proje 16 makro

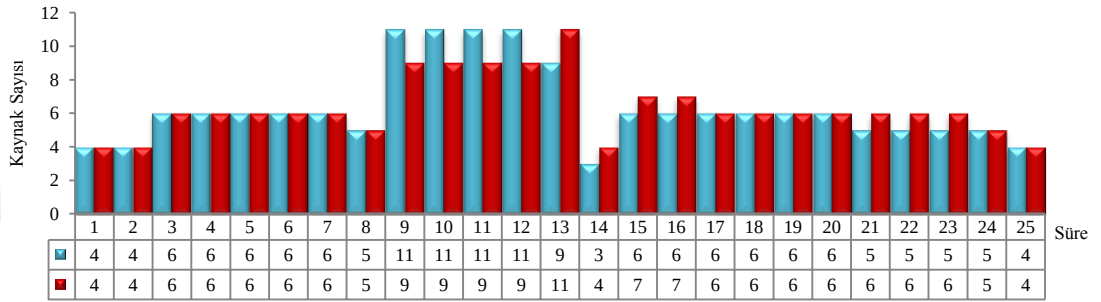
Çizelge 5.60. Proje 16 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

I-gecikme	2
F-gecikme	4
G-gecikme	0
C-gecikme	0
J-gecikme	3
D-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	1245
Hesaplama süresi (sn)	33
Başlangıç moment değeri	6757
Optimum moment değeri	6255

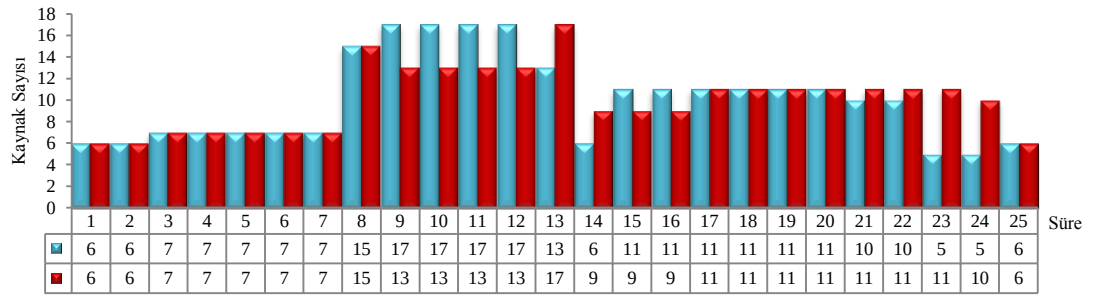
Arama uzayı sayısı 1245 olan projeyi 33 saniyede, I aktivitesini 2 gün, F aktivitesini 4 gün, G aktivitesini 0 gün, C aktivitesini 0 gün, J aktivitesini 3 gün ve D aktivitesini 0 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



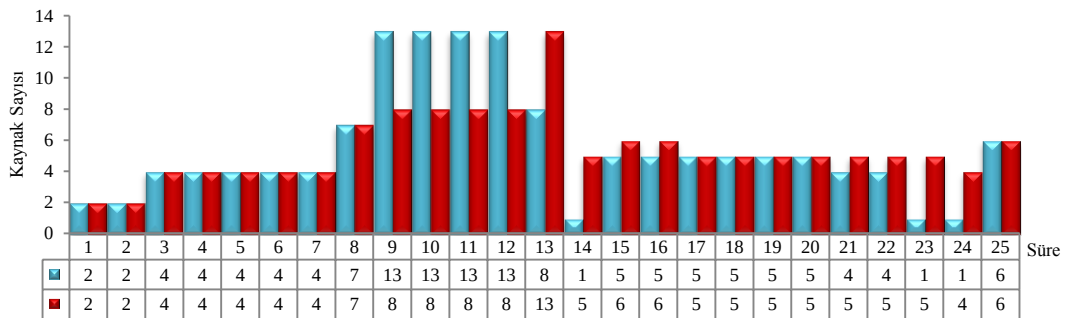
Şekil 5.74. Proje 16 kaynak-1 histogramı



Şekil 5.75. Proje 16 kaynak-2 histogramı



Şekil 5.76. Proje 16 kaynak-3 histogramı

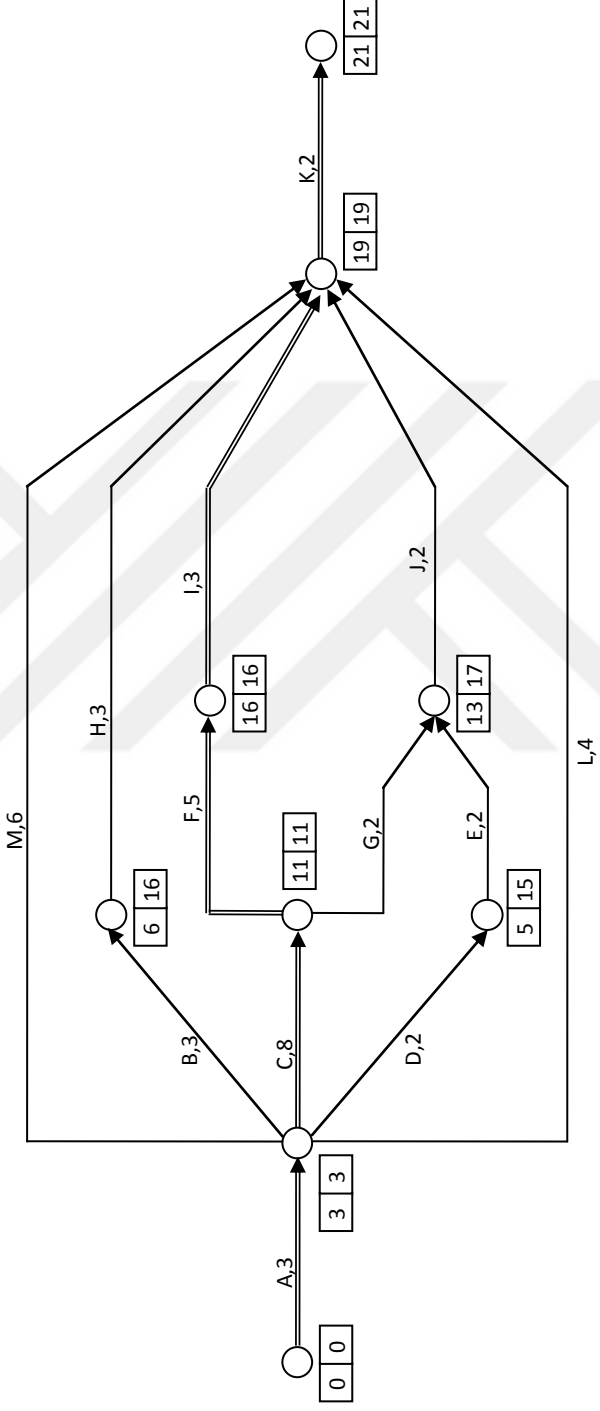


Şekil 5.77. Proje 16 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmedi fakat en fazla kaynak kullanılan gün sayısı azalmıştır.

5.17. Proje 17 (Leu et al., 2000)

Proje 13 aktiviteden oluşmakta ve şebekenin ok diyagramı Şekil 5.78'de sunulduğu gibi kritik olmayan 4 ve kritik 1 hattan oluşmaktadır.



Şekil 5.78. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.61. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	3	-	0	0	3	3	15	0	0
B	3	A	3	3	6	16	6	0	10
C	8	A	3	3	11	11	12	0	0
D	2	A	3	3	5	15	10	0	10
E	2	D	5	15	13	17	10	6	10
F	5	C	11	11	16	16	12	0	0
G	2	C	11	11	13	17	6	0	4
H	3	B	6	16	19	19	7	10	10
I	3	F	16	16	19	19	14	0	0
J	2	E-G	13	17	19	19	8	4	4
K	2	H-I-J-L-M	19	19	21	21	10	0	0
L	4	A	3	3	19	19	15	12	12
M	6	A	3	3	19	19	10	10	10

Çizelge 5.61'de görüldüğü gibi E aktivitesinin 6, H aktivitesinin 10, J aktivitesinin 4, L aktivitesinin 12, M aktivitesinin 10 gün serbest bolluğu bulunmaktadır. Bolluklar göz önünde bulundurularak yapılan dengeleme işleminde kritik olmayan bağımlı B-H ve J-D-E-G hatları ile bağımsız M ve L hatlarının kombinasyonları hesaplanmıştır.

Çizelge 5.62. B-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

B	H
0	$0 \leq E \leq 10$
1	$1 \leq E \leq 10$
2	$2 \leq E \leq 10$
3	$3 \leq E \leq 10$
4	$4 \leq E \leq 10$
5	$5 \leq E \leq 10$
6	$6 \leq E \leq 10$
7	$7 \leq E \leq 10$
8	$8 \leq E \leq 10$
9	$9 \leq E \leq 10$
10	$10 \leq E \leq 10$
K. Sayısı	$=11*12/2=66$

Çizelgede hesaplandığı gibi B aktivitesinin 0 gün ertelenmesi durumunda H aktivitesi 0-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10 güne kadar ertelenebilir. B aktivitesinin ertelenme miktarının artması durumunda H aktivitesinin serbest bolluğunda kısıt oluşturduğundan ertelenme miktarı da azalmıştır. Toplamda $11*12/2=66$ farklı kombinasyon hesaplanmıştır.

Çizelge 5.63. J-D-E-G hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

J	D	E	G	K. Sayısı
0	0	$0 \leq E \leq 6$	0	
	1	$1 \leq E \leq 6$		
	2	$2 \leq E \leq 6$		
	3	$3 \leq E \leq 6$		
	4	$4 \leq E \leq 6$		
	5	$5 \leq E \leq 6$		
	6	$6 \leq E \leq 6$		$=7*8/2=28$
1	0	$0 \leq E \leq 7$	0	
	1	$1 \leq E \leq 7$	1	
	2	$2 \leq E \leq 7$		
	3	$3 \leq E \leq 7$		
	4	$4 \leq E \leq 7$		
	5	$5 \leq E \leq 7$		
	6	$6 \leq E \leq 7$		
	7	$7 \leq E \leq 7$		$=8*9/2=36$ $36*2=72$
2	0	$0 \leq E \leq 8$	0	
	1	$1 \leq E \leq 8$	1	
	2	$2 \leq E \leq 8$	2	
	3	$3 \leq E \leq 8$		
	4	$4 \leq E \leq 8$		
	5	$5 \leq E \leq 8$		
	6	$6 \leq E \leq 8$		
	7	$7 \leq E \leq 8$		
	8	$8 \leq E \leq 8$		$=9*10/2=45$ $45*3=135$
3	0	$0 \leq E \leq 9$	0	
	1	$1 \leq E \leq 9$	1	
	2	$2 \leq E \leq 9$	2	
	3	$3 \leq E \leq 9$	3	
	4	$4 \leq E \leq 9$		
	5	$5 \leq E \leq 9$		
	6	$6 \leq E \leq 9$		
	7	$7 \leq E \leq 9$		
	8	$8 \leq E \leq 9$		
	9	$9 \leq E \leq 9$		$=10*11/2=55$ $55*4=220$
4	0	$0 \leq E \leq 10$	0	
	1	$1 \leq E \leq 10$	1	
	2	$2 \leq E \leq 10$	2	
	3	$3 \leq E \leq 10$	3	
	4	$4 \leq E \leq 10$	4	
	5	$5 \leq E \leq 10$		
	6	$6 \leq E \leq 10$		
	7	$7 \leq E \leq 10$		
	8	$8 \leq E \leq 10$		
	9	$9 \leq E \leq 10$		
	10	$10 \leq E \leq 10$		$=11*12/2=66$ $66*5=330$
Toplam				785

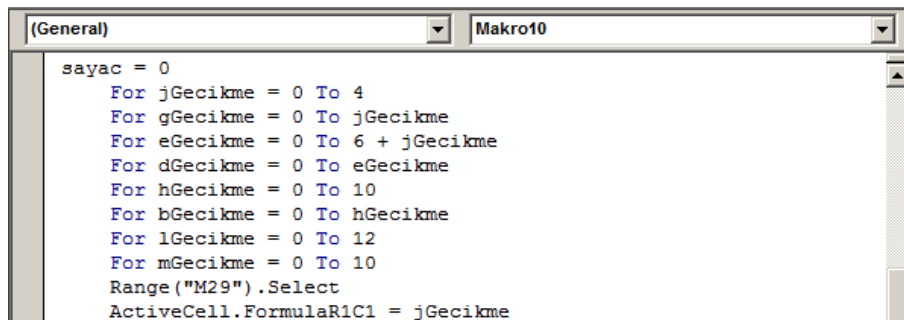
Çizelge 5.63'te sunulan J-D-E-G hattı, J aktivitesine bağımlı olduğu için J aktivitesi dikkate alınarak hat çözülmüştür. D-E ve G hatları birbirinden farklı fakat J hattına bağımlı çözülmüştür. Bu hatların dengeleme kombinasyon miktarları çarpılarak toplam kombinasyon miktarı hesaplanmıştır. J aktivitesindeki ertelenme ile G aktivitesindeki ertelenme, G aktivitesinin serbest bolluğu 0 olduğu için doğrusaldır. J aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile D aktivitesi 0-1-2-3-4-5-6 gün olmak üzere toplamda 7 ihtimal oluşur. D aktivitesinin 0 gün ertelenmesi de E aktivitesinde 0-1-2-3-4-5-6 gün ertelenme meydana getirir. D aktivitesinin ertelenme miktarı arttıkça E aktivitesi azalacağından toplam kombinasyonu J=0 için $7*8/2=28$ olarak hesaplanır. Birer gün ertelenen her J aktivitesi D-E-G aktivitelerinin ertelenmelerini artıracığından, Çizelge 5.63'te görüldüğü gibi ertelenme sonucu oluşan ihtimaller arasında bağlantı meydana gelmektedir. Bu bağlantı kullanılarak daha sistematik bir çözüme ulaşılabilir. İhtimaller toplandığında 785 kombinasyon hesaplanmıştır.

Çizelge 5.64. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	Kombinasyon Sayısı
B-H	66
J-D-E-G	785
L	13
M	11
$=66*785*13*11= 7.408.830$	

Çizelge 5.64'te kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. B-H ve J-D-E-G hatları yukarıdaki çizelgelerde (Çizelge 5.62 ve Çizelge 5.63) hesaplanmıştır. L ve M bağımsız hatları ise serbest bollukları göz önüne alınarak hesaplanmıştır. L=12 ve M=10 gün serbest bolluğa sahiptir. Buna 0 gün ertelenme durumu eklenince kombinasyon miktarları bir gün artmaktadır. Tüm ihtimaller değerlendirildiğinde 7.408.830 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:

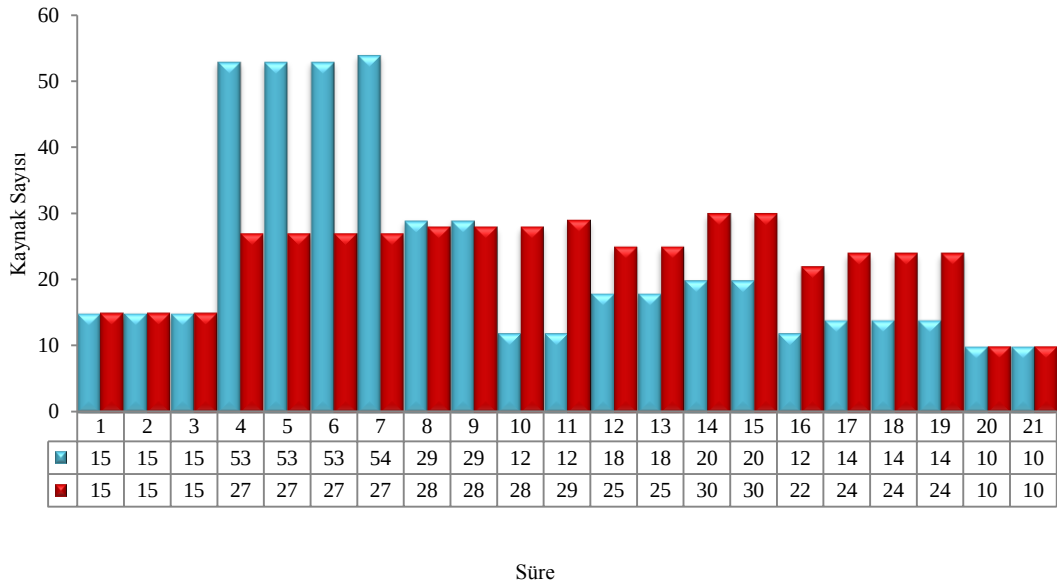


Şekil 5.79. Proje 17 makro

Çizelge 5.65. Proje 17 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

J-gecikme	0
G-gecikme	0
E-gecikme	4
D-gecikme	4
H-gecikme	4
B-gecikme	4
L-gecikme	0
M-gecikme	10
Arama uzayı sayısı	7.408.830
Hesaplama süresi (saat)	12,92
Başlangıç moment değeri	16368
Optimum moment değeri	12246

Arama uzayı sayısı 7.408.830 olan bir projeyi 46522 saniyede (12,92 saat), J aktivitesini 0, G aktivitesini 0, E aktivitesini 4, D aktivitesini 4, H aktivitesini 4, B aktivitesini 4, L aktivitesini 0 gün ve M aktivitesini 10 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

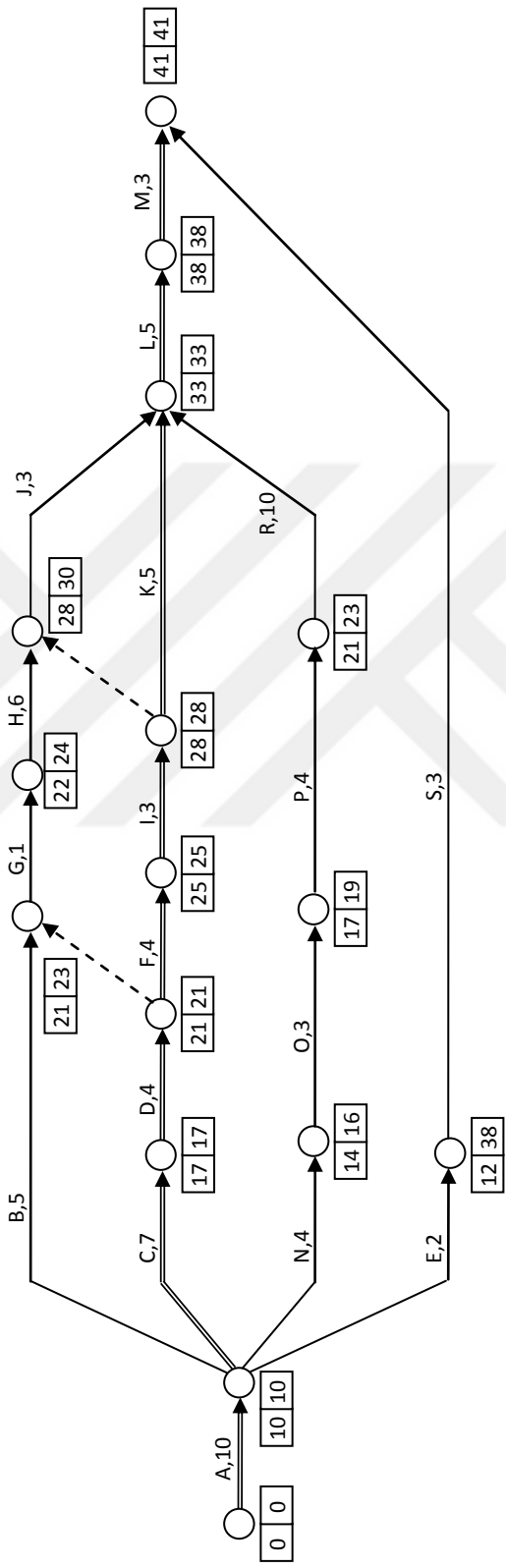


Şekil 5.80. Proje 17 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 54'ten 30'a düşmüştür.

5.18. Proje 18 (Bandelloni et al., 1994)

18 aktiviteden oluşan projenin ok diyagramı Şekil 5.81'de verildiği gibidir.



Şekil 5.81. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.66. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	10	-	0	0	10	10	4	0	0
B	5	A	10	10	21	23	5	6	8
C	7	A	10	10	17	17	8	0	0
D	4	C	17	17	21	21	4	0	0
E	2	A	10	10	12	38	6	0	26
F	4	D	21	21	25	25	3	0	0
G	1	B-D	21	23	22	24	5	0	2
H	6	G	22	24	28	30	2	0	2
I	3	F	25	25	28	28	4	0	0
J	3	H-I	28	30	33	33	1	2	2
K	5	I	28	28	33	33	2	0	0
L	5	J-K-R	33	33	38	38	2	0	0
M	3	L	38	38	41	41	1	0	0
N	4	A	10	10	14	16	6	0	2
O	3	N	14	16	17	19	6	0	2
P	4	O	17	19	21	23	7	0	2
R	10	P	21	23	33	33	10	2	2
S	3	E	12	38	41	41	4	26	26

Çizelge 5.67. E-S hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

E	S	K. Sayısı	E	S	K. Sayısı
0	$0 \leq S \leq 26$	27	14	$14 \leq S \leq 26$	13
1	$1 \leq S \leq 26$	26	15	$15 \leq S \leq 26$	12
2	$2 \leq S \leq 26$	25	16	$16 \leq S \leq 26$	11
3	$3 \leq S \leq 26$	24	17	$17 \leq S \leq 26$	10
4	$4 \leq S \leq 26$	23	18	$18 \leq S \leq 26$	9
5	$5 \leq S \leq 26$	22	19	$19 \leq S \leq 26$	8
6	$6 \leq S \leq 26$	21	20	$20 \leq S \leq 26$	7
7	$7 \leq S \leq 26$	20	21	$21 \leq S \leq 26$	6
8	$8 \leq S \leq 26$	19	22	$22 \leq S \leq 26$	5
9	$9 \leq S \leq 26$	18	23	$23 \leq S \leq 26$	4
10	$10 \leq S \leq 26$	17	24	$24 \leq S \leq 26$	3
11	$11 \leq S \leq 26$	16	25	$25 \leq S \leq 26$	2
12	$12 \leq S \leq 26$	15	26	$26 \leq S \leq 26$	1
13	$13 \leq S \leq 26$	14	Toplam		378

E aktivitesinin serbest bolluğu olmadığı için E aktivitesinde meydana gelen ertelenmeler S aktivitesini de erteleyecektir. Bu erteleme S aktivitesinin serbest bolluğu kadardır. S aktivitesi 26 gün serbest bolluğa sahip olduğundan oluşan ihtimal sayısı $27 \cdot 28 / 2 = 378$ farklı kombinasyon olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.68. N-O-P-R hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

N	O	P	R	K. Sayısı
0	0	0	0-1-2	
		1	1-2	
		2	2	$=3*4/2=6$
	1	1	1-2	
		2	2	$=2*3/2=3$
	2	2	2	$=1$
1	1	1	1-2	
		2	2	3
	2	2	2	1
2	2	2	2	1
Toplam				$=15$

R aktivitesinin P aktivitesine, P aktivitesinin O aktivitesine, O aktivitesinin N aktivitesine bağımlı olmasından dolayı hat N aktivitesi temel alınarak çözülür. N ve O aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile P aktivitesinde 3 farklı ihtimal oluşuyor. Bu ihtimallerin her biri de R aktivitesinde farklı ihtimaller oluşturuyor. Değişen N aktivite ertelenmeleriyle ihtimallerin arasında 6-3-1/3-1/1 şeklinde bir bağlantı oluşmuştur. Hesaplanan ihtimaller sonucunda 15 farklı kombinasyon elde edilmiştir.

Çizelge 5.69. J-G-H-B hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

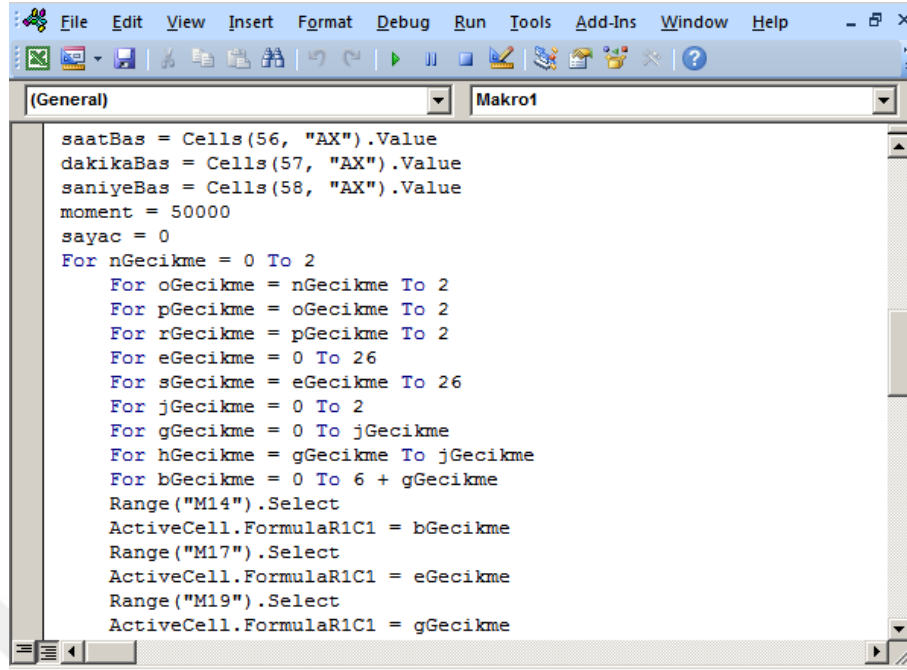
J	G	H	B	K. Sayısı
0	0	0	0-1-2-3-4-5-6	7
1	0	0-1	0-1-2-3-4-5-6	$2*7=14$
	1	1	0-1-2-3-4-5-6-7	$1*8=8$
2	0	0-1-2	0-1-2-3-4-5-6	$3*7=21$
	1	1-2	0-1-2-3-4-5-6-7	$2*8=16$
	2	2	0-1-2-3-4-5-6-7-8	$1*9=9$
Toplam				75

Hat J aktivitesi temel alınarak çözülmüştür. J aktivitesinin 1 gün ertelenmesiyle G aktivitesi 0-1 gün ertelenecek, G aktivitesinin 0 gün ertelenmesi için H aktivitesi 0-1 ve 1 gün ertelenmesi için H aktivitesi 1gün ertelenecektir. B aktivitesi ise G aktivitesine bağlı çözülmüştür.

Çizelge 5.70. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
E-S	378
N-O-P-R	15
B-G-H-J	75
Toplam	425.250

HCU işlemleri:

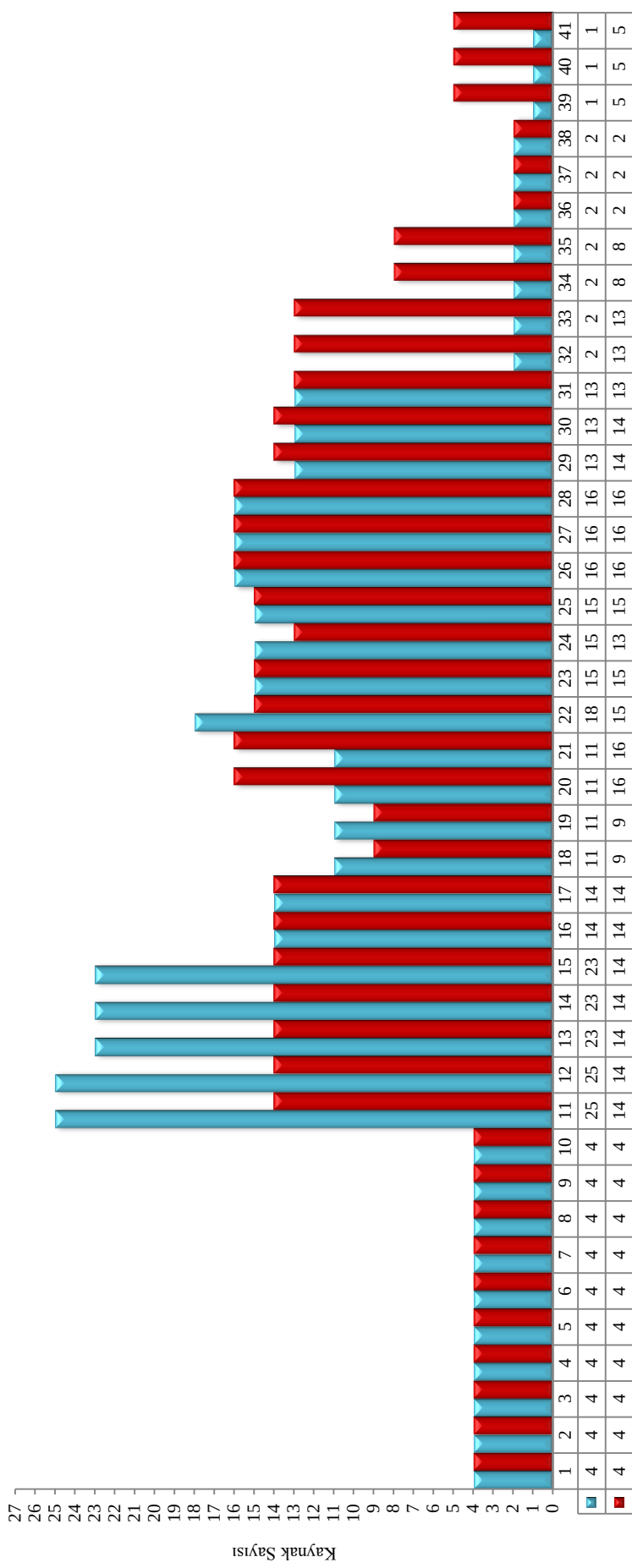


Şekil 5.82. Proje 18 makro

Çizelge 5.71. Proje 18 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	7
E-gecikme	23
G-gecikme	1
H-gecikme	2
J-gecikme	2
N-gecikme	0
O-gecikme	0
P-gecikme	2
R-gecikme	2
S-gecikme	26
Arama uzayı sayısı	425.250
Hesaplama süresi (dk)	73,75
Başlangıç moment değeri	6178
Optimum moment değeri	4932

Arama uzayı sayısı 425.250 olan bir projede en iyi moment değerini veren erteleme ihtimalleri; B aktivitesini 7, E aktivitesini 23, G aktivitesini 1, H-J-P-R aktivitelerini 2, N-O aktivitelerini 0 ve S aktivitesini 26 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



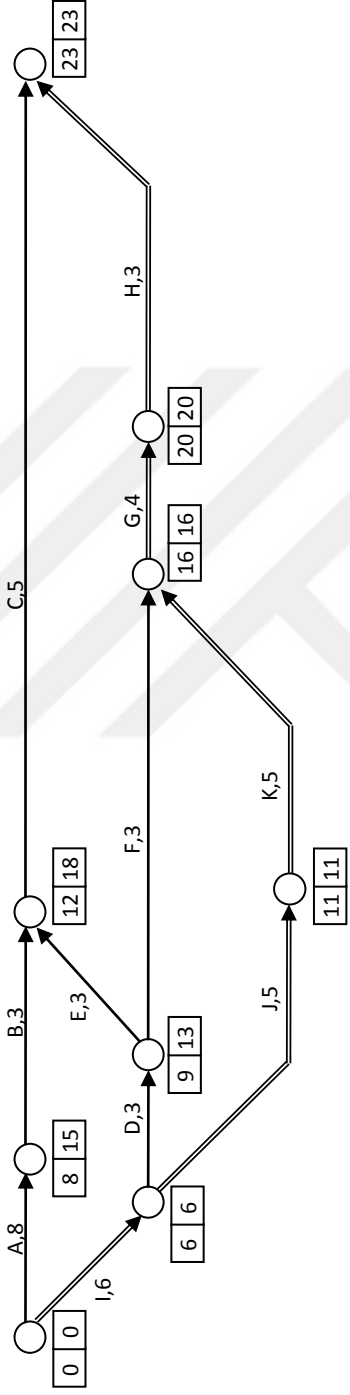
Süre

Şekil 5.83. Proje 18 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 25'ten 16'ya düşmüştür.

5.19. Proje 19 (Son and Skibniewski, 1999)

11 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.84'de sunulduğu gibi kritik I-J-K-G-H gibi kritik I-J-K-G-H ve birbirine bağımlı kritik olmayan C-A-B-D-E-F aktivitelerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.84. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.72. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	8	-	0	0	8	15	2	0	7
B	3	A	8	15	12	18	3	1	7
C	5	B-E	12	18	23	23	3	6	6
D	3	I	6	6	9	13	4	0	4
E	3	D	9	13	12	18	2	0	6
F	3	D	9	13	16	16	3	4	4
G	4	F-K	16	16	20	20	4	0	0
H	3	G	20	20	23	23	4	0	0
I	6	-	0	0	6	6	3	0	0
J	5	I	6	6	11	11	3	0	0
K	5	J	11	11	16	16	3	0	0

Çizelge 5.72'de B aktivitesinin 1, C aktivitesinin 6, F aktivitesinin 4 gün serbest bolluğu hesaplanmıştır. B aktivitesi A'ya, E aktivitesi D'ye, C aktivitesi B ve E'ye, F aktivitesi ise D aktivitesine bağımlıdır.

Çizelge 5.73. C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

C	A	B	D	E	F	K. Sayısı
0	0	0	0	0	0-1-2-3-4	
	0	1	0	0	0-1-2-3-4	
	1	1	0	0	0-1-2-3-4	15
1	0	0	0	0	0-1-2-3-4	
	0	1	0	0	0-1-2-3-4	
	0	2	0	0	0-1-2-3-4	
	1	1	0	0	0-1-2-3-4	
	1	2	0	0	0-1-2-3-4	
	2	2	0	0	0-1-2-3-4	
	0	0	0	1	0-1-2-3-4	
	0	1	0	1	0-1-2-3-4	
	0	2	0	1	0-1-2-3-4	
	1	1	0	1	0-1-2-3-4	
	1	2	0	1	0-1-2-3-4	
	2	2	0	1	0-1-2-3-4	60
	0	0	1	1	1-2-3-4	
	0	1	1	1	1-2-3-4	
	0	2	1	1	1-2-3-4	
	1	1	1	1	1-2-3-4	
	1	2	1	1	1-2-3-4	
	2	2	1	1	1-2-3-4	24
2	0	0-1-2-3	0	0-1-2	0-1-2-3-4	60
	0	0-1-2-3	1	1-2	1-2-3-4	32
	0	0-1-2-3	2	2	2-3-4	12
	1	1-2-3	0	0-1-2	0-1-2-3-4	45
	1	1-2-3	1	1-2	1-2-3-4	24
	1	1-2-3	2	2	2-3-4	9
	2	2-3	0	0-1-2	0-1-2-3-4	30

Çizelge 5.73. C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam)

2	2	2-3	1	1-2	1-2-3-4	16
	2	2-3	2	2	2-3-4	6
	3	3	0	0-1-2	0-1-2-3-4	15
	3	3	1	1-2	1-2-3-4	8
	3	3	2	2	2-3-4	3
3	0	0-1-2-3-4	0	0-1-2-3	0-1-2-3-4	100
	0	0-1-2-3-4	1	1-2-3	1-2-3-4	60
	0	0-1-2-3-4	2	2-3	2-3-4	30
	0	0-1-2-3-4	3	3	3-4	10
	1	1-2-3-4	0	0-1-2-3	0-1-2-3-4	80
	1	1-2-3-4	1	1-2-3	1-2-3-4	48
	1	1-2-3-4	2	2-3	2-3-4	24
	1	1-2-3-4	3	3	3-4	8
	2	2-3-4	0	0-1-2-3	0-1-2-3-4	60
	2	2-3-4	1	1-2-3	1-2-3-4	36
	2	2-3-4	2	2-3	2-3-4	18
	2	2-3-4	3	3	3-4	6
	3	3-4	0	0-1-2-3	0-1-2-3-4	40
	3	3-4	1	1-2-3	1-2-3-4	24
	3	3-4	2	2-3	2-3-4	12
	3	3-4	3	3	3-4	4
	4	4	0	0-1-2-3	0-1-2-3-4	20
	4	4	1	1-2-3	1-2-3-4	12
	4	4	2	2-3	2-3-4	6
	4	4	3	3	3-4	2
4	0	0-1-2-3-4-5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	150
	0	0-1-2-3-4-5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	96
	0	0-1-2-3-4-5	2	2-3-4	2-3-4	54
	0	0-1-2-3-4-5	3	3-4	3-4	24
	0	0-1-2-3-4-5	4	4	4	6
	1	1-2-3-4-5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	125
	1	1-2-3-4-5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	80
	1	1-2-3-4-5	2	2-3-4	2-3-4	45
	1	1-2-3-4-5	3	3-4	3-4	20
	1	1-2-3-4-5	4	4	4	5
	2	2-3-4-5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	100
	2	2-3-4-5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	64
	2	2-3-4-5	2	2-3-4	2-3-4	36
	2	2-3-4-5	3	3-4	3-4	16
	2	2-3-4-5	4	4	4	4
	3	3-4-5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	75
	3	3-4-5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	48
	3	3-4-5	2	2-3-4	2-3-4	27
	3	3-4-5	3	3-4	3-4	12
	3	3-4-5	4	4	4	3
	4	4-5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	50
	4	4-5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	32
	4	4-5	2	2-3-4	2-3-4	18
	4	4-5	3	3-4	3-4	8
	4	4-5	4	4	4	2
	5	5	0	0-1-2-3-4	0-1-2-3-4	25
	5	5	1	1-2-3-4	1-2-3-4	16

Çizelge 5.73. C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam)

4	5	5	2	2-3-4	2-3-4	9
	5	5	3	3-4	3-4	4
	5	5	4	4	4	1
5	0	0-1-2-3-4-5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	210
	0	0-1-2-3-4-5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	140
	0	0-1-2-3-4-5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	84
	0	0-1-2-3-4-5-6	3	3-4-5	3-4	42
	0	0-1-2-3-4-5-6	4	4-5	4	14
	1	1-2-3-4-5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	180
	1	1-2-3-4-5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	120
	1	1-2-3-4-5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	72
	1	1-2-3-4-5-6	3	3-4-5	3-4	36
	1	1-2-3-4-5-6	4	4-5	4	12
	2	2-3-4-5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	150
	2	2-3-4-5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	100
	2	2-3-4-5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	60
	2	2-3-4-5-6	3	3-4-5	3-4	30
	2	2-3-4-5-6	4	4-5	4	10
	3	3-4-5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	120
	3	3-4-5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	80
	3	3-4-5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	48
	3	3-4-5-6	3	3-4-5	3-4	24
	3	3-4-5-6	4	4-5	4	8
	4	4-5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	90
	4	4-5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	60
	4	4-5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	36
	4	4-5-6	3	3-4-5	3-4	18
	4	4-5-6	4	4-5	4	6
	5	5-6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	60
	5	5-6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	40
	5	5-6	2	2-3-4-5	2-3-4	24
	5	5-6	3	3-4-5	3-4	12
	5	5-6	4	4-5	4	4
	6	6	0	0-1-2-3-4-5	0-1-2-3-4	30
	6	6	1	1-2-3-4-5	1-2-3-4	20
	6	6	2	2-3-4-5	2-3-4	12
	6	6	3	3-4-5	3-4	6
	6	6	4	4-5	4	2
6	0	0-1-2-3-4-5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	280
	0	0-1-2-3-4-5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	192
	0	0-1-2-3-4-5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	120
	0	0-1-2-3-4-5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	64
	0	0-1-2-3-4-5-6-7	4	4-5-6	4	24
	1	1-2-3-4-5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	245
	1	1-2-3-4-5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	168
	1	1-2-3-4-5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	105
	1	1-2-3-4-5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	56
	1	1-2-3-4-5-6-7	4	4-5-6	4	21
	2	2-3-4-5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	210
	2	2-3-4-5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	144
	2	2-3-4-5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	90
	2	2-3-4-5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	48

Çizelge 5.73. C-A-B-D-E-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu (devam)

6	2	2-3-4-5-6-7	4	4-5-6	4	18
	3	3-4-5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	175
	3	3-4-5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	120
	3	3-4-5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	75
	3	3-4-5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	40
	3	3-4-5-6-7	4	4-5-6	4	15
	4	4-5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	140
	4	4-5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	96
	4	4-5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	60
	4	4-5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	32
	4	4-5-6-7	4	4-5-6	4	12
	5	5-6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	105
	5	5-6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	72
	5	5-6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	45
	5	5-6-7	3	3-4-5-6	3-4	24
	5	5-6-7	4	4-5-6	4	9
	6	6-7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	70
	6	6-7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	48
	6	6-7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	30
	6	6-7	3	3-4-5-6	3-4	16
	6	6-7	4	4-5-6	4	6
	7	7	0	0-1-2-3-4-5-6	0-1-2-3-4	35
	7	7	1	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4	24
	7	7	2	2-3-4-5-6	2-3-4	15
	7	7	3	3-4-5-6	3-4	8
	7	7	4	4-5-6	4	3
Toplam						7134

Hattın çözümüne C aktivitesi temel alınarak başlanmıştır. A-B-D-E aktiviteleri C aktivitesine bağımlı çözülmüş ve F aktivitesi D'ye bağımlı çözülmüştür. C aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile A-B hattında 0-0, 0-1, 1-1 günlük erteleme ihtimaller oluşurken, D-E hattında sadece 0-0 ihtimali oluşmakta ve F hattı ise 0-1-2-3-4 güne kadar ertelenebilmektedir. A-B ve F hatlarında oluşan ihtimal çokluğunun sebebi ise aktivitelerin serbest bolluğudur. İşlem devam ettirildiğinde 7134 farklı kombinasyon hesaplanmıştır.

HCU işlemleri:

```

sayac = 0
For aGecikme = 0 To 7
  For bGecikme = aGecikme To 7
    For dGecikme = 0 To 4
      For eGecikme = dGecikme To 6
        For fGecikme = dGecikme To 4
          bosDegisken = eGecikme

          If bGecikme - 1 > eGecikme Then bosDegisken = bGecikme - 1

          For cGecikme = bosDegisken To 6

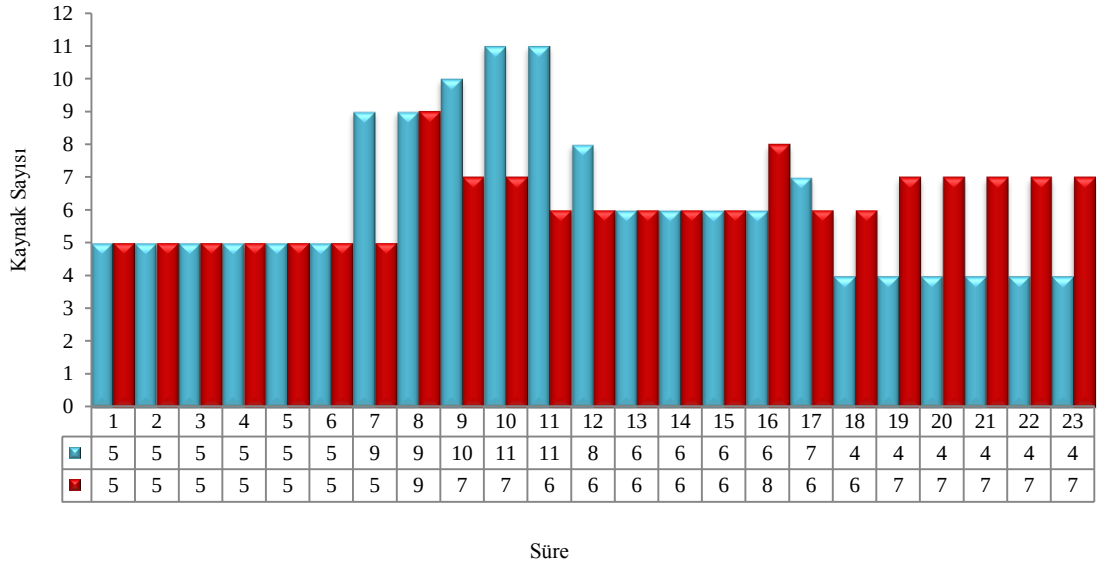
```

Şekil 5.85. Proje 19 makro

Çizelge 5.74. Proje 19 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

A-gecikme	0
B-gecikme	2
C-gecikme	6
D-gecikme	1
E-gecikme	6
F-gecikme	4
Arama uzayı sayısı	7134
Hesaplama süresi (sn)	45
Başlangıç moment değeri	1007
Optimum moment değeri	915

Arama uzayı sayısı 7134 olan bir projeyi 45 saniyede, A aktivitesini 0, B aktivitesini 2, C aktivitesini 6, D aktivitesini 1, E aktivitesini 6 ve F aktivitesini 4 gün erteleyerek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

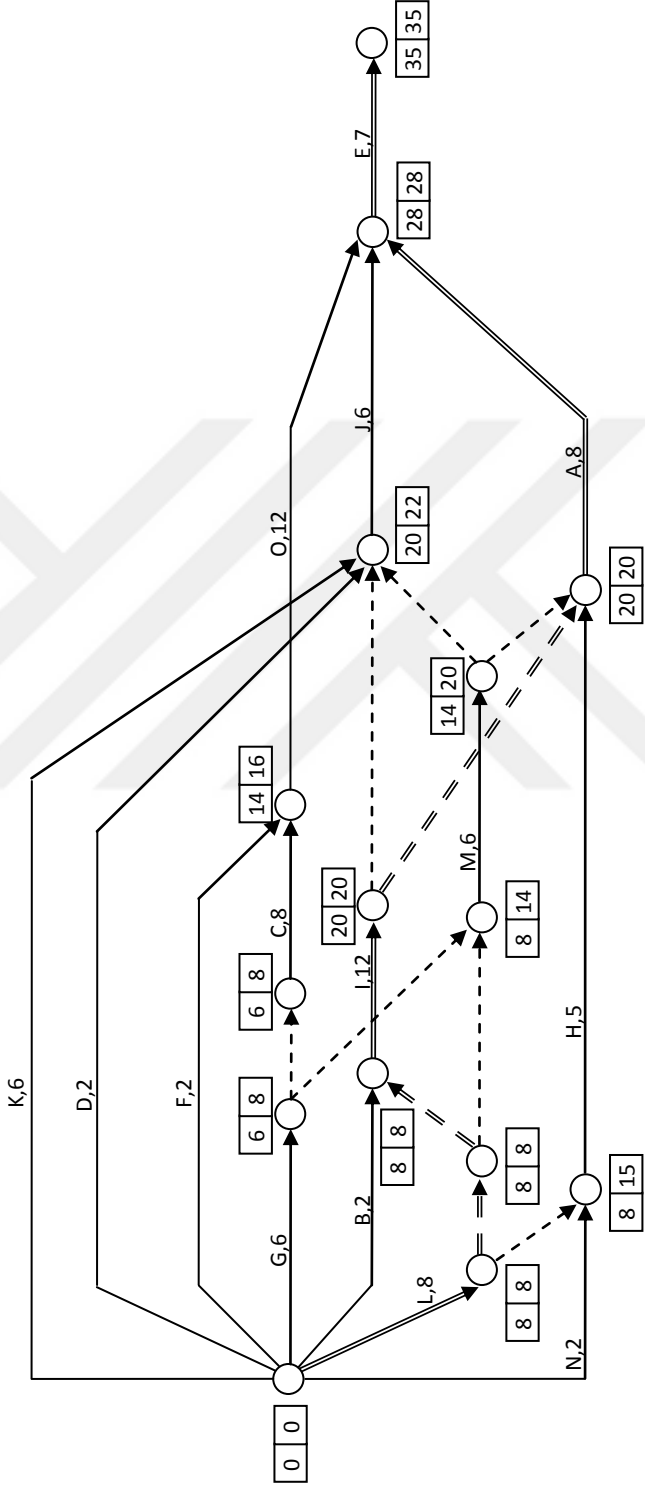


Şekil 5.86. Proje 19 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 11'den 9'a düşmüştür.

5.20. Proje 20 (Stevens, 1990)

15 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.87'de verilmiştir.



Şekil 5.87. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.75. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	8	H-I-M	20	20	28	28	3	0	0	2	0	0
B	2	-	0	0	8	8	2	4	3	0	6	6
C	8	G	6	8	14	16	2	1	4	2	0	2
D	2	-	0	0	20	22	5	5	3	5	18	20
E	7	A-J-O	28	28	35	35	3	4	6	5	0	0
F	2	-	0	0	14	16	0	5	4	6	12	14
G	6	-	0	0	6	8	3	6	5	0	0	2
H	5	L-N	8	15	20	20	0	4	0	1	7	7
I	12	B-L	8	8	20	20	2	3	2	1	0	0
J	6	D-I-K-M	20	22	28	28	5	3	1	1	2	2
K	6	-	0	0	20	22	0	6	2	2	14	16
L	8	-	0	0	8	8	0	4	2	5	0	0
M	6	G-L	8	14	14	20	2	5	3	0	0	6
N	2	-	0	0	8	15	0	0	5	6	6	13
O	12	C-F	14	16	28	28	5	5	1	6	2	2

Çizelge 5.76. J-M-D-K hattı kaynak dengelenme kombinasyonu

J	M	D	K	K. Sayısı
0	$0 \leq M \leq 6$	$0 \leq D \leq 18$	$0 \leq K \leq 14$	1995
1	$0 \leq M \leq 7$	$0 \leq D \leq 19$	$0 \leq K \leq 15$	2560
2	$0 \leq M \leq 8$	$0 \leq D \leq 20$	$0 \leq K \leq 16$	3213
Toplam				7768

Çizelge 5.77. O-G-C-F hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

O	G	C	F
0	0	0	$0 \leq F \leq 12$
1	0	0	$0 \leq F \leq 13$
	0	1	$0 \leq F \leq 13$
	1	1	$0 \leq F \leq 13$
2	0	0	$0 \leq F \leq 14$
	0	1	$0 \leq F \leq 14$
	1	1	$0 \leq F \leq 14$
	0	2	$0 \leq F \leq 14$
	1	2	$0 \leq F \leq 14$
	2	2	$0 \leq F \leq 14$
K. Sayısı			145

O aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile G ve C aktiviteleri 0 gün ertelenirken F aktivitesi 12 gün serbest bolluğu olduğu için 13 gün ertelenebilmektedir. Benzer erteleme işlemleri sonucunda 145 farklı kombinasyon hesaplanmıştır.

Çizelge 5.78. N-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

N	H	N	H
0	$0 \leq H \leq 7$	7	$1 \leq H \leq 7$
1	$0 \leq H \leq 7$	8	$2 \leq H \leq 7$
2	$0 \leq H \leq 7$	9	$3 \leq H \leq 7$
3	$0 \leq H \leq 7$	10	$4 \leq H \leq 7$
4	$0 \leq H \leq 7$	11	$5 \leq H \leq 7$
5	$0 \leq H \leq 7$	12	$6 \leq H \leq 7$
6	$0 \leq H \leq 7$	13	$7 \leq H \leq 7$
K. Sayısı		84	

N aktivitesinin serbest bolluğu 6 ve H aktivitesinin 7 olduğundan, N aktivitesinin 6 güne kadar ertelenmesi H aktivitesini etkilemezken artan ertelenmeler H aktivitesinin ertelenme süresini kısıtlamaktadır. İhtimallere bakıldığında 84 farklı kombinasyon bulunmuştur.

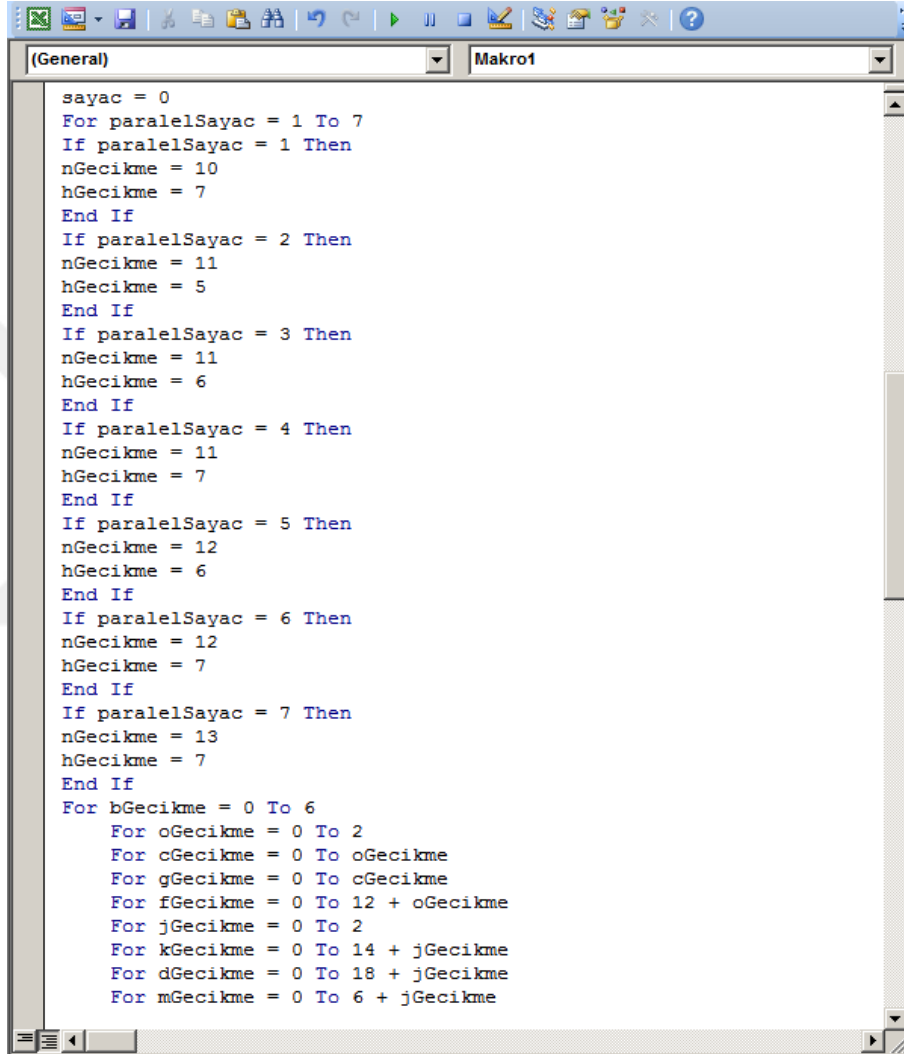
Çizelge 5.79. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	Kombinasyon Sayısı
O-G-C-F	145
J-M-D-K	7768
N-H	84
B	7
Toplam	662.299.680

Tüm hatlar hesaplandığında 662.299.680 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:

Bu problemin çözümünde toplam döngü sayısı 662.299.680 olduğundan Paralel Programlama yöntemi kullanıldı. Paralel Programlama ile arama uzayı fazla ve karmaşık problemler, farklı işlemciler üzerinde eş zamanlı çalışabilen farklı komut serilerine bölündü. Bu sayede problemin arama uzayının büyüklüğünün getirdiği, bilgisayarda çözüm imkânsızlığı azaltılmış olacaktır.



```
sayac = 0
For paralelSayac = 1 To 7
If paralelSayac = 1 Then
nGecikme = 10
hGecikme = 7
End If
If paralelSayac = 2 Then
nGecikme = 11
hGecikme = 5
End If
If paralelSayac = 3 Then
nGecikme = 11
hGecikme = 6
End If
If paralelSayac = 4 Then
nGecikme = 11
hGecikme = 7
End If
If paralelSayac = 5 Then
nGecikme = 12
hGecikme = 6
End If
If paralelSayac = 6 Then
nGecikme = 12
hGecikme = 7
End If
If paralelSayac = 7 Then
nGecikme = 13
hGecikme = 7
End If
For bGecikme = 0 To 6
For oGecikme = 0 To 2
For cGecikme = 0 To oGecikme
For gGecikme = 0 To cGecikme
For fGecikme = 0 To 12 + oGecikme
For jGecikme = 0 To 2
For kGecikme = 0 To 14 + jGecikme
For dGecikme = 0 To 18 + jGecikme
For mGecikme = 0 To 6 + jGecikme
```

Şekil 5.88. Proje 20 makro

Arama uzayı sayısı 662.299.680 olan projenin çözümünde birden çok hesaplama kaynağı aynı anda kullanıldı. Toplam kombinasyon hesabında 84 gün erteleme ihtimaline sahip N-H hattı 12 farklı komut serisine parçalandı. Komut serisi sonuçları:

Parça-1	h=0 ve n=0-6	Parça-2	h=1 ve n=0-6	Parça-3	h=2 ve n=0-6
Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640
Makro Moment	8971	Makro Moment	8971	Makro Moment	8975
B-gecikme	6	B-gecikme	6	B-gecikme	6
C-gecikme	0	C-gecikme	0	C-gecikme	2
D-gecikme	14	D-gecikme	14	D-gecikme	6
F-gecikme	8	F-gecikme	8	F-gecikme	8
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	1	H-gecikme	2
J-gecikme	2	J-gecikme	2	J-gecikme	2
K-gecikme	10	K-gecikme	10	K-gecikme	10
M-gecikme	8	M-gecikme	8	M-gecikme	8
N-gecikme	0	N-gecikme	0	N-gecikme	0
O-gecikme	2	O-gecikme	2	O-gecikme	2
Süre	606390	Süre	612003	Süre	602985
Parça-4	h=3 ve n=0-6	Parça-5	h=4 ve n=0-6	Parça-6	h=5 ve n=0-6
Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640
Makro Moment	8975	Makro Moment	9003	Makro Moment	9031
B-gecikme	6	B-gecikme	6	B-gecikme	6
C-gecikme	2	C-gecikme	2	C-gecikme	2
D-gecikme	6	D-gecikme	6	D-gecikme	6
F-gecikme	8	F-gecikme	8	F-gecikme	8
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	3	H-gecikme	4	H-gecikme	5
J-gecikme	2	J-gecikme	2	J-gecikme	2
K-gecikme	10	K-gecikme	10	K-gecikme	10
M-gecikme	8	M-gecikme	8	M-gecikme	8
N-gecikme	0	N-gecikme	0	N-gecikme	0
O-gecikme	2	O-gecikme	2	O-gecikme	2
Süre	590745	Süre	593999	Süre	554995
Parça-7	h=6 ve n=0-6	Parça-8	h=7 ve n=0-6	Parça-9	n=10-13
Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640
Makro Moment	9059	Makro Moment	9087	Makro Moment	9051
B-gecikme	6	B-gecikme	6	B-gecikme	0
C-gecikme	2	C-gecikme	2	C-gecikme	2
D-gecikme	6	D-gecikme	6	D-gecikme	0
F-gecikme	8	F-gecikme	8	F-gecikme	8
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	2
H-gecikme	6	H-gecikme	7	H-gecikme	5
J-gecikme	2	J-gecikme	2	J-gecikme	2
K-gecikme	10	K-gecikme	10	K-gecikme	10
M-gecikme	8	M-gecikme	8	M-gecikme	8
N-gecikme	0	N-gecikme	0	N-gecikme	11
O-gecikme	2	O-gecikme	2	O-gecikme	2
Süre	627150	Süre	593326	Süre	576924
Parça-10	n=7 ve h=1-7	Parça-11	n=8-9	Parça-12	n=9-10
Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640	Arama Uzayı	55191640
Makro Moment	8985	Makro Moment	8995	Makro Moment	9023
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
C-gecikme	2	C-gecikme	2	C-gecikme	2
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
F-gecikme	14	F-gecikme	14	F-gecikme	14
G-gecikme	2	G-gecikme	2	G-gecikme	2
H-gecikme	1	H-gecikme	2	H-gecikme	4
J-gecikme	2	J-gecikme	2	J-gecikme	2
K-gecikme	8	K-gecikme	8	K-gecikme	8
M-gecikme	8	M-gecikme	8	M-gecikme	8
N-gecikme	7	N-gecikme	8	N-gecikme	9
O-gecikme	2	O-gecikme	2	O-gecikme	2
Süre	618731	Süre	572973	Süre	537050

Şekil 5.89. Proje 20 paralel hat parça sonuçları

Her bir hesaplama miktarı 55.191.640, ortalama süre ise 590.606 saniyedir. 12 serinin moment sonuçları karşılaştırılarak minimum moment değerine sahip olan paralellik koşulu temel alınarak analize devam edilmiştir.

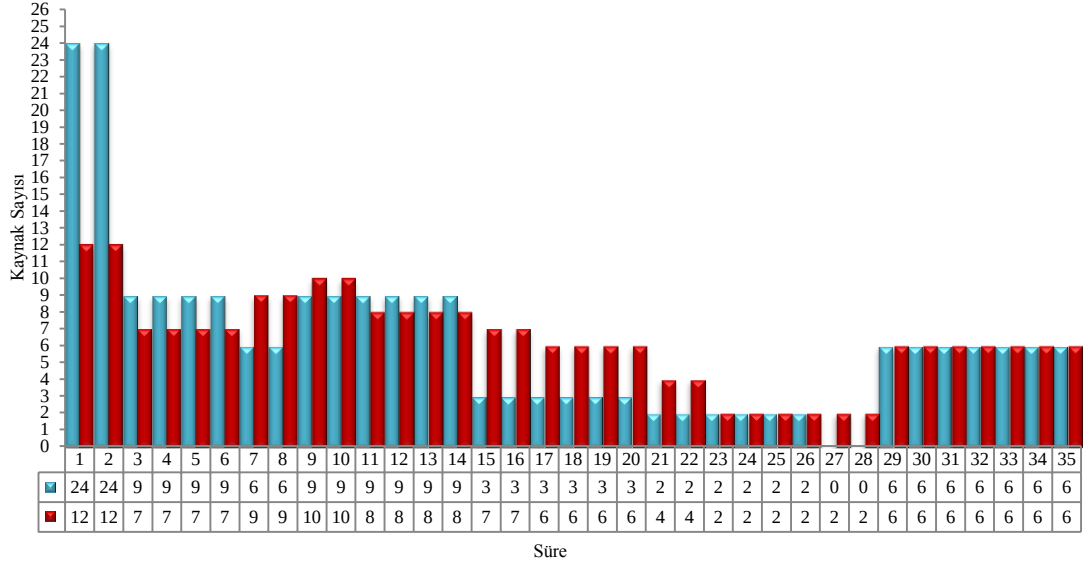
Çizelge 5.80. Paralel parça moment değerleri

Parçalar	Moment Değeri	Arama Uzayı
h=0 ve n=0-6	8971	55.191.640
h=1 ve n=0-6	8971	55.191.640
h=2 ve n=0-6	8975	55.191.640
h=3 ve n=0-6	8975	55.191.640
h=4 ve n=0-6	9003	55.191.640
h=5 ve n=0-6	9031	55.191.640
h=6 ve n=0-6	9059	55.191.640
h=7 ve n=0-6	9087	55.191.640
n=10-13	9051	55.191.640
n=7 ve h=1-7	8985	55.191.640
n=8-9	8995	55.191.640
n=9-10	9023	55.191.640
minimum moment	8971	662.299.680

Çizelge 5.81. Proje 20 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

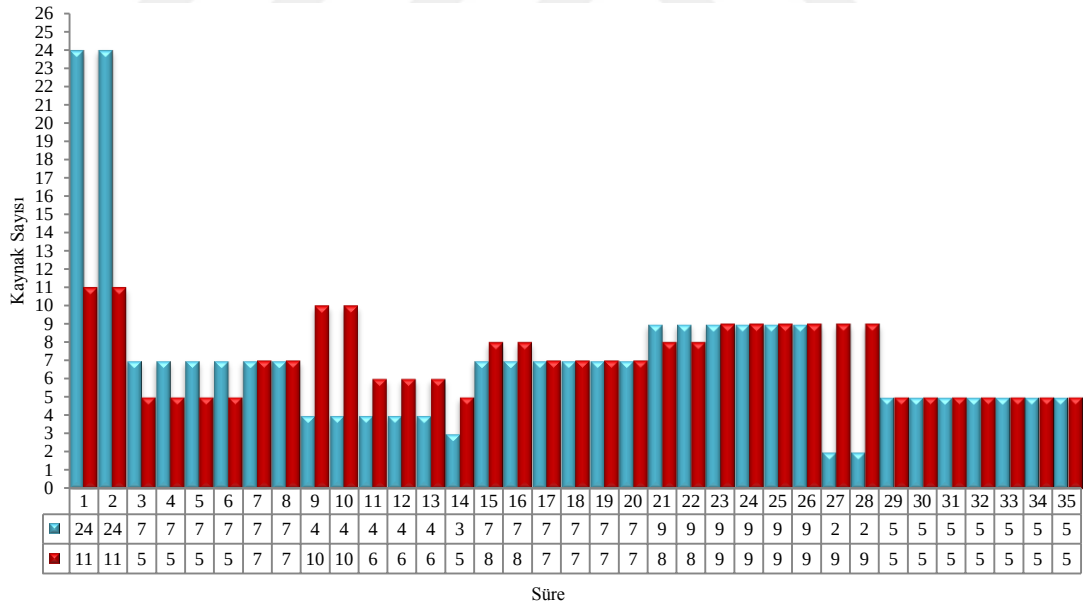
B-gecikme	6
C-gecikme	0
D-gecikme	14
F-gecikme	8
G-gecikme	0
H-gecikme	0
J-gecikme	2
K-gecikme	10
M-gecikme	8
N-gecikme	0
O-gecikme	2
Arama uzayı sayısı	662.299.680
Hesaplama süresi (saat)	174,21
Başlangıç moment değeri	11391
Optimum moment değeri	8971

Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



Şekil 5.92. Proje 20 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 24'ten 12'ye düşmüştür.

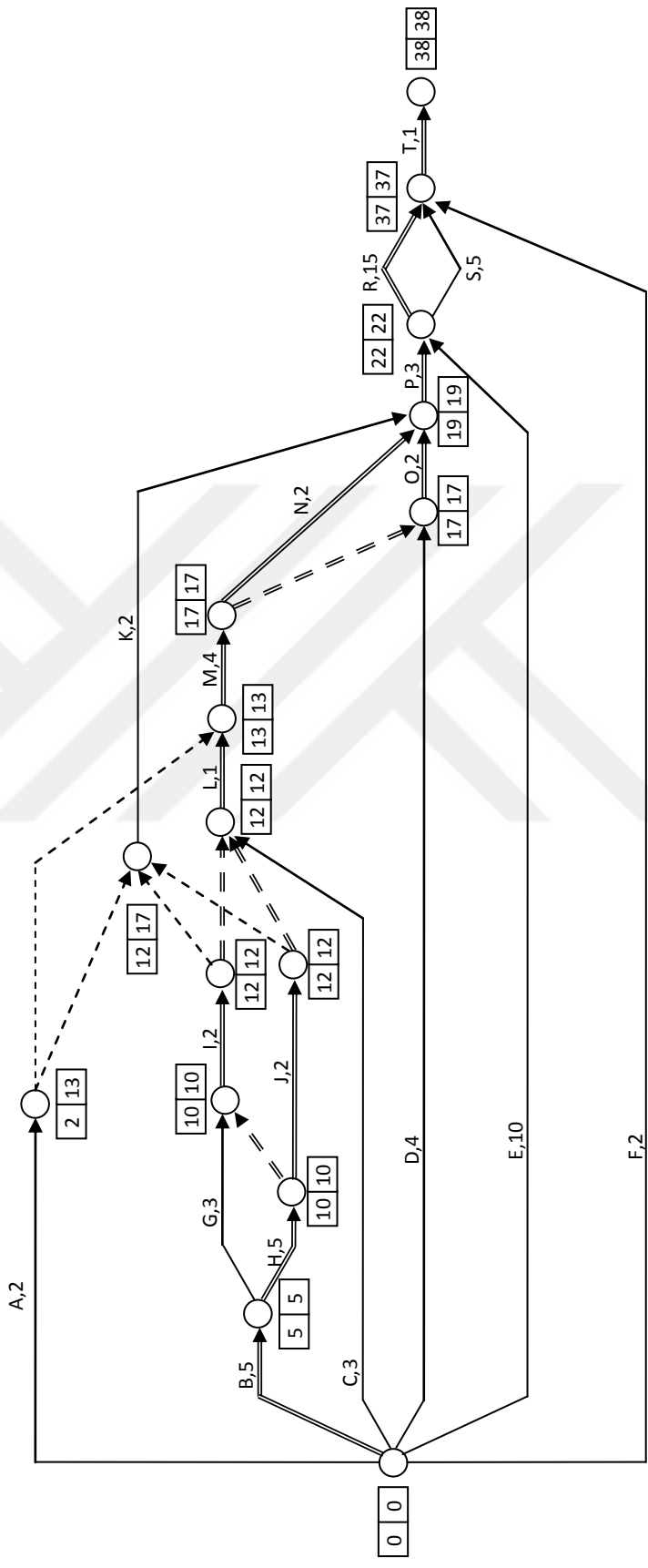


Şekil 5.93. Proje 20 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 24'ten 11'e düşmüştür.

5.21. Proje 21 (Stevens, 1990)

19 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılıklık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.94'te verilmiştir.



Şekil 5.94. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.82. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	13	5	0	4	0	0	11
B	5	-	0	0	5	5	0	6	0	5	0	0
C	3	-	0	0	12	12	3	1	2	4	9	9
D	4	-	0	0	17	17	6	2	0	5	13	13
E	10	-	0	0	22	22	5	0	2	0	12	12
F	2	-	0	0	37	37	1	6	2	2	35	35
G	3	B	5	5	10	10	5	1	5	5	2	2
H	5	B	5	5	10	10	4	4	0	4	0	0
I	2	G-H	10	10	12	12	0	0	1	3	0	0
J	2	H	10	10	12	12	5	3	5	4	0	0
K	2	A-I-J	12	17	19	19	6	0	0	3	5	5
L	1	C-I-J	12	12	13	13	3	6	4	5	0	0
M	4	A-L	13	13	17	17	1	6	5	5	0	0
N	2	M	17	17	19	19	2	0	3	4	0	0
O	2	D-M	17	17	19	19	5	2	3	0	0	0
P	3	K-N-O	19	19	22	22	6	1	2	3	0	0
R	15	E-P	22	22	37	37	4	2	4	0	0	0
S	5	E-P	22	22	37	37	4	2	5	1	10	10
T	1	F-R-S	37	37	38	38	3	3	4	5	0	0

C aktivitesinin 9, D aktivitesinin 13, E aktivitesinin 12, F aktivitesinin 35, G aktivitesinin 2, K aktivitesinin 5, S aktivitesinin 10 gün olarak serbest bollukları hesaplanmıştır.

Çizelge 5.83. E-S hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

E	S	E	S
0	$0 \leq S \leq 10$	7	$0 \leq S \leq 10$
1	$0 \leq S \leq 10$	8	$0 \leq S \leq 10$
2	$0 \leq S \leq 10$	9	$0 \leq S \leq 10$
3	$0 \leq S \leq 10$	10	$0 \leq S \leq 10$
4	$0 \leq S \leq 10$	11	$0 \leq S \leq 10$
5	$0 \leq S \leq 10$	12	$0 \leq S \leq 10$
6	$0 \leq S \leq 10$	K. Sayısı	143

E aktivitesinin 12, S aktivitesinin 10 gün serbest bolluklarına 0 erteleme durumunu da eklersek $13 \times 11 = 143$ farklı kombinasyon elde edilir.

Çizelge 5.84. A-K hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

A	K
0	$0 \leq K \leq 5$
1	$0 \leq K \leq 5$
2	$0 \leq K \leq 5$
3	$0 \leq K \leq 5$
4	$0 \leq K \leq 5$
5	$0 \leq K \leq 5$
6	$0 \leq K \leq 5$
7	$0 \leq K \leq 5$
8	$0 \leq K \leq 5$
9	$0 \leq K \leq 5$
10	$0 \leq K \leq 5$
11	$1 \leq K \leq 5$
K. Sayısı	71

A aktivitesinin 0-10 arası ertelenmesi K aktivitesini etkilemezken, 10'dan fazla ertelenme K aktivitesinin ertelenmesini kısıtlamaktadır.

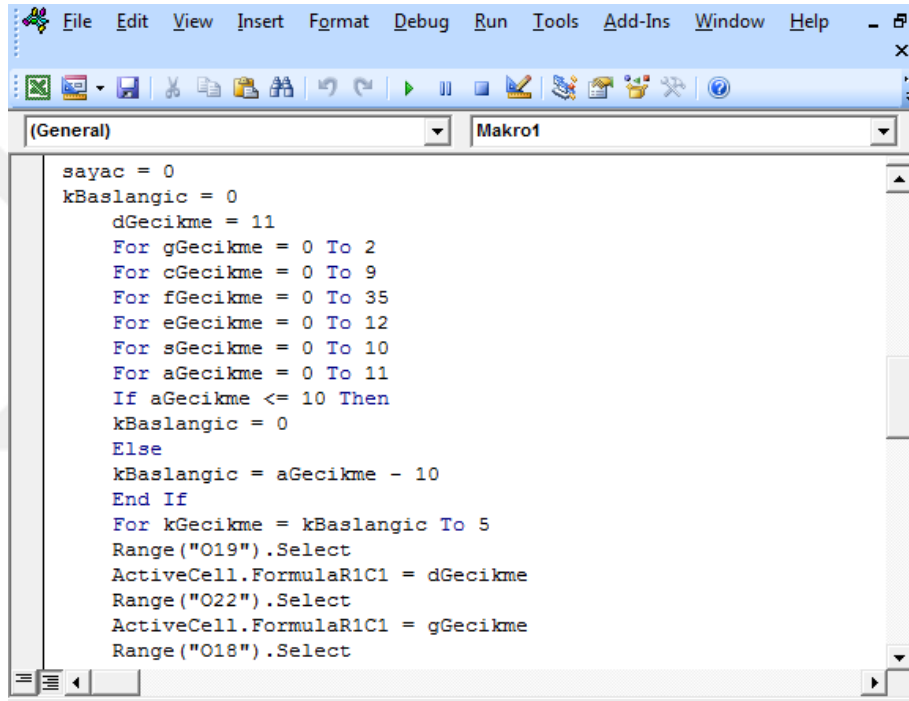
Çizelge 5.85. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	Kombinasyon Sayısı
A-K	71
E-S	143
G	3
C	10
D	14
F	36
Toplam	153.513.360

Çizelge 5.85'te kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. A-K, E-S, G, C, D ve F aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez ve şebeke üzerinde oluşturulabilecek toplam geciktirme kombinasyonu sayısı, bu yolların sahip olduğu gecikme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 153.513.360 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:

Bu problemin çözümünde toplam döngü sayısı 153.513.360 olduğundan Paralel Programlama yöntemi kullanıldı.



```
sayac = 0
kBaslangic = 0
dGecikme = 11
For gGecikme = 0 To 2
For cGecikme = 0 To 9
For fGecikme = 0 To 35
For eGecikme = 0 To 12
For sGecikme = 0 To 10
For aGecikme = 0 To 11
If aGecikme <= 10 Then
kBaslangic = 0
Else
kBaslangic = aGecikme - 10
End If
For kGecikme = kBaslangic To 5
Range("O19").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = dGecikme
Range("O22").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = gGecikme
Range("O18").Select
```

Şekil 5.95. Proje 21 makro

Toplam kombinasyon hesabında 14 gün erteleme ihtimaline sahip D hattı 14 farklı komut serisine parçalandı. Komut serisi sonuçları:

Parça-1		D=0	Parça-2		D=1	Parça-3		D=2
Makro Moment		5640	Makro Moment		5658	Makro Moment		5680
A-gecikme		3	A-gecikme		0	A-gecikme		0
C-gecikme		4	C-gecikme		8	C-gecikme		9
D-gecikme		0	D-gecikme		1	D-gecikme		2
E-gecikme		12	E-gecikme		12	E-gecikme		12
F-gecikme		22	F-gecikme		22	F-gecikme		22
G-gecikme		2	G-gecikme		0	G-gecikme		1
K-gecikme		1	K-gecikme		1	K-gecikme		1
S-gecikme		2	S-gecikme		2	S-gecikme		2
Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240
Süre		92616	Süre		88108	Süre		93675
Parça-4		D=3	Parça-5		D=4	Parça-6		D=7
Makro Moment		5662	Makro Moment		5760	Makro Moment		5858
A-gecikme		0	A-gecikme		2	A-gecikme		3
C-gecikme		0	C-gecikme		0	C-gecikme		0
D-gecikme		3	D-gecikme		4	D-gecikme		5
E-gecikme		12	E-gecikme		12	E-gecikme		12
F-gecikme		22	F-gecikme		22	F-gecikme		22
G-gecikme		2	G-gecikme		2	G-gecikme		2
K-gecikme		1	K-gecikme		1	K-gecikme		1
S-gecikme		2	S-gecikme		2	S-gecikme		2
Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240
Süre		88718	Süre		89563	Süre		88095
Parça-7		D=6	Parça-8		D=7	Parça-9		D=8
Makro Moment		5858	Makro Moment		5782	Makro Moment		5706
A-gecikme		3	A-gecikme		3	A-gecikme		3
C-gecikme		0	C-gecikme		0	C-gecikme		0
D-gecikme		6	D-gecikme		7	D-gecikme		8
E-gecikme		12	E-gecikme		12	E-gecikme		12
F-gecikme		22	F-gecikme		22	F-gecikme		22
G-gecikme		0	G-gecikme		0	G-gecikme		0
K-gecikme		1	K-gecikme		1	K-gecikme		1
S-gecikme		2	S-gecikme		2	S-gecikme		2
Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240
Süre		94329	Süre		89930	Süre		93495
Parça-10		D=9	Parça-11		D=10	Parça-12		D=11
Makro Moment		5742	Makro Moment		5664	Makro Moment		5608
A-gecikme		3	A-gecikme		3	A-gecikme		3
C-gecikme		0	C-gecikme		0	C-gecikme		0
D-gecikme		9	D-gecikme		10	D-gecikme		11
E-gecikme		0	E-gecikme		0	E-gecikme		0
F-gecikme		19	F-gecikme		19	F-gecikme		19
G-gecikme		0	G-gecikme		0	G-gecikme		0
K-gecikme		1	K-gecikme		2	K-gecikme		3
S-gecikme		0	S-gecikme		0	S-gecikme		0
Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240
Süre		90454	Süre		87142	Süre		90439
	Parça-13		D=12	Parça-14		D=13		
	Makro Moment		5618	Makro Moment		5654		
	A-gecikme		3	A-gecikme		3		
	C-gecikme		0	C-gecikme		0		
	D-gecikme		12	D-gecikme		13		
	E-gecikme		0	E-gecikme		0		
	F-gecikme		19	F-gecikme		19		
	G-gecikme		0	G-gecikme		0		
	K-gecikme		4	K-gecikme		0		
	S-gecikme		0	S-gecikme		0		
	Arama Uzayı		10965240	Arama Uzayı		10965240		
	Süre		89524	Süre		86285		

Şekil 5.96. Proje 21 paralel hat parça sonuçları

Her bir arama uzayı sayısı 10.965.240, süre ise 26,20 saattir. 14 serinin moment sonuçları karşılaştırılarak minimum moment değerine sahip olan paralellik koşulu temel alınarak analize devam edilmiştir.

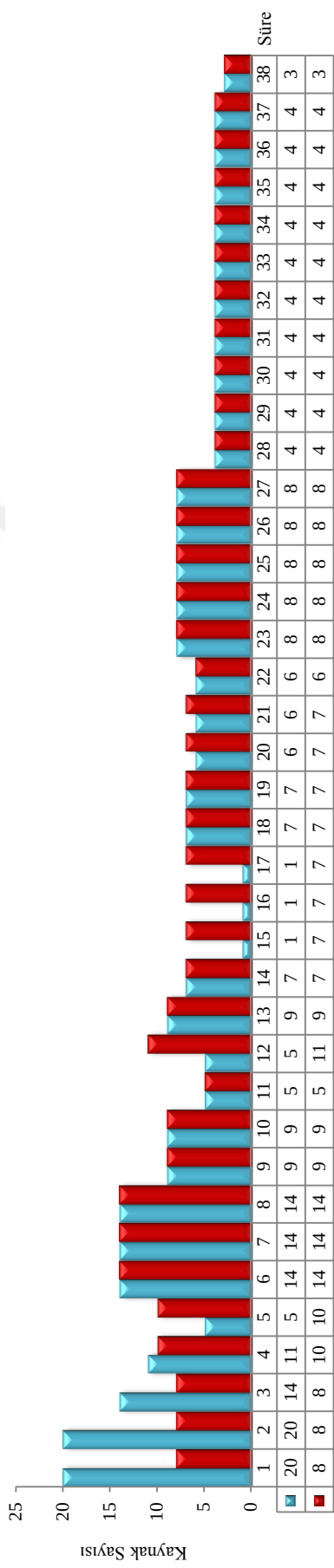
Çizelge 5.86. Paralel parça moment değerleri

Parçalar	Moment Değeri	Arama Uzayı
1	5640	10.965.240
2	5658	10.965.240
3	5680	10.965.240
4	5662	10.965.240
5	5760	10.965.240
6	5858	10.965.240
7	5858	10.965.240
8	5782	10.965.240
9	5706	10.965.240
10	5742	10.965.240
11	5664	10.965.240
12	5608	10.965.240
13	5618	10.965.240
14	5654	10.965.240
Minimum Moment	5608	153.513.360

Çizelge 5.87. Proje 21 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

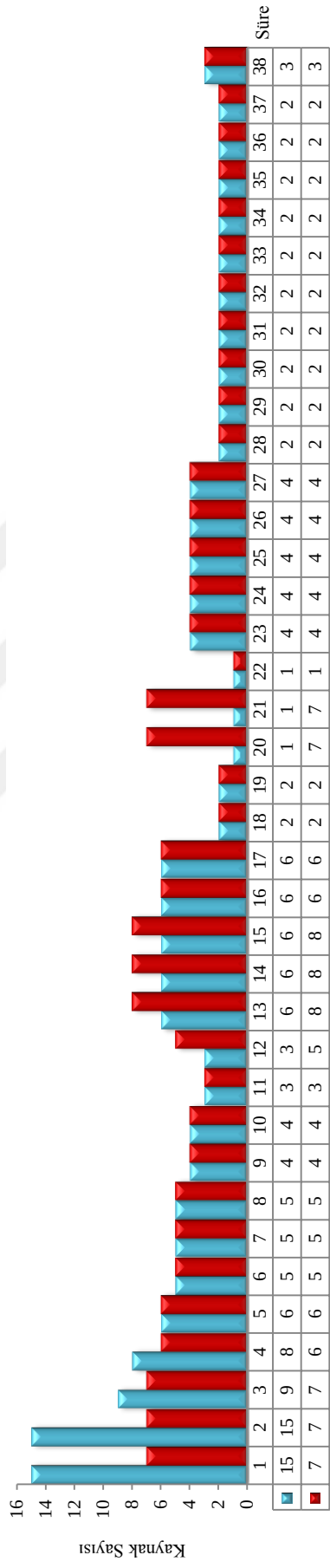
A-gecikme	3
C-gecikme	0
D-gecikme	11
E-gecikme	0
F-gecikme	19
G-gecikme	0
K-gecikme	3
S-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	153.513.360
Hesaplama süresi (saat)	26,20
Başlangıç moment değeri	6576
Optimum moment değeri	5608

Arama uzayı sayısı 153.513.360 olan bir projeyi 26,20 saat, A aktivitesini 3, C aktivitesini 0, D aktivitesini 11, E aktivitesini 0, F aktivitesini 19, G aktivitesini 0, K aktivitesini 3 ve S aktivitesini 2 gün erteleterek elde edilebilecek en iyi moment değeri hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



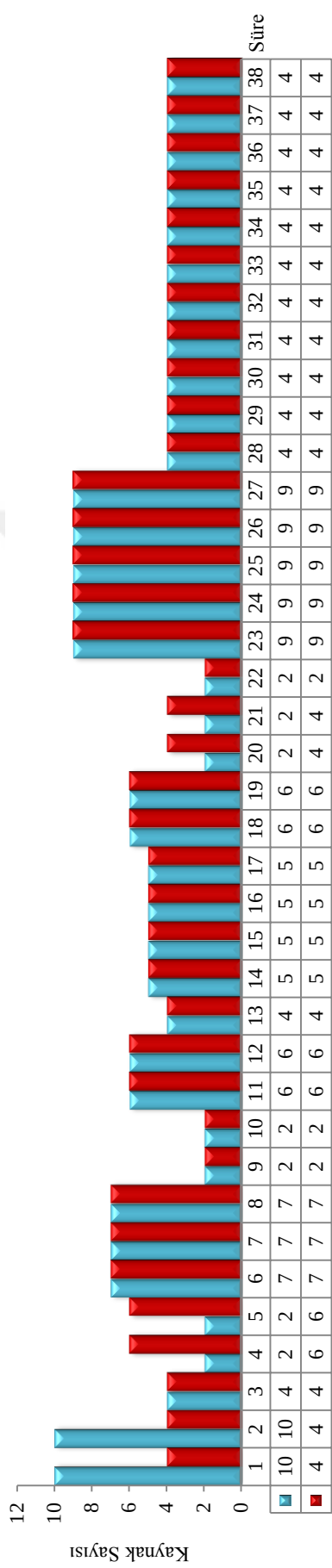
Şekil 5.97. Proje 21 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 20'den 14'e düşmüştür.



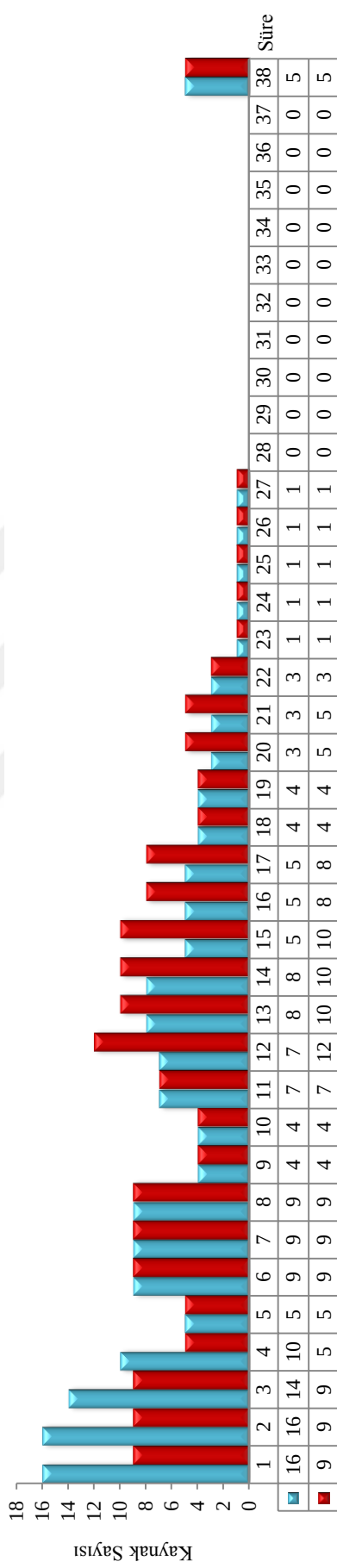
Şekil 5.98. Proje 21 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 15'ten 8'e düşmüştür.



Şekil 5.99. Proje 21 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 10'dan 9'a düşmüştür.

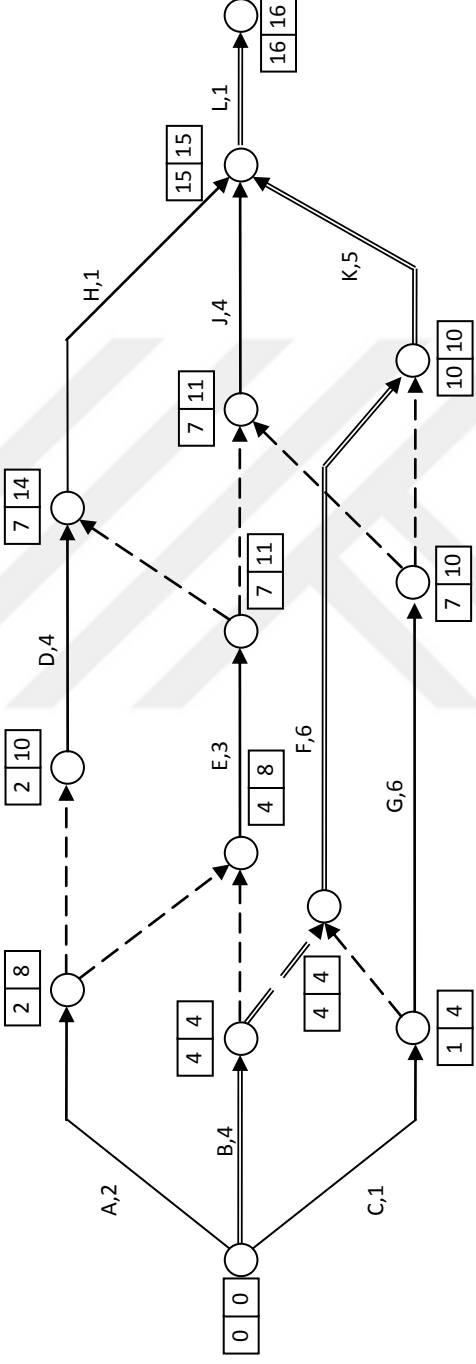


Şekil 5.100. Proje 21 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 12'ye düşmüştür.

5.22. Proje 22 (Harris, 1990)

11 aktiviteden oluşan projenin şebeke ok diyagramı Şekil 5.101'de sunulmuştur. Proje B-F-K-L kritik hatı ve birbirine bağımlı 7 aktivitenin oluşturduğu A-C-D-E-G-H-J bolluk sahibi hattı oluşmaktadır.



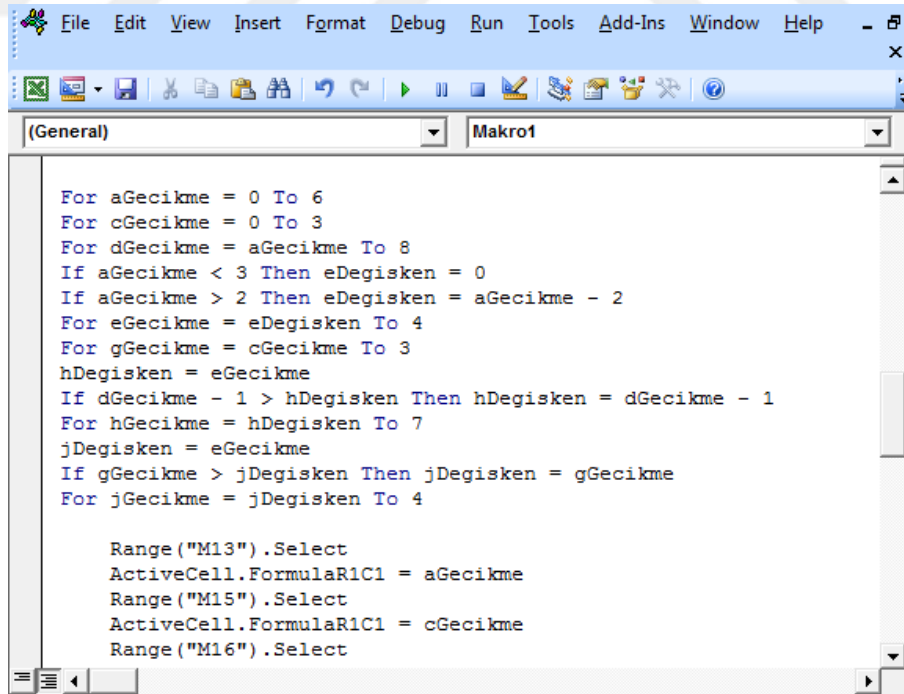
Şekil 5.101. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.88. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	8	2	0	6
B	4	-	0	0	4	4	1	0	0
C	1	-	0	0	1	4	4	0	3
D	4	A	2	8	7	14	4	1	8
E	3	A-B	4	8	7	11	2	0	4
F	6	B-C	4	4	10	10	4	0	0
G	6	C	1	4	7	10	6	0	3
H	1	D-E	7	14	15	15	0	7	7
J	4	E-G	7	11	15	15	2	4	4
K	5	F-G	10	10	15	15	1	0	0
L	1	H-J-K	15	15	16	16	2	0	0

Bu projede olduğu gibi birbirine bağımlı bolluk sahibi aktivitelerin sayısının fazla olması, projenin elle arama uzayı hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. El ile hesabın makul olmadığı projelerde arama uzayı sayısı HCU yardımı ile belirlenmiştir.

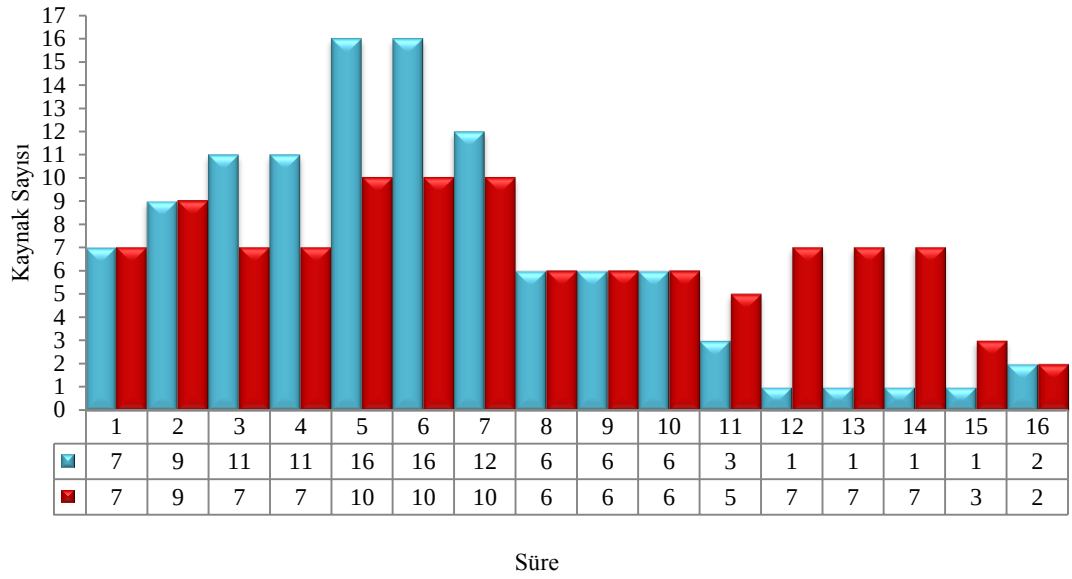
HCU işlemleri:



Şekil 5.102. Proje 22 makro

Çizelge 5.89. Proje 22 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

A-gecikme	0
C-gecikme	0
D-gecikme	8
E-gecikme	3
G-gecikme	0
H-gecikme	7
J-gecikme	4
Arama uzayı sayısı	14364
Hesaplama süresi (sn)	97
Başlangıç moment değeri	1153
Optimum moment değeri	821

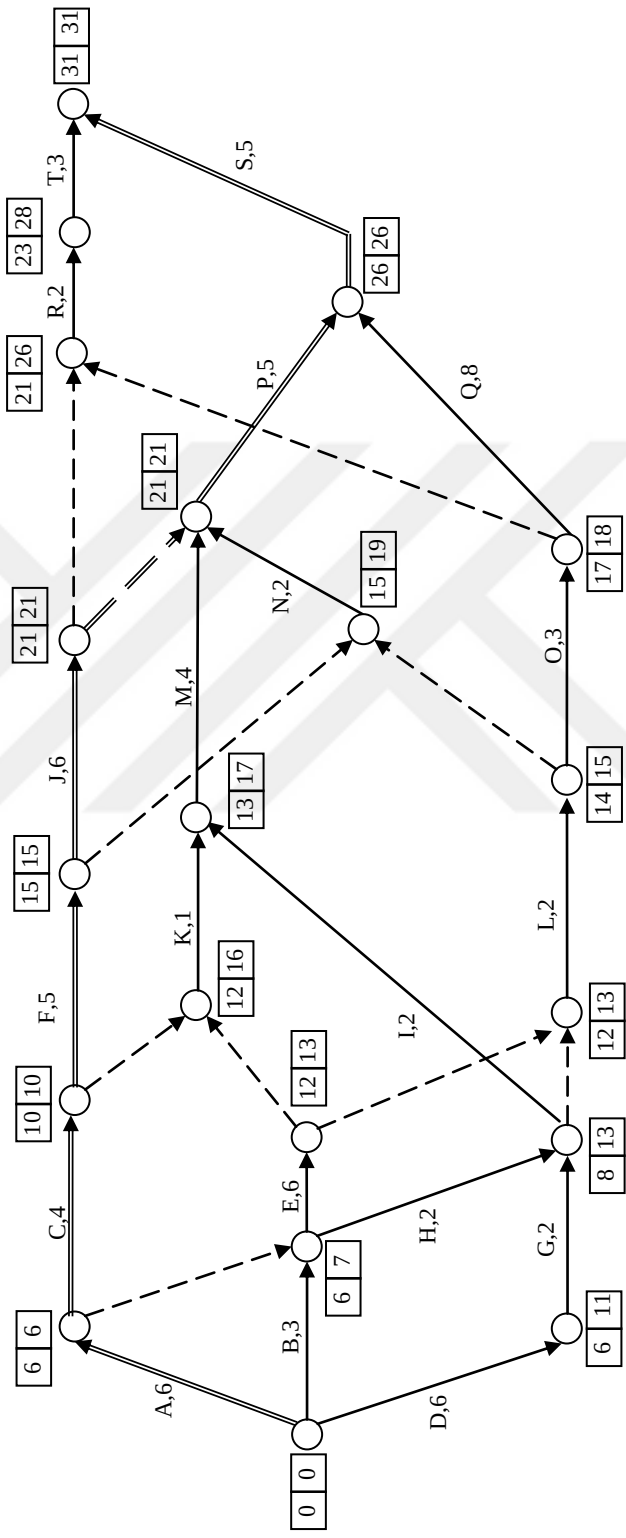


Şekil 5.103. Proje 22 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 10'a düşmüştür.

5.23. Proje 23 (El Rayes and Jun, 2009)

20 aktiviteden oluşan projede, şebeke ok diyagramı Şekil 5.104'te sunulduğu gibi kritik olmayan birbirine bağımlı 14 ve kritik 6 aktiviteden oluşmaktadır.



Şekil 5.104. Şebeke ok diyagramı

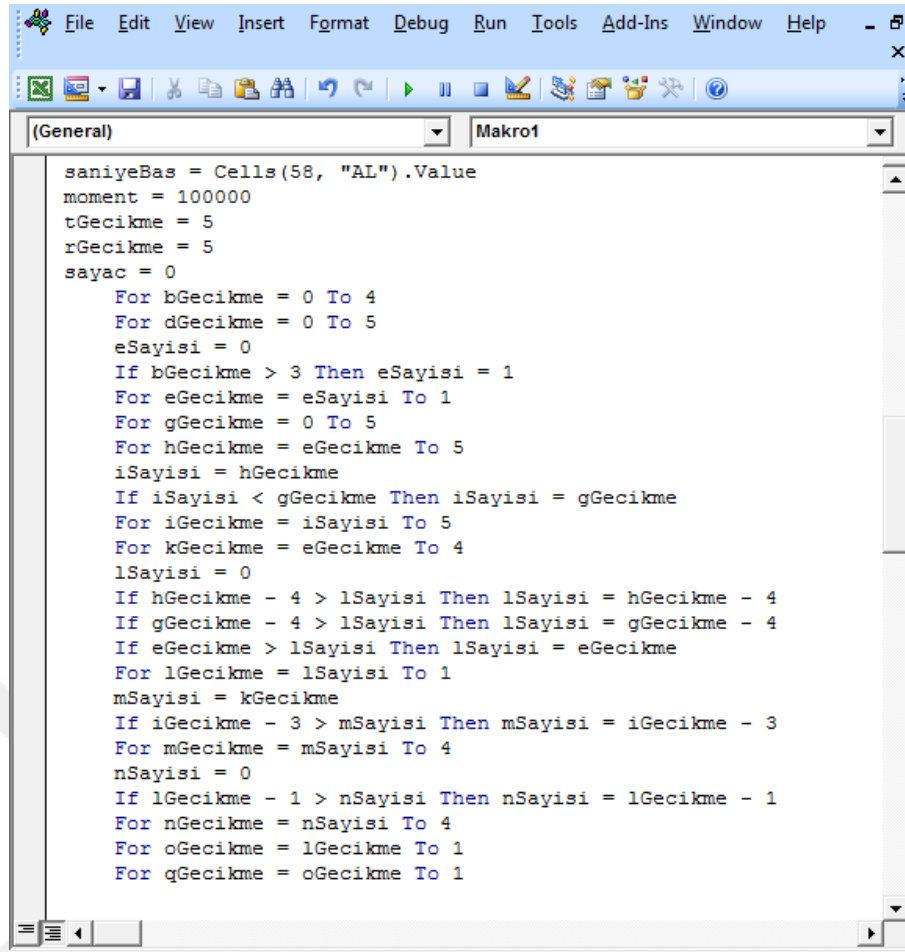
Çizelge 5.90. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	6	-	0	0	6	6	2	0	0
B	3	-	0	0	6	7	3	3	4
C	4	A	6	6	10	10	2	0	0
D	6	-	0	0	6	11	5	0	5
E	6	A-B	6	7	12	13	3	0	1
F	5	C	10	10	15	15	9	0	0
G	2	D	6	11	8	13	3	0	5
H	2	A-B	6	7	8	13	0	0	5
I	2	G-H	8	13	13	17	3	3	7
J	6	F	15	15	21	21	6	0	0
K	1	C-E	12	16	13	17	4	0	4
L	2	E-G-H	12	13	14	15	8	0	1
M	4	I-K	13	17	21	21	3	4	4
N	2	F-L	15	19	21	21	3	4	4
O	3	L	14	15	17	18	6	0	1
P	5	J-M-N	21	21	26	26	4	0	0
Q	8	O	17	18	26	26	1	1	1
R	2	J-O	21	26	23	28	5	0	5
S	5	P-Q	26	26	31	31	2	0	0
T	3	R	23	28	31	31	5	5	5

Bu projede olduğu gibi birbirine bağımlı bolluk sahibi aktivitelerin sayısının fazla olması, projenin elle arama uzayı hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. El ile hesabın makul olmadığı projelerde arama uzayı sayısı HCU yardımı ile belirlenmiştir.

HCU işlemleri:

Bu problemin çözümünde Paralel Programlama yöntemi kullanıldı.



Şekil 5.105. Proje 23 makro

Toplam kombinasyon hesabında 21 gün erteleme ihtimaline sahip R-T hattı 21 farklı komut serisine parçalandı. Komut serisi sonuçları:

Parça-1	r=0 ve t=0	Parça-2	r=0 ve t=1	Parça-3	r=0 ve t=2
Makro Moment	3209	Makro Moment	3179	Makro Moment	3149
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	0	R-gecikme	0	R-gecikme	0
T-gecikme	0	T-gecikme	1	T-gecikme	2
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7050	Süre	7059	Süre	7358
Parça-4	r=0 ve t=3	Parça-5	r=0 ve t=4	Parça-6	r=0 ve t=5
Makro Moment	3119	Makro Moment	3119	Makro Moment	3119
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	0	R-gecikme	0	R-gecikme	0
T-gecikme	3	T-gecikme	4	T-gecikme	5
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7392	Süre	7414	Süre	7327
Parça-7	r=1 ve t=1	Parça-8	r=1 ve t=2	Parça-9	r=1 ve t=3
Makro Moment	3179	Makro Moment	3149	Makro Moment	3119
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	1	R-gecikme	1	R-gecikme	1
T-gecikme	1	T-gecikme	2	T-gecikme	3
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7429	Süre	7372	Süre	7452
Parça-10	r=1 ve t=4	Parça-11	r=1 ve t=5	Parça-12	r=2 ve t=2
Makro Moment	3119	Makro Moment	3119	Makro Moment	3149
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	1	R-gecikme	1	R-gecikme	2
T-gecikme	4	T-gecikme	5	T-gecikme	2
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7167	Süre	7429	Süre	7404

Şekil 5.106. Proje 23 paralel hat parça sonuçları

Parça-13	r=2 ve t=3	Parça-14	r=2 ve t=4	Parça-15	r=2 ve t=5
Makro Moment	3119	Makro Moment	3119	Makro Moment	3119
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	2	R-gecikme	2	R-gecikme	2
T-gecikme	3	T-gecikme	4	T-gecikme	5
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7207	Süre	7358	Süre	7171
Parça-16	r=3 ve t=3	Parça-17	r=3 ve t=4	Parça-18	r=3 ve t=5
Makro Moment	3119	Makro Moment	3119	Makro Moment	3119
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	3	R-gecikme	3	R-gecikme	3
T-gecikme	3	T-gecikme	4	T-gecikme	5
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7332	Süre	7086	Süre	7012
Parça-19	r=4 ve t=4	Parça-20	r=4 ve t=5	Parça-21	r=5 ve t=5
Makro Moment	3089	Makro Moment	3089	Makro Moment	3059
B-gecikme	0	B-gecikme	0	B-gecikme	0
D-gecikme	0	D-gecikme	0	D-gecikme	0
E-gecikme	0	E-gecikme	0	E-gecikme	0
G-gecikme	0	G-gecikme	0	G-gecikme	0
H-gecikme	0	H-gecikme	0	H-gecikme	0
I-gecikme	0	I-gecikme	0	I-gecikme	0
K-gecikme	0	K-gecikme	0	K-gecikme	0
L-gecikme	1	L-gecikme	1	L-gecikme	1
M-gecikme	4	M-gecikme	4	M-gecikme	4
N-gecikme	3	N-gecikme	3	N-gecikme	3
O-gecikme	1	O-gecikme	1	O-gecikme	1
Q-gecikme	1	Q-gecikme	1	Q-gecikme	1
R-gecikme	4	R-gecikme	4	R-gecikme	5
T-gecikme	4	T-gecikme	5	T-gecikme	5
Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340	Arama Uzayı	644340
Süre	7363	Süre	7440	Süre	7159

Şekil 5.106. Proje 23 paralel hat parça sonuçları (devam)

Her bir arama uzayı sayısı 644.340, süre ise 2,07 saattir. 21 serinin moment sonuçları karşılaştırılarak minimum moment değerine sahip olan paralellik koşulu temel alınarak analize devam edilmiştir.

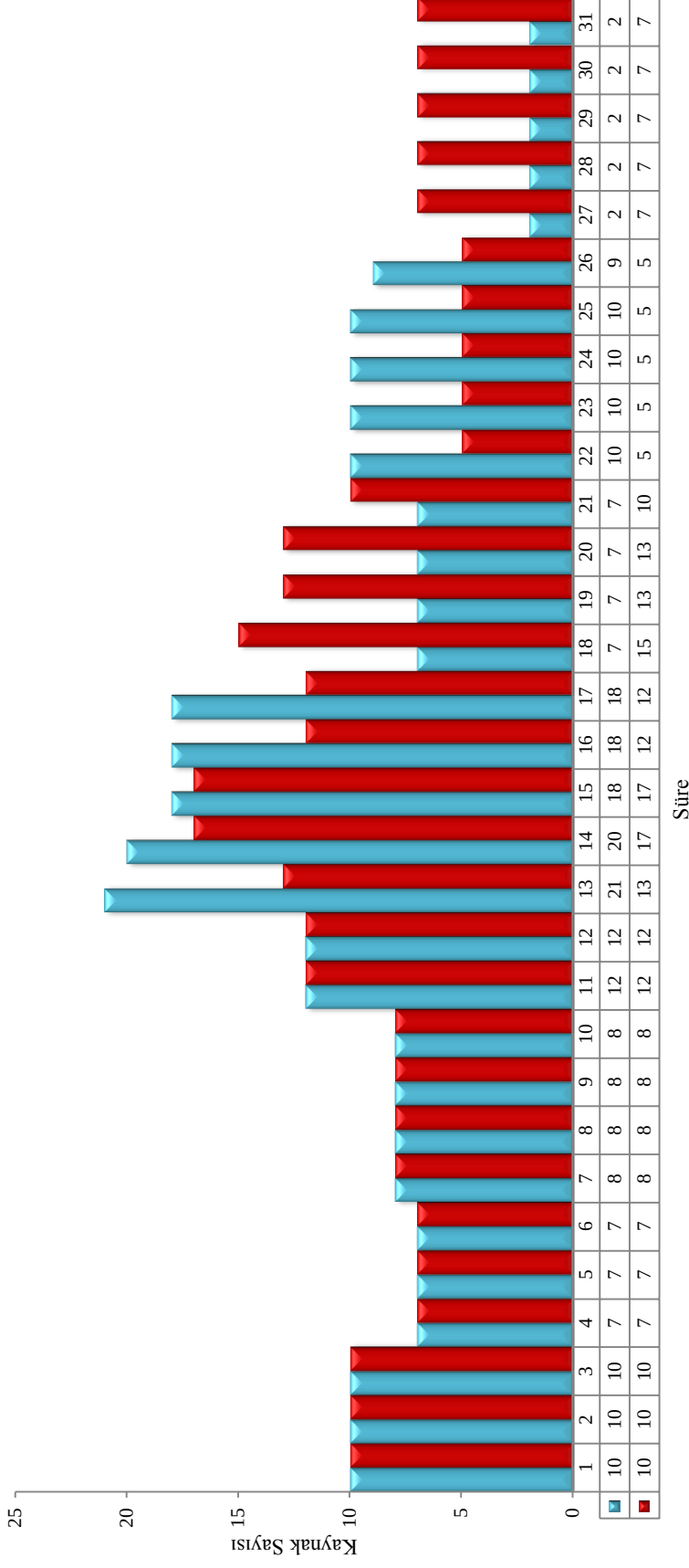
Çizelge 5.91. Paralel parça moment değerleri

Parçalar	Moment Değeri	Arama Uzayı
Parça-1	3209	644340
Parça-2	3179	644340
Parça-3	3149	644340
Parça-4	3119	644340
Parça-5	3119	644340
Parça-6	3119	644340
Parça-7	3179	644340
Parça-8	3149	644340
Parça-9	3119	644340
Parça-10	3119	644340
Parça-11	3119	644340
Parça-12	3149	644340
Parça-13	3119	644340
Parça-14	3119	644340
Parça-15	3119	644340
Parça-16	3119	644340
Parça-17	3119	644340
Parça-18	3119	644340
Parça-19	3089	644340
Parça-20	3089	644340
Parça-21	3059	644340
Minimum Moment	3059	13.531.140

Çizelge 5.92. Proje 23 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
D-gecikme	0
E-gecikme	0
G-gecikme	0
H-gecikme	0
I-gecikme	0
K-gecikme	0
L-gecikme	1
M-gecikme	4
N-gecikme	3
O-gecikme	1
Q-gecikme	1
R-gecikme	5
T-gecikme	5
Arama uzayı sayısı	13.531.140
Hesaplama süresi (saat)	2,07
Başlangıç moment değeri	3501
Optimum moment değeri	3059

Arama uzayı sayısı 13.531.140 olan bir projeyi 2,02 saatte hesaplandı. Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

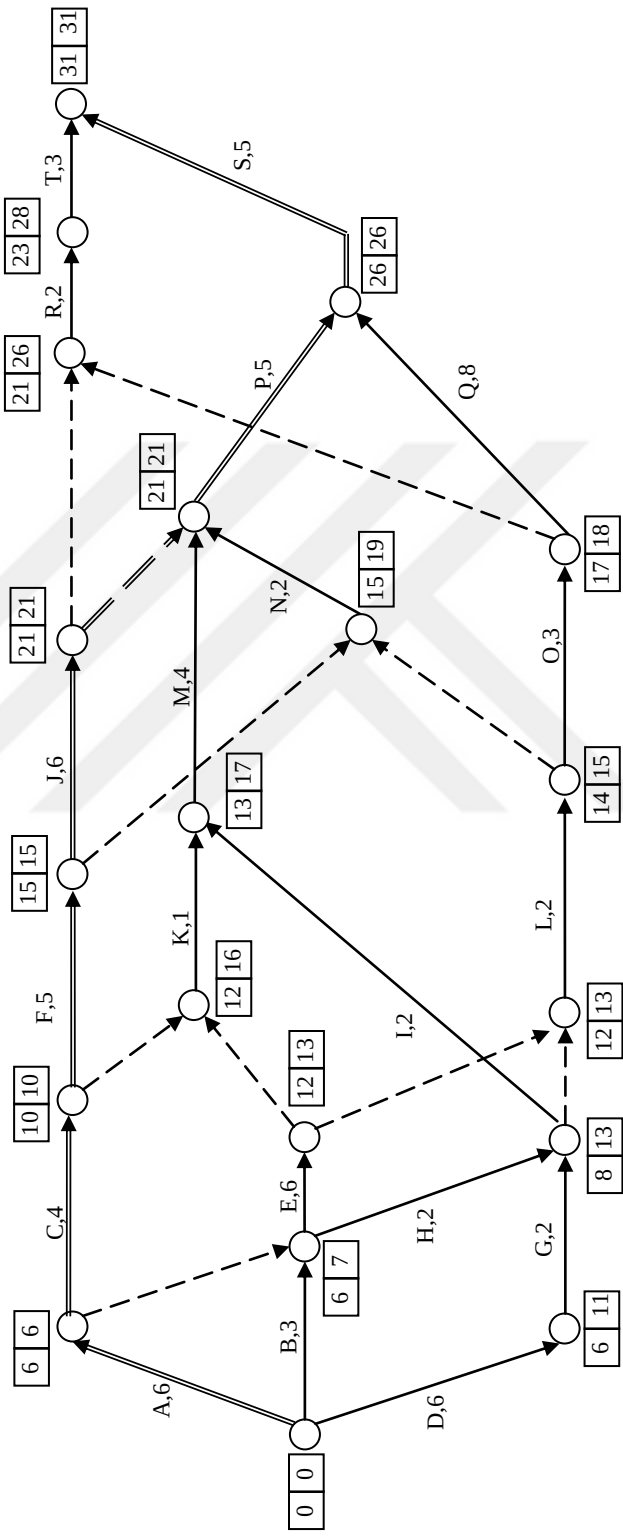


Şekil 5.107. Proje 23 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 21'den 17'ye düşmüştür.

5.24. Proje 24 (El Rayes and Jun, 2009)

20 aktiviteden oluşan projede, şebeke ok diyagramı Şekil 5.108'de sunulduğu gibi kritik olmayan birbirine bağımlı 14 ve kritik 6 aktiviteden oluşmaktadır. Proje 23'ün kaynak sayısı dışında benzeridir.



Şekil 5.108. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.93. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	6	-	0	0	6	6	2	5	8	7	0	0
B	3	-	0	0	6	7	3	0	3	8	3	4
C	4	A	6	6	10	10	2	3	0	6	0	0
D	6	-	0	0	6	11	5	1	5	8	0	5
E	6	A-B	6	7	12	13	3	0	9	2	0	1
F	5	C	10	10	15	15	9	0	9	2	0	0
G	2	D	6	11	8	13	3	2	5	4	0	5
H	2	A-B	6	7	8	13	0	9	6	7	0	5
I	2	G-H	8	13	13	17	3	2	1	4	3	7
J	6	F	15	15	21	21	6	0	2	4	0	0
K	1	C-E	12	16	13	17	4	6	5	4	0	4
L	2	E-G-H	12	13	14	15	8	0	0	2	0	1
M	4	I-K	13	17	21	21	3	9	9	7	4	4
N	2	F-L	15	19	21	21	3	4	9	3	4	4
O	3	L	14	15	17	18	6	8	2	2	0	1
P	5	J-M-N	21	21	26	26	4	9	4	3	0	0
Q	8	O	17	18	26	26	1	2	9	3	1	1
R	2	J-O	21	26	23	28	5	9	1	4	0	5
S	5	P-Q	26	26	31	31	2	5	6	4	0	0
T	3	R	23	28	31	31	5	9	1	9	5	5

Bu projede olduğu gibi birbirine bağımlı bolluk sahibi aktivitelerin sayısının fazla olması, projenin elle arama uzayı hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. El ile hesabın makul olmadığı projelerde arama uzayı sayısı HCU yardımı ile belirlenmiştir.

HCU işlemleri: Bu problemin çözümünde Paralel Programlama yöntemi kullanıldı. Proje 23'ten farkı 4 kaynağa sahip olmasıdır. Makro kodlaması aynıdır.

Çizelge 5.94. Paralel parça moment değerleri

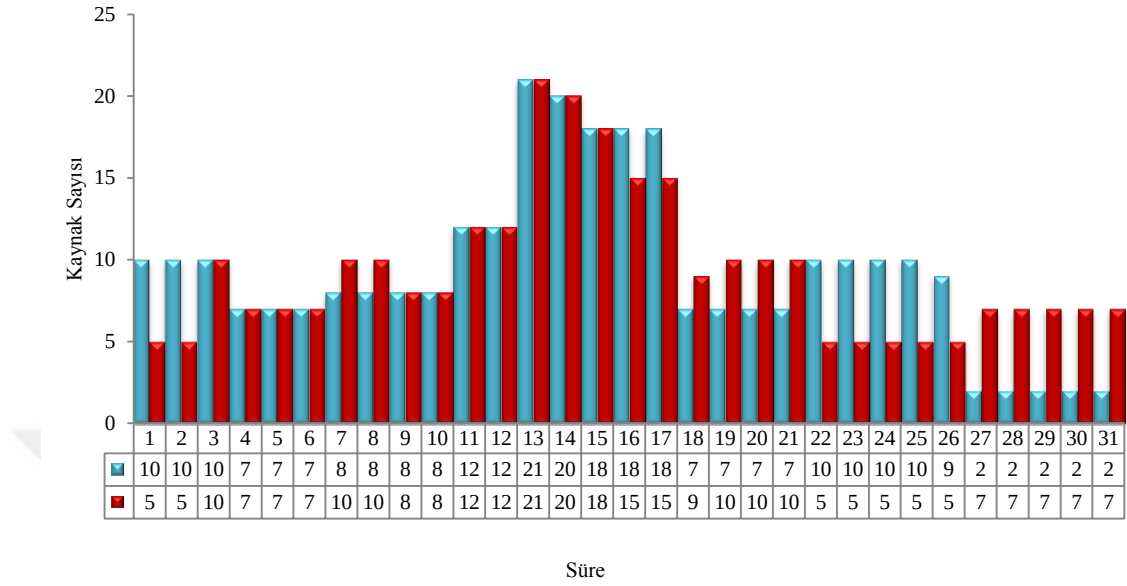
Parçalar	Moment Değeri	Arama Uzayı
Parça-1	17778	644340
Parça-2	17590	644340
Parça-3	17402	644340
Parça-4	17214	644340
Parça-5	17214	644340
Parça-6	17214	644340
Parça-7	17590	644340
Parça-8	17402	644340
Parça-9	17214	644340
Parça-10	17214	644340
Parça-11	17214	644340
Parça-12	17402	644340
Parça-13	17214	644340
Parça-14	17214	644340
Parça-15	17214	644340
Parça-16	17214	644340
Parça-17	17214	644340
Parça-18	17214	644340
Parça-19	17046	644340
Parça-20	17046	644340
Parça-21	16878	644340
Minimum Moment	16878	13.531.140

Her bir arama uzayı sayısı 644.340 ve süre ise 2,52 saattir. 21 serinin moment sonuçları karşılaştırılarak minimum moment değerine sahip olan paralellik koşulu temel alınarak analize devam edilmiştir.

Çizelge 5.95. Proje 24 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

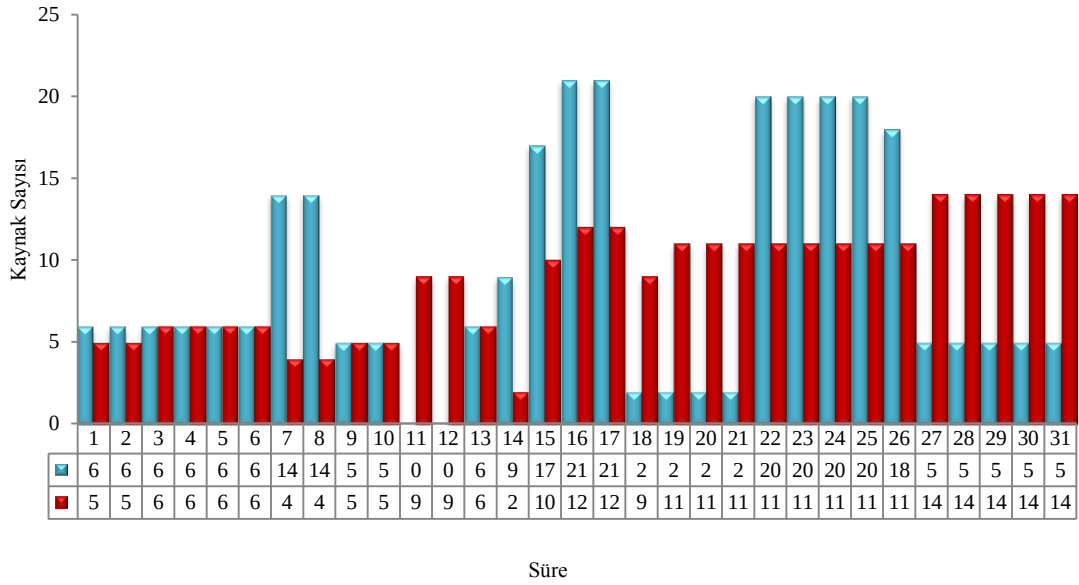
B-gecikme	0	O-gecikme	0
D-gecikme	2	Q-gecikme	1
E-gecikme	0	R-gecikme	5
G-gecikme	2	T-gecikme	5
H-gecikme	4	Arama uzayı sayısı	13.531.140
I-gecikme	5	Hesaplama süresi (saat)	2,52
K-gecikme	0	Başlangıç moment değeri	18988
L-gecikme	0	Optimum moment değeri	16878
M-gecikme	4		
N-gecikme	0		

Bu ertelemeler temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



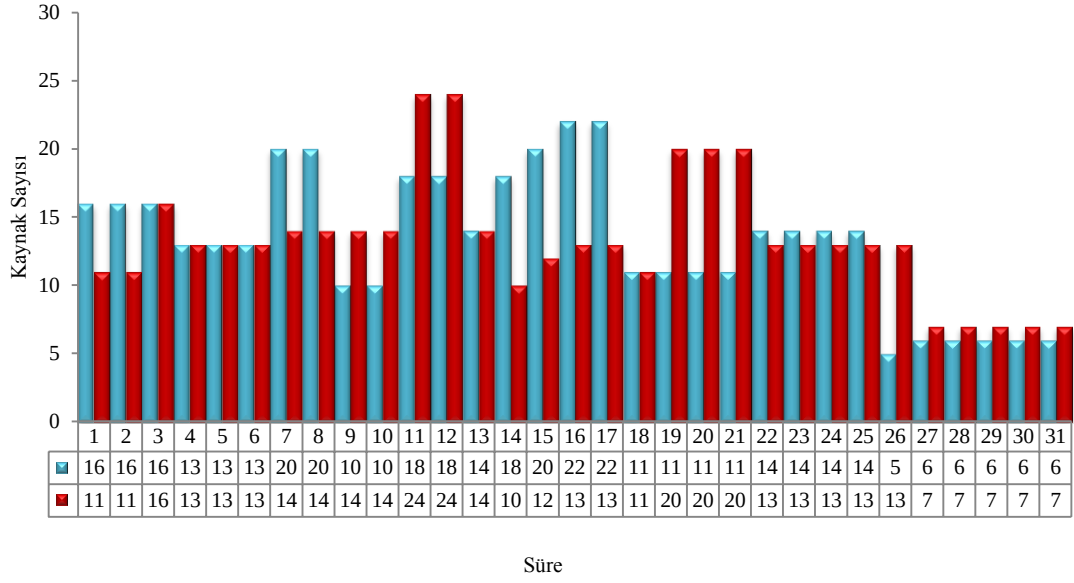
Şekil 5.109. Proje 24 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.



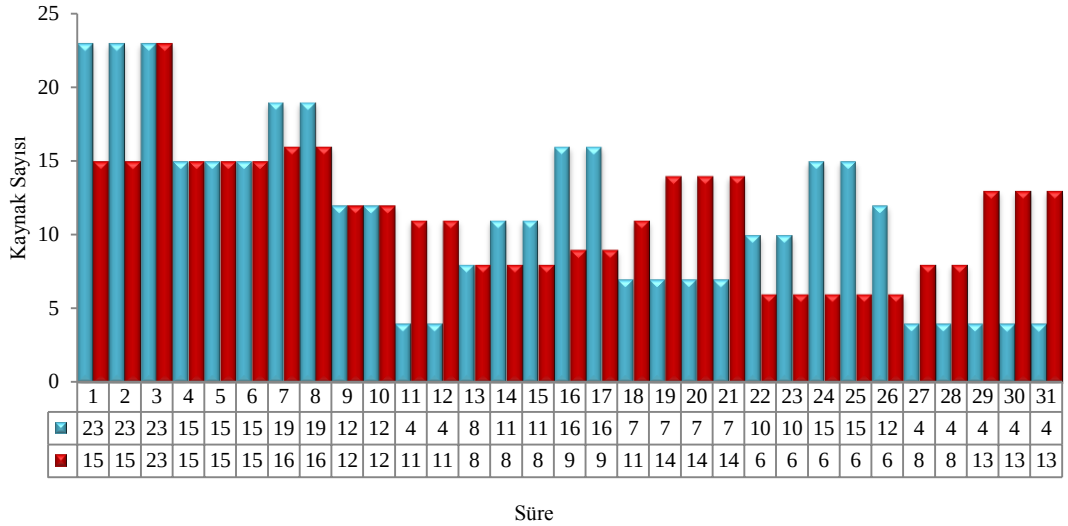
Şekil 5.110. Proje 24 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 21'den 14'e düşmüştür.



Şekil 5.111. Proje 24 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 22'den 24'e çıkmıştır.

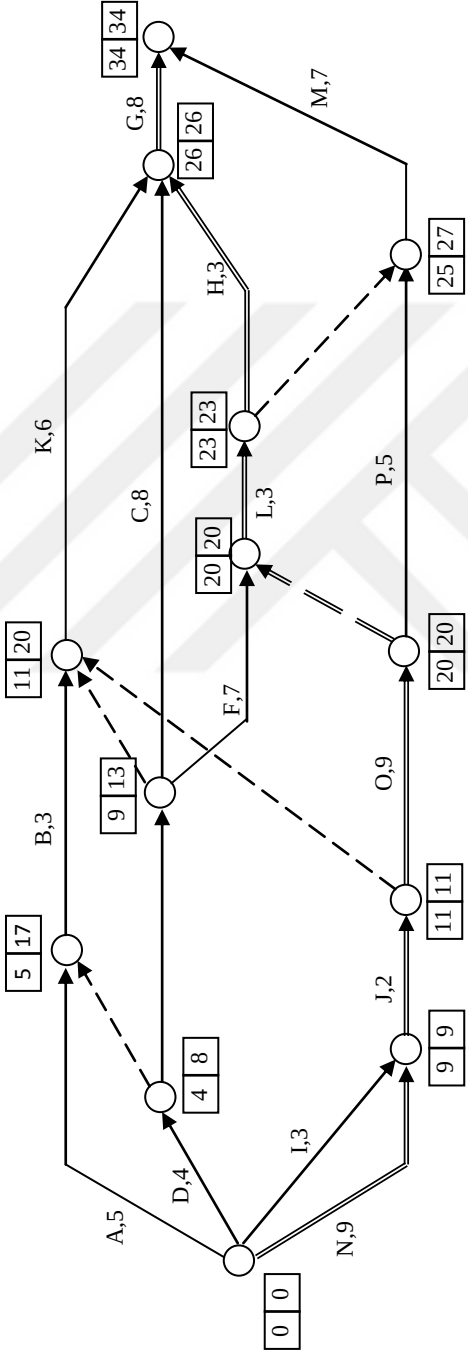


Şekil 5.112. Proje 24 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.

5.25. Proje 25 (Mutlu, 2010)

16 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak oluşturulan şebeke ok diyagramı Şekil 5.113'te sunulmuştur.



Şekil 5.113. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.96. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZi	GOZi	EOZj	GOZj	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	5	-	0	0	5	17	4	2	2	2	0	12
B	3	A-D	5	17	11	20	3	4	1	0	3	12
C	8	E	9	13	26	26	4	1	3	4	9	9
D	4	-	0	0	4	8	6	4	1	0	0	4
E	5	D	4	8	9	13	5	2	6	6	0	4
F	7	E	9	13	20	20	5	2	6	5	4	4
G	8	C-H-K	26	26	34	34	1	6	2	1	0	0
H	3	L	23	23	26	26	6	1	0	3	0	0
I	3	-	0	0	9	9	6	2	5	5	6	6
J	2	I-N	9	9	11	11	5	2	3	0	0	0
K	6	B-E-J	11	20	26	26	4	2	6	3	9	9
L	3	F-O	20	20	23	23	6	1	6	5	0	0
M	7	L-P	25	27	34	34	5	6	3	1	2	2
N	9	-	0	0	9	9	2	2	3	3	0	0
O	9	J	11	11	20	20	4	4	6	5	0	0
P	5	O	20	20	25	27	1	6	2	4	0	2

Çizelge 5.97. D-B-E-K-C-F-A hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

D	B	E	K	C	F	A	K. Sayısı
0	0	0	$0 \leq K \leq 9$	$0 \leq C \leq 9$	$0 \leq F \leq 4$	0	500
	1	0	$1 \leq K \leq 9$	$0 \leq C \leq 9$	$0 \leq F \leq 4$	0-1	900
	2	0	$2 \leq K \leq 9$	$0 \leq C \leq 9$	$0 \leq F \leq 4$	0-1-2	1200
	3	0	$3 \leq K \leq 9$	$0 \leq C \leq 9$	$0 \leq F \leq 4$	0-1-2-3	1400
1	1	1	$1 \leq K \leq 9$	$1 \leq C \leq 9$	$1 \leq F \leq 4$	0-1	648
	2	1	$2 \leq K \leq 9$	$1 \leq C \leq 9$	$1 \leq F \leq 4$	0-1-2	864
	3	1	$3 \leq K \leq 9$	$1 \leq C \leq 9$	$1 \leq F \leq 4$	0-1-2-3	1008
2	2	2	$2 \leq K \leq 9$	$2 \leq C \leq 9$	$2 \leq F \leq 4$	0-1-2	576
	3	2	$3 \leq K \leq 9$	$2 \leq C \leq 9$	$2 \leq F \leq 4$	0-1-2-3	672
3	3	3	$3 \leq K \leq 9$	$3 \leq C \leq 9$	$3 \leq F \leq 4$	0-1-2-3	392
Toplam							8160

Hat, birbirine bağımlı bolluğa sahip 7 aktiviteden oluşmaktadır. Arama uzayı hesabı yapılırken öncelikle aktivitelerin bağımlılığı ok diyagramı üzerinde incelenmiştir. D aktivitesinin ertelenmesi E ve B aktivitelerini etkilemektedir. E ve B aktiviteleri birleşip K aktivitesini, E aktivitesi ise tek başına C ve F aktivitelerini etkilemektedir. A aktivitesi ise B aktivitesine bağımlıdır. Bu inceleme sonucunda D aktivitesi temel alınarak ertelenme olasılıkları hesaplanmıştır. Hesaplama işlemleri Çizelge 5.97’de gösterilmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu D-B-E-K-C-F-A hattının 8160 farklı arama uzayı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.98. P-M hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

P	M
0	0-1-2
1	1-2
2	2
K. Sayısı	6

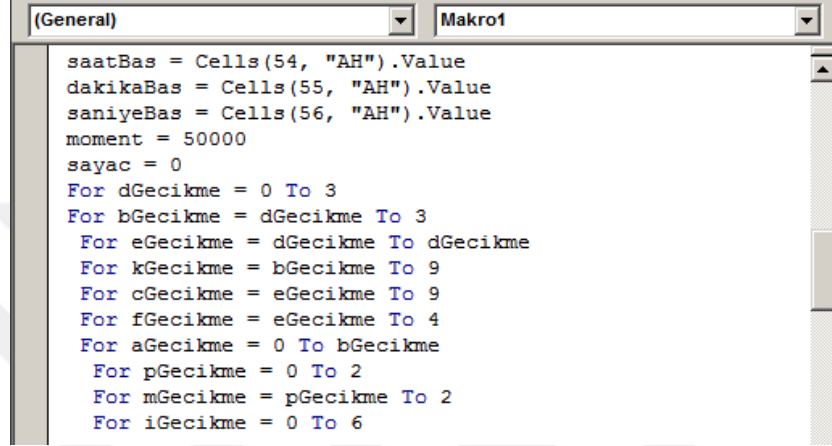
P aktivitesi 0 gün ertelenirse M aktivitesi 0-1-2 gün ertelenmekte. P aktivitesi 1 gün ertelenirse M aktivitesi 1-2 gün ertelenmekte. Görüldüğü gibi P aktivitesinin ertelenmesi M aktivitesinin ertelenmesinde kısıt oluşturmaktadır. Hesaplama sonucunda hattın arama uzayı sayısı 6 bulunmuştur.

Çizelge 5.99. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K.Sayısı
D-B-E-K-C-F-A	8160
I	7
P-M	6
Toplam	342720

Çizelge 5.99'da kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. D-B-E-K-C-F-A, I ve P-M aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez ve şebeke üzerinde oluşturulabilecek toplam geciktirme kombinasyonu sayısı, bu yolların sahip olduğu gecikme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 342720 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri:



```

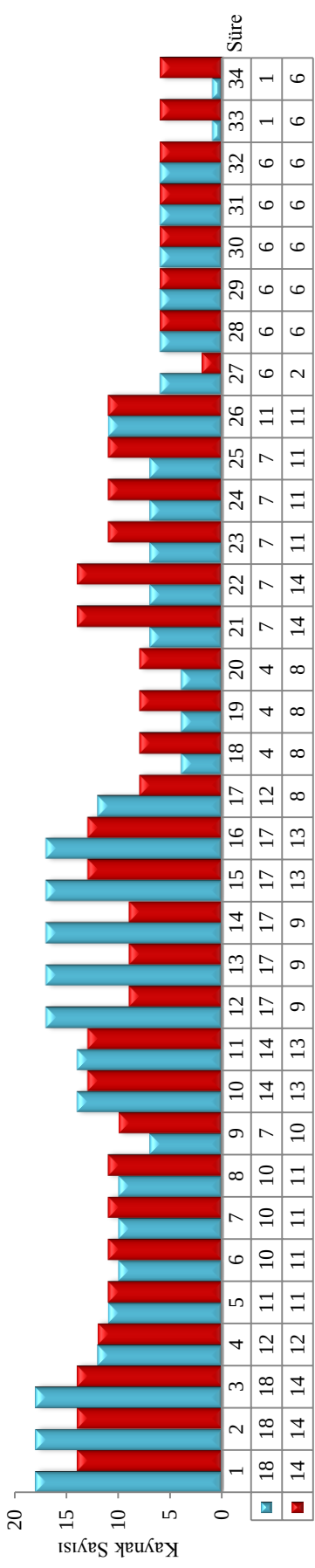
(General) Makro1
saatBas = Cells(54, "AH").Value
dakikaBas = Cells(55, "AH").Value
saniyeBas = Cells(56, "AH").Value
moment = 50000
sayac = 0
For dGecikme = 0 To 3
For bGecikme = dGecikme To 3
For eGecikme = dGecikme To dGecikme
For kGecikme = bGecikme To 9
For cGecikme = eGecikme To 9
For fGecikme = eGecikme To 4
For aGecikme = 0 To bGecikme
For pGecikme = 0 To 2
For mGecikme = pGecikme To 2
For iGecikme = 0 To 6

```

Şekil 5.114. Proje 25 makro

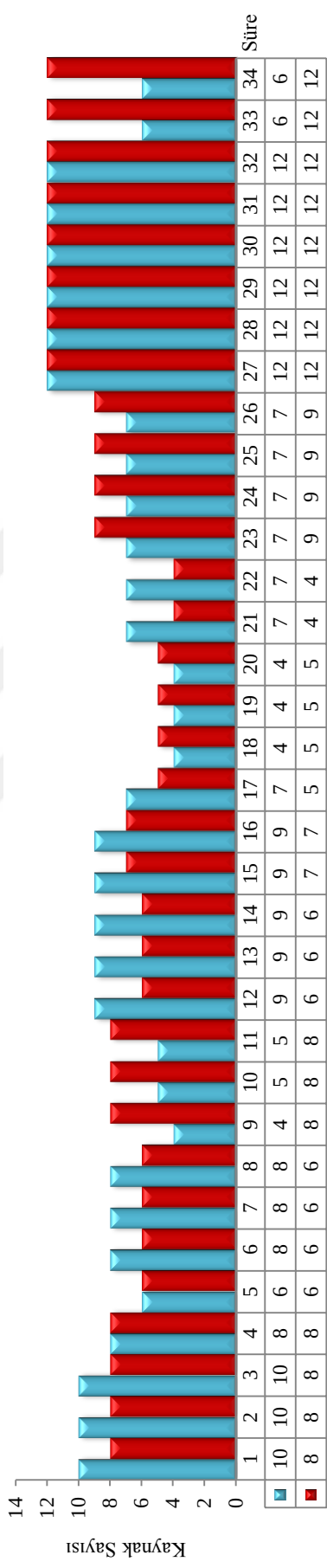
Çizelge 5.100. Proje 25 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

A-gecikme	3
B-gecikme	3
C-gecikme	5
D-gecikme	0
E-gecikme	0
F-gecikme	0
I-gecikme	0
K-gecikme	9
M-gecikme	2
P-gecikme	2
Arama uzayı sayısı	342720
Hesaplama süresi (saat)	2,23
Başlangıç moment değeri	13662
Optimum moment değeri	11960



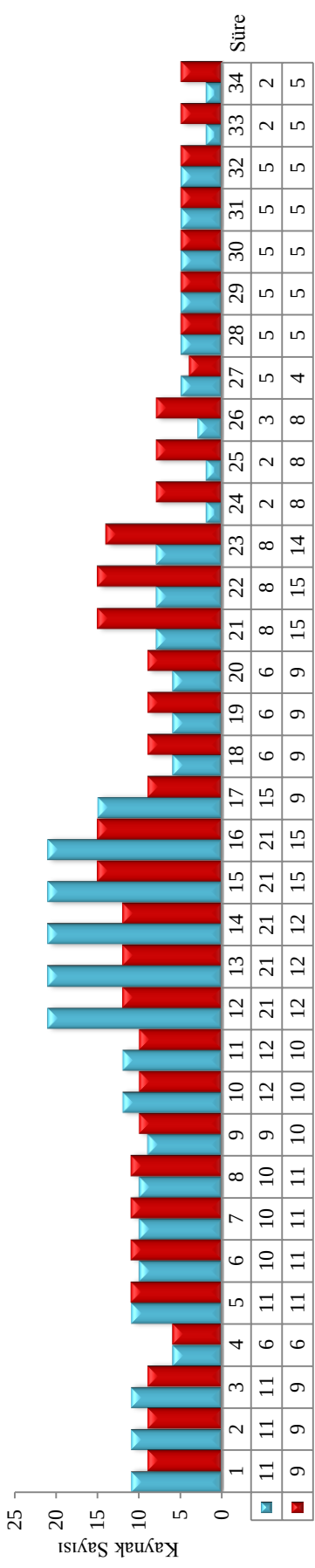
Şekil 5.115. Proje 25 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 18'den 14'e düşmüştür.



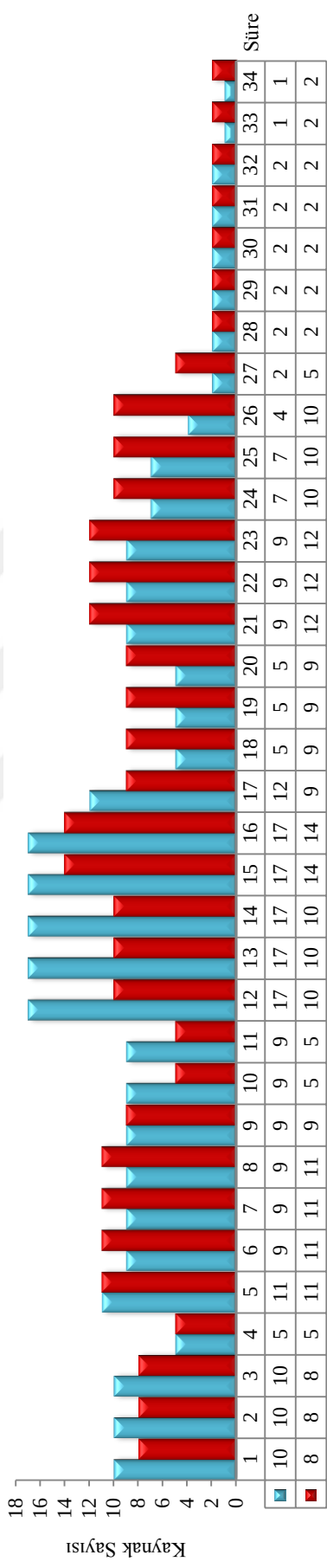
Şekil 5.116. Proje 25 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmemiştir.



Şekil 5.117. Proje 25 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 21'den 15'e düşmüştür.

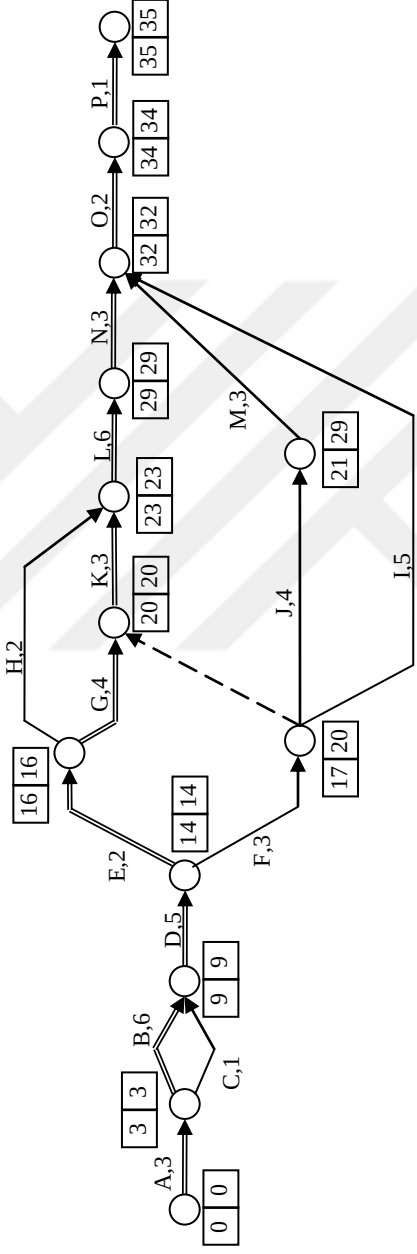


Şekil 5.118. Proje 25 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 17'den 14'e düşmüştür.

5.26. Proje 26 (Newitt, 2004)

16 aktiviteden oluşan projede, aktivitelerin bağımlılık durumu temel alınarak şebeke ok diyagramı Şekil 5.119'da sunulduğu gibi kritik olmayan C, H ve F-J-M-I hatlarından oluşmaktadır. Kritik hat A-B-D-E-G-K-L-N-O-P aktivitelerinden oluşan hattır.



Şekil 5.119. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.101. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	3	-	0	0	3	3	6	1	1	1	0	0
B	6	A	3	3	9	9	5	4	5	4	0	0
C	1	A	3	3	9	9	6	1	3	0	5	5
D	5	B-C	9	9	14	14	6	4	3	1	0	0
E	2	D	14	14	16	16	5	1	0	3	0	0
F	3	D	14	14	17	20	1	3	4	0	0	3
G	4	E	16	16	20	20	6	5	4	2	0	0
H	2	E	16	16	23	23	5	3	4	5	5	5
I	5	F	17	20	32	32	6	2	6	0	10	10
J	4	F	17	20	21	29	4	5	2	1	0	8
K	3	F-G	20	20	23	23	0	1	0	3	0	0
L	6	H-K	23	23	29	29	4	1	0	4	0	0
M	3	J	21	29	32	32	1	5	3	3	8	8
N	3	L	29	29	32	32	3	1	2	3	0	0
O	2	I-M-N	32	32	34	34	4	2	3	5	0	0
P	1	O	34	34	35	35	3	6	3	6	0	0

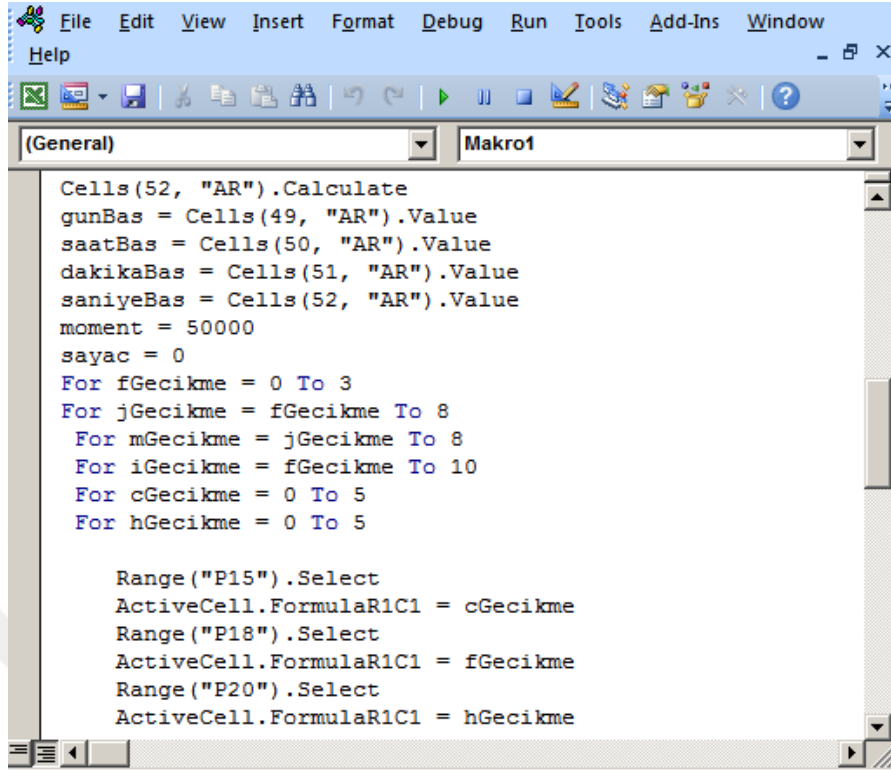
Çizelge 5.102. F-I-J-M hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

F	I	J	M	
0	$0 \leq I \leq 10$	0	$0 \leq M \leq 8$	
		1	$1 \leq M \leq 8$	
		2	$2 \leq M \leq 8$	
		3	$3 \leq M \leq 8$	
		4	$4 \leq M \leq 8$	
		5	$5 \leq M \leq 8$	
		6	$6 \leq M \leq 8$	
		7	$7 \leq M \leq 8$	
		8	$8 \leq M \leq 8$	495
1	$1 \leq I \leq 10$	1	$1 \leq M \leq 8$	
		2	$2 \leq M \leq 8$	
		3	$3 \leq M \leq 8$	
		4	$4 \leq M \leq 8$	
		5	$5 \leq M \leq 8$	
		6	$6 \leq M \leq 8$	
		7	$7 \leq M \leq 8$	
		8	$8 \leq M \leq 8$	360
2	$2 \leq I \leq 10$	2	$2 \leq M \leq 8$	
		3	$3 \leq M \leq 8$	
		4	$4 \leq M \leq 8$	
		5	$5 \leq M \leq 8$	
		6	$6 \leq M \leq 8$	
		7	$7 \leq M \leq 8$	
		8	$8 \leq M \leq 8$	252
3	$3 \leq I \leq 10$	3	$3 \leq M \leq 8$	
		4	$4 \leq M \leq 8$	
		5	$5 \leq M \leq 8$	
		6	$6 \leq M \leq 8$	
		7	$7 \leq M \leq 8$	
		8	$8 \leq M \leq 8$	168
Toplam				1275

Çizelge 5.103. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	Kombinasyon Sayısı
F-I-J-M	1275
C	6
H	6
Toplam	45900

HCU işlemleri:

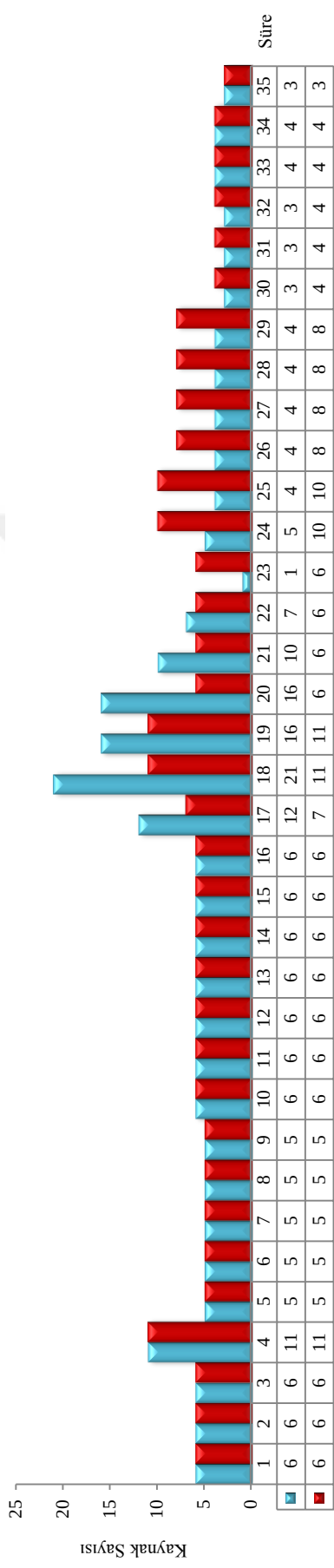


Şekil 5.120. Proje 26 makro

Çizelge 5.104. Proje 26 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

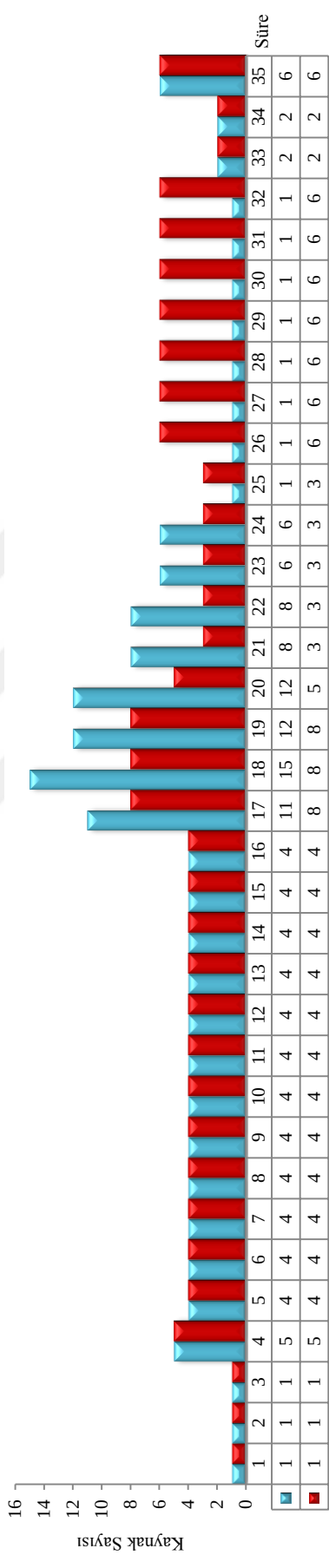
C-gecikme	0
F-gecikme	0
H-gecikme	1
I-gecikme	3
J-gecikme	8
M-gecikme	8
Arama uzayı sayısı	45.900
Hesaplama süresi (sn)	400
Başlangıç moment değeri	4874
Optimum moment değeri	3720

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



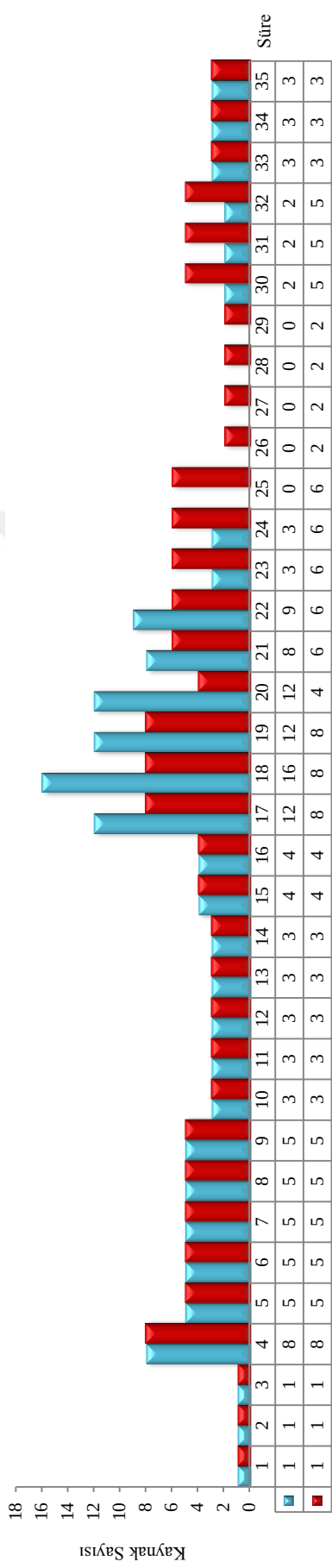
Şekil 5.121. Proje 26 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 21'den 11'e düşmüştür.



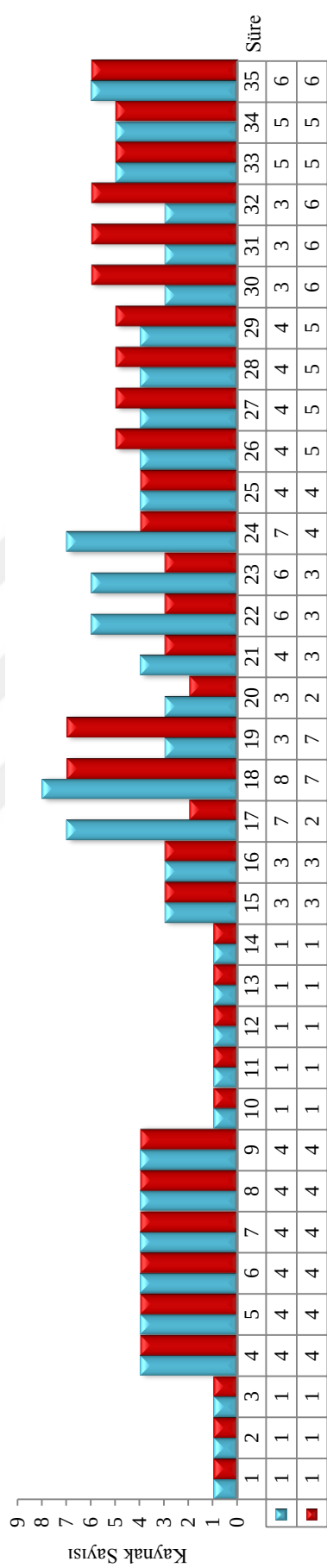
Şekil 5.122. Proje 26 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 15'ten 8'e düşmüştür.



Şekil 5.123. Proje 26 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 8'e düşmüştür.

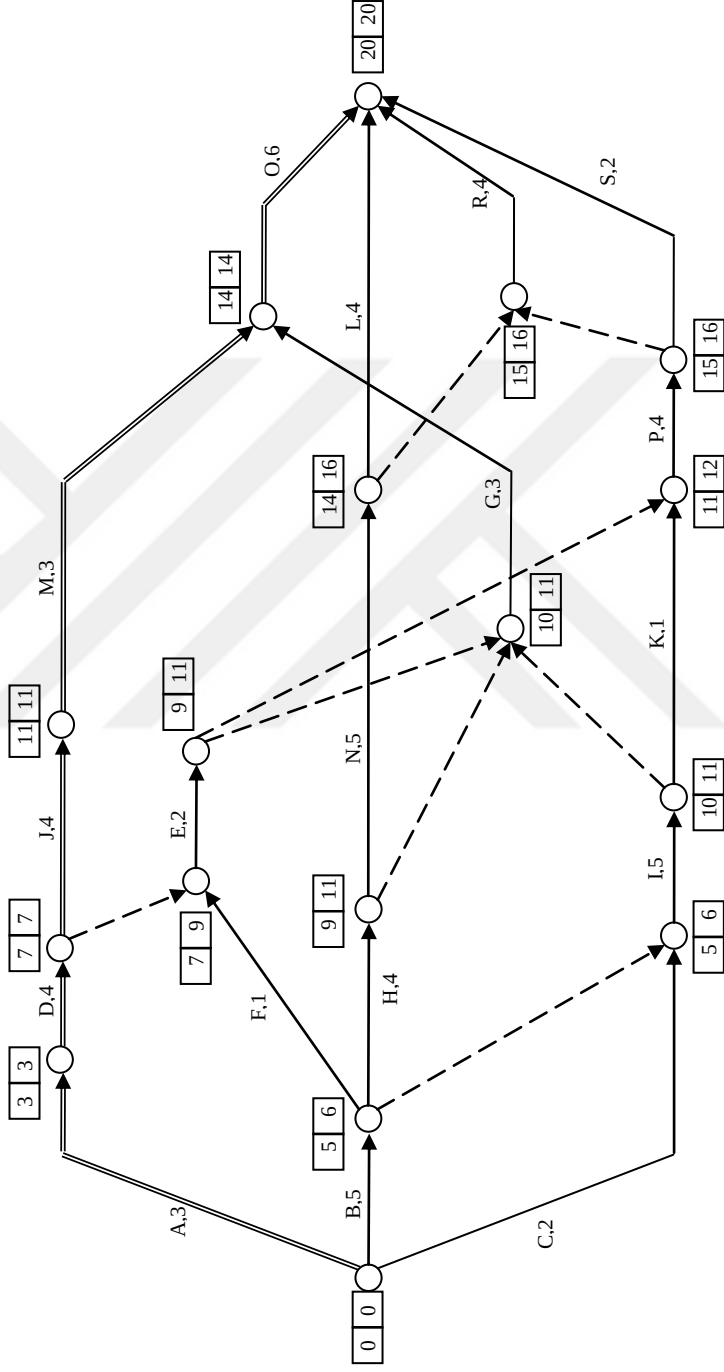


Şekil 5.124. Proje 26 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 8'den 7'ye düşmüştür.

5.27. Proje 27 (Mutlu, 2010)

18 aktiviteden oluşan proje Şekil 5.125'te verildiği gibi oluşturuldu.



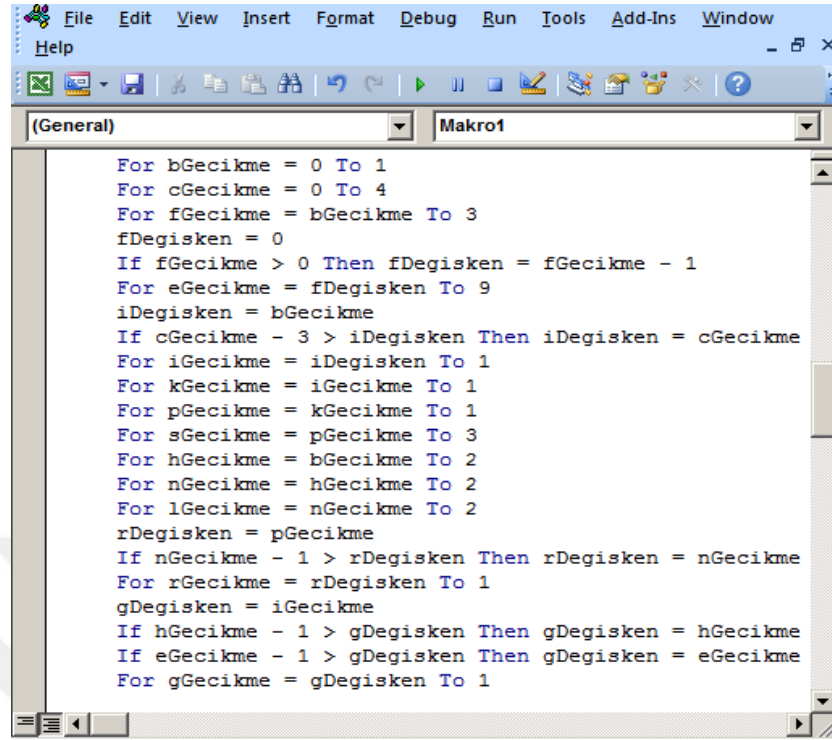
Şekil 5.125. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.105. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZi	GOZi	EOZj	GOZj	Kaynak-1	Kaynak-2	Kaynak-3	Kaynak-4	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	3	-	0	0	3	3	3	2	4	1	0	0
B	5	-	0	0	5	6	5	3	2	3	0	1
C	2	-	0	0	5	6	2	6	3	5	3	4
D	4	A	3	3	7	7	4	1	2	4	0	0
E	2	D-F	7	9	9	11	2	4	5	2	0	2
F	1	B	5	6	7	9	1	1	0	4	1	3
G	3	E-H-I	10	11	14	14	3	3	4	2	1	1
H	4	B	5	6	9	11	0	1	1	2	0	2
I	5	B-C	5	6	10	11	4	2	0	1	0	1
J	4	D	7	7	11	11	3	3	4	3	0	0
K	1	I	10	11	11	12	5	4	6	4	0	1
L	4	N	14	16	20	20	2	4	4	5	2	2
M	3	J	11	11	14	14	3	2	3	1	0	0
N	5	H	9	11	14	16	0	6	4	5	0	2
O	6	G-M	14	14	20	20	1	0	0	2	0	0
P	4	E-K	11	12	15	16	5	3	4	4	0	1
R	4	N-P	15	16	20	20	6	6	3	3	1	1
S	2	P	15	16	20	20	2	4	0	1	3	3

Bu projede olduğu gibi birbirine bağımlı bolluk sahibi aktivitelerin sayısının fazla olması, projenin elle arama uzayı hesabının yapılmasını zorlaştırmaktadır. El ile hesabın makul olmadığı projelerde arama uzayı sayısı HCU yardımı ile belirlenmiştir.

HCU işlemleri:

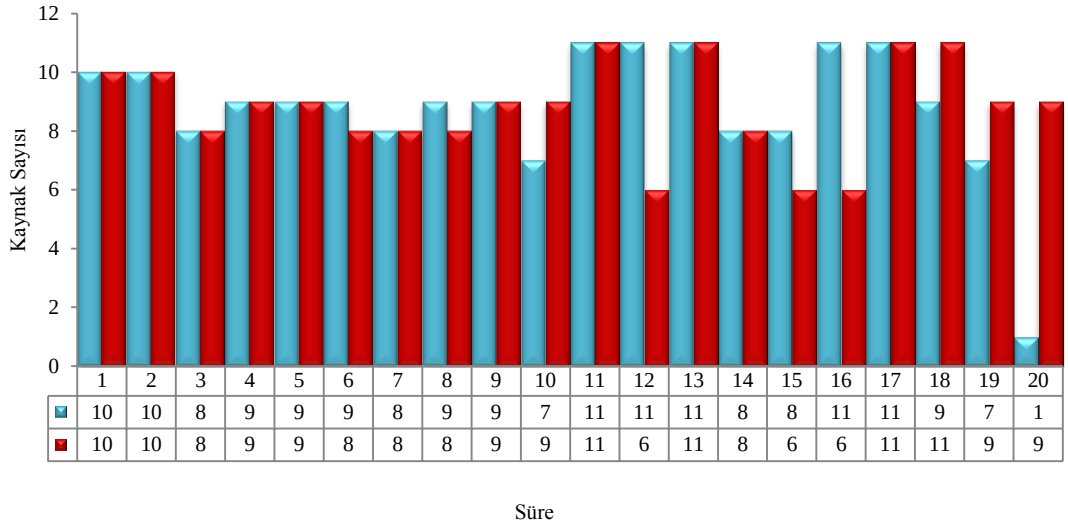


Şekil 5.126. Proje 27 makro

Çizelge 5.106. Proje 27 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

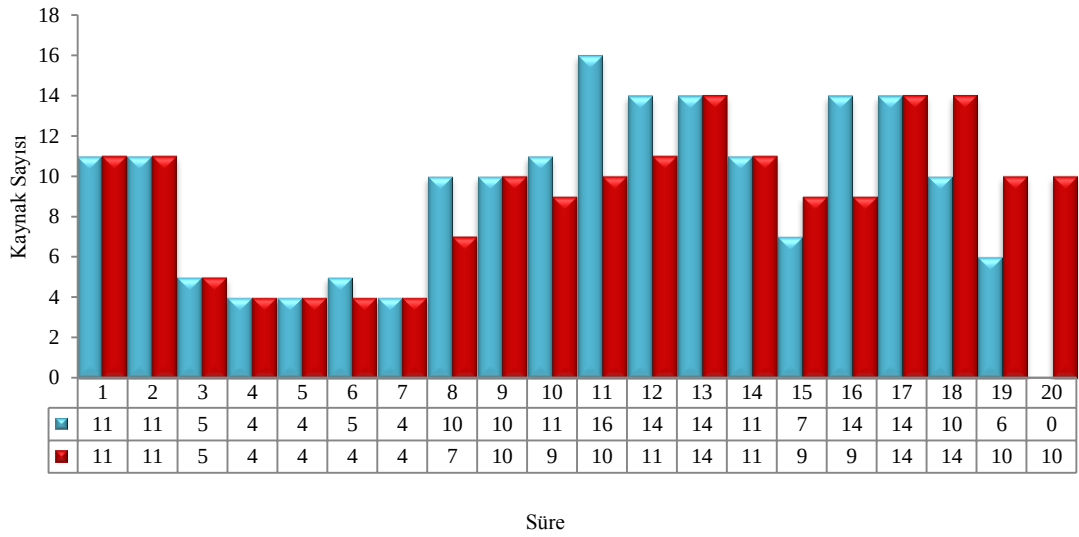
B-gecikme	0
C-gecikme	0
E-gecikme	1
F-gecikme	2
G-gecikme	0
H-gecikme	0
I-gecikme	0
K-gecikme	0
L-gecikme	2
N-gecikme	2
P-gecikme	1
R-gecikme	1
S-gecikme	1
Arama uzayı sayısı	8678
Hesaplama süresi (sn)	290
Başlangıç moment değeri	7011
Optimum moment değeri	6539

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



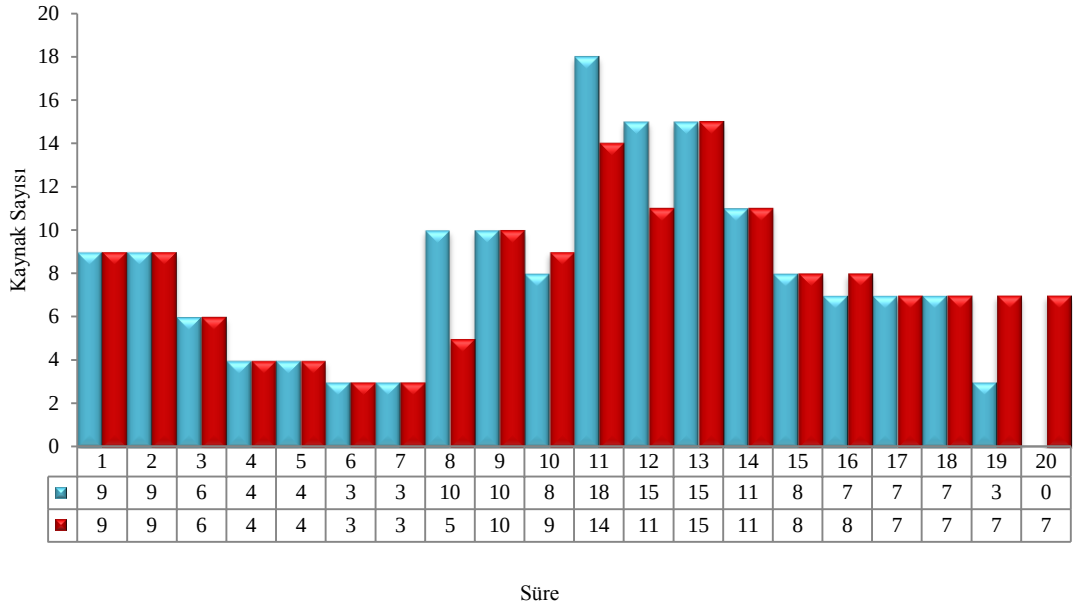
Şekil 5.127. Proje 27 kaynak-1 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı değişmedi.



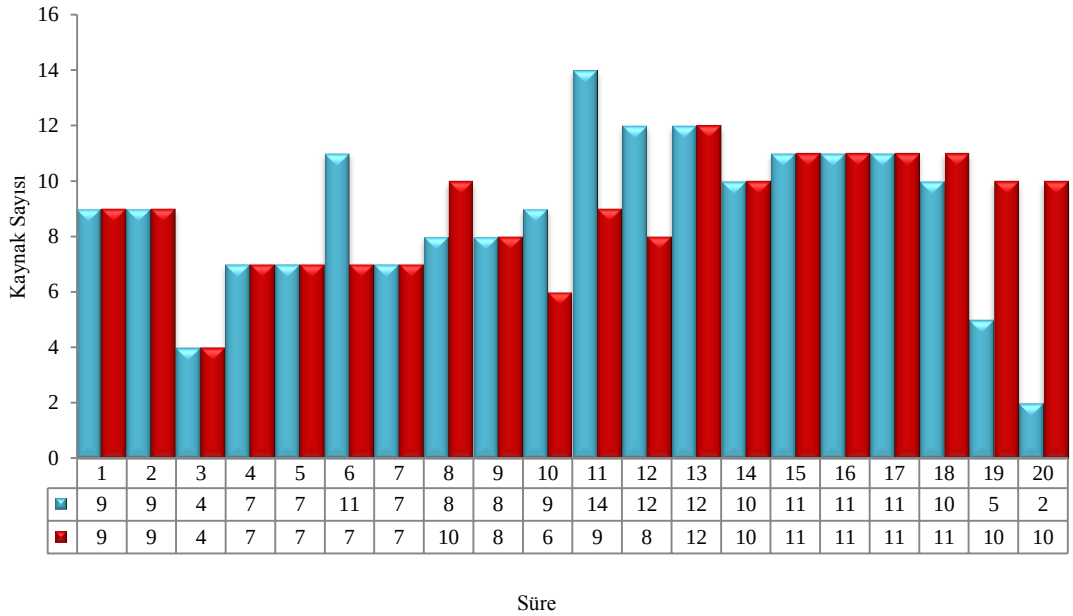
Şekil 5.128. Proje 27 kaynak-2 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 16'dan 14'e düşmüştür.



Şekil 5.129. Proje 27 kaynak-3 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 18'den 15'e düşmüştür.

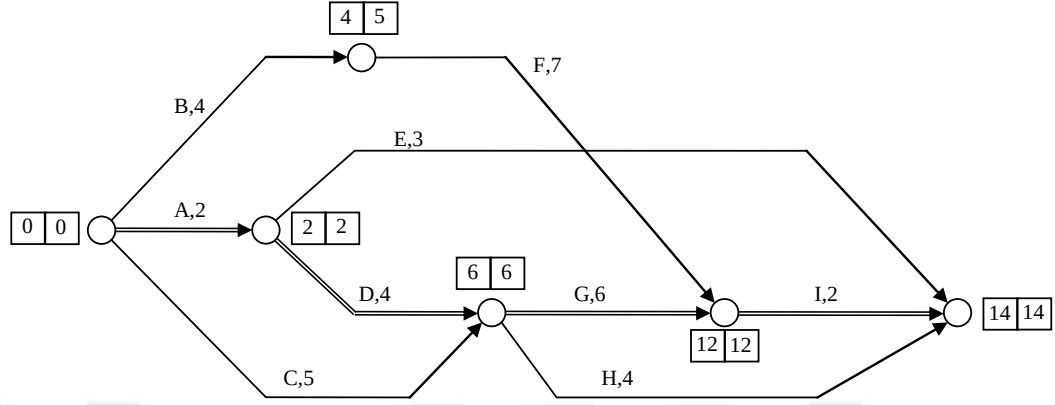


Şekil 5.130. Proje 27 kaynak-4 histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 14'ten 12'ye düşmüştür.

5.28. Proje 28 (Rui and Xiao-ya 2008)

9 aktiviteden oluşan proje Şekil 5.131'de verildiği gibi 1 kritik ve 4 bolluk sahibi hattan oluşmaktadır.



Şekil 5.131. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.107. Aktivitelere göre bolluk hesabı

Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _j	GOZ _j	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
A	2	-	0	0	2	2	6	0	0
B	4	-	0	0	4	5	3	0	1
C	5	-	0	0	6	6	5	1	1
D	4	A	2	2	6	6	4	0	0
E	3	A	2	2	14	14	7	9	9
F	7	B	4	5	12	12	4	1	1
G	6	C-D	6	6	12	12	5	0	0
H	4	C-D	6	6	14	14	3	4	4
I	2	F-G	12	12	14	14	5	0	0

Çizelge 5.108. B-H hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

B	F
0	0-1
1	1
K. Sayısı	3

Çizelge 5.109. Toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
E	$0 \leq E \leq 9$
C	$0 \leq C \leq 1$
B-F	3
H	$0 \leq H \leq 4$
Toplam	300

HCU işlemleri:

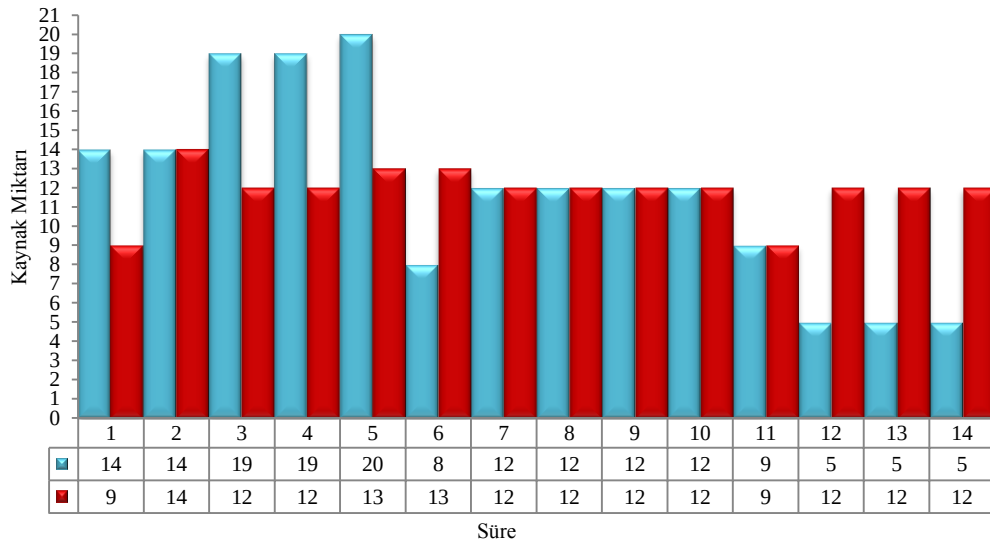
```
(General) Makro1
sayac = 0
For bGecikme = 0 To 1
  For fGecikme = bGecikme To 1
    For eGecikme = 0 To 9
      For cGecikme = 0 To 1
        For hGecikme = 0 To 4
```

Şekil 5.132. Proje 28 makro

Çizelge 5.110. Proje 28 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

B-gecikme	0
C-gecikme	1
E-gecikme	9
F-gecikme	0
H-gecikme	0
Arama uzayı sayısı	300
Hesaplama süresi (sn)	2
Başlangıç moment değeri	2310
Optimum moment değeri	1992

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.

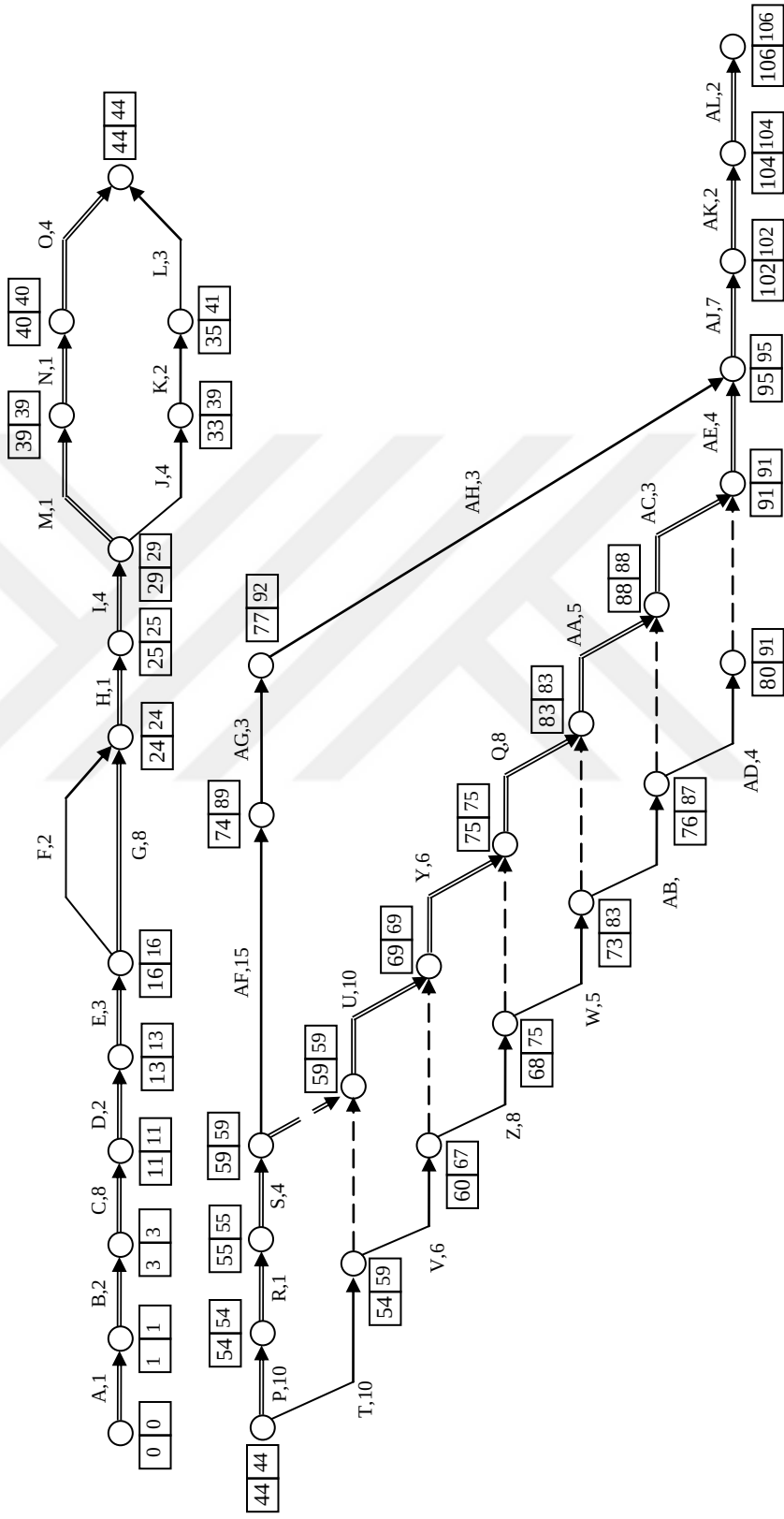


Şekil 5.133. Proje 28 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kaynak kullanımı 20'den 14'e düşmüştür.

Proje 29

36 aktiviteden oluşan tek katlı gerçek projenin şebeke ok diyagramı Şekil 5.134'te verilmiştir.



Şekil 5.134. Şebeke ok diyagramı

Çizelge 5.111. Aktivitelere göre bolluk hesabı

	Aktivite	Süre	Bağımlılık	EOZ _i	GOZ _i	EOZ _i	GOZ _i	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
	Tesviye	1	-	0	0	1	1	2	0	0
	Yerleşim	2	A	1	1	3	3	5	0	0
	Temel Kazısı	8	B	3	3	11	11	3	0	0
	Grobeton	2	C	11	11	13	13	3	0	0
	Su Yalıtımı ve Yalıtım Beton	3	D	13	13	16	16	7	0	0
	Mekanik Ve Tesisat Bağlama	2	E	16	16	24	24	4	6	6
	Kalıp-Donatı (Temel)	8	E	16	16	24	24	10	0	0
	Beton Dökümü (Temel)	1	F-G	24	24	25	25	6	0	0
	Kür (Temel)	4	H	25	25	29	29	1	0	0
	Yağmur Drenajı	4	I	29	29	33	33	5	0	6
	Atık Su Hattı Bağlama	2	J	33	33	35	41	5	0	6
	Geri Dolgu	3	K	35	41	44	44	4	6	6
	Kalıp-Donatı (Zemin)	10	I	29	29	39	39	10	0	0
	Beton Dökümü (Zemin)	1	M	39	39	40	40	6	0	0
	Kür (Zemin)	4	N	40	40	44	44	1	0	0
	Kalıp-Donatı (Kat 1)	10	O-L	44	44	54	54	10	0	0
	Beton Dökümü (Kat 1)	1	P	54	54	55	55	6	0	0
	Kür (Kat 1)	4	R	55	55	59	59	1	0	0
	Duvar (Zemin)	10	O-L	44	44	54	54	8	0	5
	Duvar (Kat 1)	10	S-T	59	59	69	69	8	0	0
	Tesisat (Zemin)	6	T	54	59	60	67	5	0	7
	Tesisat (Kat 1)	6	U-V	69	69	75	75	5	0	0
	Sıva (Zemin)	8	V	60	67	68	75	7	0	7
	Sıva (Kat 1)	8	Y-Z	75	75	83	83	7	0	0
	Doğrama (Zemin)	5	Z	68	75	73	83	4	0	10
	Doğrama (Kat 1)	5	Q-W	83	83	88	88	4	0	0
	Parke-Fayans (Zemin)	3	W	73	83	76	87	5	0	11
	Parke-Fayans (Kat 1)	3	AA-AB	88	88	91	91	5	0	0
	Boya (Zemin)	4	AB	76	87	91	91	4	11	11
	Boya (Kat 1)	4	AC-AD	91	91	95	95	4	0	0
	Çatı	15	S	59	59	74	89	9	0	15
	Çatı İzolasyonu	3	AF	74	89	77	92	4	0	15
	Yağmur Olukları	3	AG	77	92	95	95	3	15	15
	Çevre Düzenleme	7	AH-AE	95	95	102	102	5	0	0
	Kontrol ve Testler	2	AJ	102	102	104	104	2	0	0
	Temizlik	2	AK	104	104	106	106	5	0	0

Çizelge 5.112. W-AB-AD-T-V-Z hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

W	AB	AD	T	V	Z	K. Sayısı
0	$0 \leq AB \leq 11$	78	0	0	0	78
1	$1 \leq AB \leq 11$	66	0	0	0-1	264
			1	1	1	
			1	1	1	
2	$2 \leq AB \leq 11$	55	0	$0 \leq V \leq 2$	6	550
			1	$1 \leq V \leq 2$	3	
			2	$2 \leq V \leq 2$	1	
3	$3 \leq AB \leq 11$	45	0	$0 \leq V \leq 3$	10	900
			1	$1 \leq V \leq 3$	6	
			2	$2 \leq V \leq 3$	3	
			3	$3 \leq V \leq 3$	1	
4	$4 \leq AB \leq 11$	36	0	$0 \leq V \leq 4$	15	1260
			1	$1 \leq V \leq 4$	10	
			2	$2 \leq V \leq 4$	6	
			3	$3 \leq V \leq 4$	3	
			4	$4 \leq V \leq 4$	1	
5	$5 \leq AB \leq 11$	28	0	$0 \leq V \leq 5$	21	1568
			1	$1 \leq V \leq 5$	15	
			2	$2 \leq V \leq 5$	10	
			3	$3 \leq V \leq 5$	6	
			4	$4 \leq V \leq 5$	3	
			5	$5 \leq V \leq 5$	1	
6	$6 \leq AB \leq 11$	21	0	$0 \leq V \leq 6$	28	1743
			1	$1 \leq V \leq 6$	21	
			2	$2 \leq V \leq 6$	15	
			3	$3 \leq V \leq 6$	10	
			4	$4 \leq V \leq 6$	6	
			5	$5 \leq V \leq 6$	3	
7	$7 \leq AB \leq 11$	15	0	$0 \leq V \leq 7$	36	1740
			1	$1 \leq V \leq 7$	28	
			2	$2 \leq V \leq 7$	21	
			3	$3 \leq V \leq 7$	15	
			4	$4 \leq V \leq 7$	10	
			5	$5 \leq V \leq 7$	6	
8	$8 \leq AB \leq 11$	10	0	$0 \leq V \leq 7$	36	1160
			1	$1 \leq V \leq 7$	28	
			2	$2 \leq V \leq 7$	21	
			3	$3 \leq V \leq 7$	15	
			4	$4 \leq V \leq 7$	10	
			5	$5 \leq V \leq 7$	6	
9	$9 \leq AB \leq 11$	6	0	$0 \leq V \leq 7$	36	696
			1	$1 \leq V \leq 7$	28	
			2	$2 \leq V \leq 7$	21	
			3	$3 \leq V \leq 7$	15	
			4	$4 \leq V \leq 7$	10	
			5	$5 \leq V \leq 7$	6	
10	$10 \leq AB \leq 11$	3	0	$0 \leq V \leq 7$	36	348
			1	$1 \leq V \leq 7$	28	
			2	$2 \leq V \leq 7$	21	
			3	$3 \leq V \leq 7$	15	
			4	$4 \leq V \leq 7$	10	
			5	$5 \leq V \leq 7$	6	
Toplam						10307

Çizelge 5.113. K-L-J hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

K	L	J	K. Sayısı
0	$0 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 0$	7
1	$1 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 1$	12
2	$2 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 2$	15
3	$3 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 3$	16
4	$4 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 4$	15
5	$5 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 5$	12
6	$6 \leq L \leq 6$	$0 \leq J \leq 6$	7
Toplam			84

Çizelge 5.114. AG-AF-AH hattı kaynak dengeleme kombinasyonu

AG	AF	AH	K. Sayısı
0	$0 \leq AF \leq 0$	$0 \leq AH \leq 15$	16
1	$0 \leq AF \leq 1$	$1 \leq AH \leq 15$	30
2	$0 \leq AF \leq 2$	$2 \leq AH \leq 15$	42
3	$0 \leq AF \leq 3$	$3 \leq AH \leq 15$	52
4	$0 \leq AF \leq 4$	$4 \leq AH \leq 15$	60
5	$0 \leq AF \leq 5$	$5 \leq AH \leq 15$	66
6	$0 \leq AF \leq 6$	$6 \leq AH \leq 15$	70
7	$0 \leq AF \leq 7$	$7 \leq AH \leq 15$	72
8	$0 \leq AF \leq 8$	$8 \leq AH \leq 15$	72
9	$0 \leq AF \leq 9$	$9 \leq AH \leq 15$	70
10	$0 \leq AF \leq 10$	$10 \leq AH \leq 15$	66
11	$0 \leq AF \leq 11$	$11 \leq AH \leq 15$	60
12	$0 \leq AF \leq 12$	$12 \leq AH \leq 15$	52
13	$0 \leq AF \leq 13$	$13 \leq AH \leq 15$	42
14	$0 \leq AF \leq 14$	$14 \leq AH \leq 15$	30
15	$0 \leq AF \leq 15$	$15 \leq AH \leq 15$	16
Toplam			816

Çizelge 5.115. toplam kaynak dengeleme kombinasyonu

Hatlar	K. Sayısı
K-L-J	84
F	7
AG-AF-AH	816
W-AB-AD-T-V-Z	10307
Toplam	4.945.381.056

Çizelge 5.115'te kritik olmayan bağımlı ve bağımsız hatlarda hesaplanan kombinasyon miktarları verilmiştir. K-L-J, F, AG-AF-AH ve W-AB-AD-T-V-Z aktivitelerinin geciktirilmesi birbirlerinden bağımsız olduğu için bu yol ve aktivitelere atanan gecikme süreleri diğerlerini etkilemez ve şebeke üzerinde oluşturulabilecek toplam geciktirme kombinasyonu sayısı, bu yolların sahip olduğu gecikme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Bağımsız hat ihtimallerinin çarpımı sonucu 4.945.381.056 farklı kombinasyon bulunmuştur.

HCU işlemleri: Makul sürede optimum çözüme ulaşmak için her projenin yapısına özgü farklı algoritmaları oluşturulur. Proje makul çözüm için ok diyagramını ikiye ayıracak şekilde iki farklı komut serisine bölündü. F aktivitesi bolluk sahibi olmasana rağmen moment değerini değiştirmedığından hesaplamaya dahil edilmedi. K-L-J hattı ilk seriyi ve AG-AF-AH ile W-AB-AD-T-V-Z hatları ikinci seriyi oluşturmaktadır. Hatların bağımlılık ve bollukları temel alınarak makro kodları oluşturuldu.

```

saatBas = Cells(45, "BA").Value
dakikaBas = Cells(46, "BA").Value
saniyeBas = Cells(47, "BA").Value
moment = 50000
sayac = 0

For jGecikme = 0 To 6
For kGecikme = jGecikme To 6
For lGecikme = kGecikme To 6

Range("M18").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = jGecikme
Range("M19").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = kGecikme

```

Şekil 5.135. Proje 29 seri-1 makro

```

sayac = 0

For tGecikme = 0 To 5
For vGecikme = tGecikme To 7
For zGecikme = vGecikme To 7
For wGecikme = zGecikme To 10
For abGecikme = wGecikme To 11
For adGecikme = abGecikme To 11
For afGecikme = 0 To 15
For agGecikme = afGecikme To 15
For ahGecikme = agGecikme To 15

Range("M12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = tGecikme

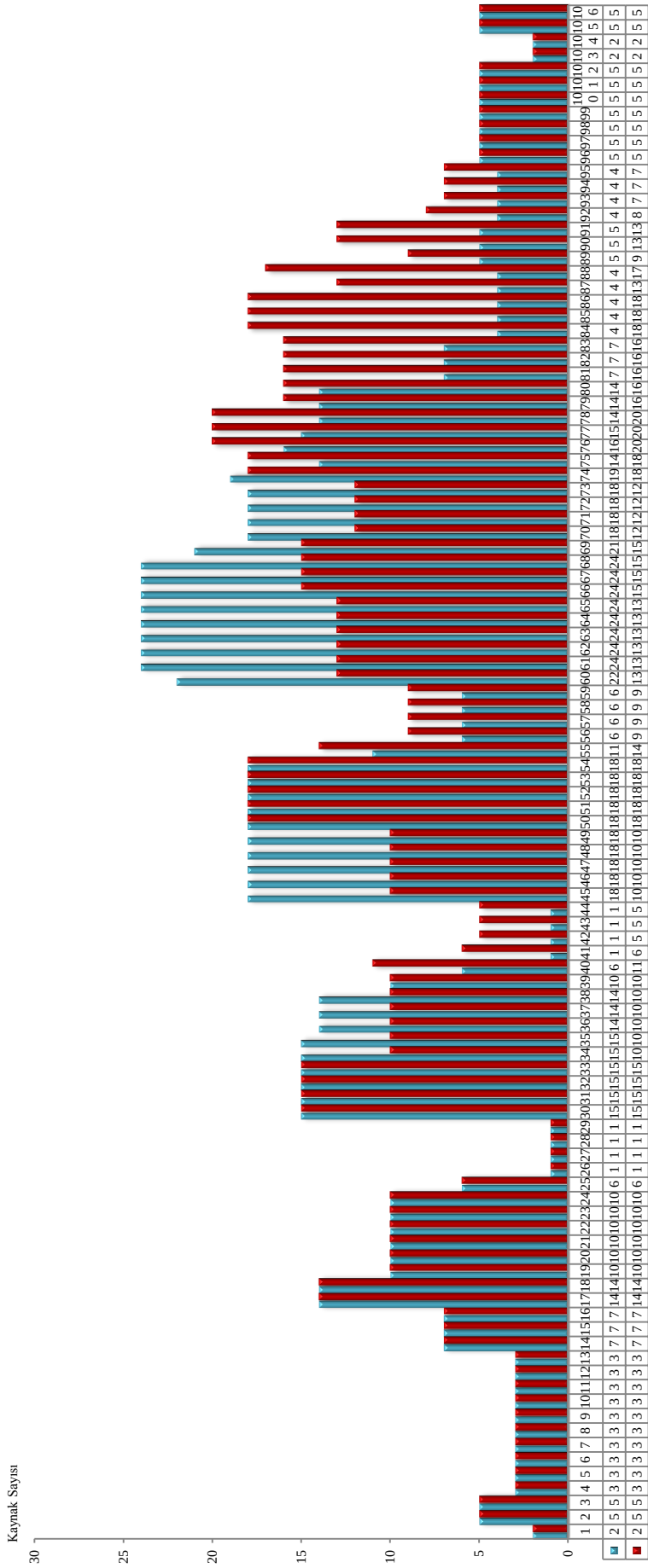
```

Şekil 5.136. Proje 29 seri-2 makro

Çizelge 5.116. Proje 29 optimum sonucu veren hesaplama değerleri

J-gecikme	0
K-gecikme	6
L-gecikme	6
T-gecikme	5
V-gecikme	5
Z-gecikme	5
W-gecikme	5
AB-gecikme	10
AD-gecikme	11
AF-gecikme	14
AG-gecikme	15
AH-gecikme	15
Arama uzayı sayısı	4.945.381.056
Hesaplama süresi (saat)	19,44
Başlangıç moment değeri	15960
Optimum moment değeri	13606

Bu hesaplama değerleri temel alınarak kaynak histogramı oluşturuldu.



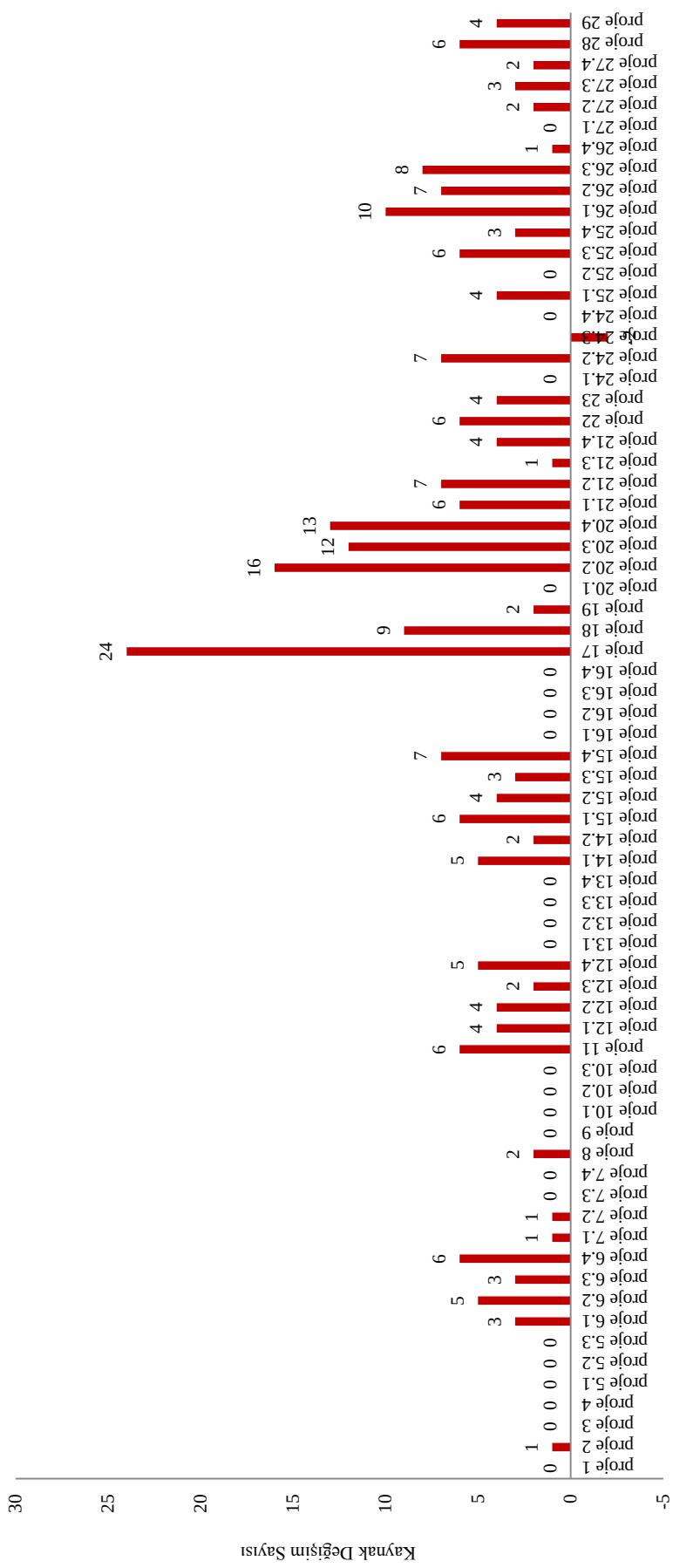
Şekil 5.137. Proje 29 kaynak histogramı

Kaynak dengeleme işlemi sonucunda günlük en fazla kayna kullanımı 24'ten 20'ye düşmüştür.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnşaat projelerinin planlanmasında yaygın olarak kullanılan paket programlarda yer alan yöntemler KDP'yi etkin bir şekilde çözmediği gibi çoğu program ücretlidir. Küçük ve orta ölçekli müteahhitler projelerde kaynak kullanımı için çoğu zaman bu programların ücretinden dolayı ek bir bütçe ayırmamaktadır. Kaynak kullanımı planlanmayan projelerde olası maliyet artışının yanı sıra proje süresi de uzayabilmektedir.

Çalışmada geliştirilen uygulama sayesinde küçük ve orta ölçekli müteahhitlerin uygulaması imkansız olan optimizasyon algoritmaları yerine; tüm seçenekleri deneyerek çözüm yapan, küçük ölçekli projelerde kaynak dengeleme probleminin tam sonucunu makul hesaplama süresinde elde eden ve tüm müteahhitler tarafından uygulanabilen bir hesap cetveli uygulaması geliştirilmiştir. Bu sayede bütün yükleniciler için inşaatın tüm aşamalarında kaynakların mümkün olan en üst verimde kullanılması mümkün olacak ve inşaat maliyetlerinde kayda değer düşüşler sağlanabilecektir. Optimizasyon sonrası projelerdeki kaynak değişimi ve iyileşme yüzdeleri Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.de sunulmaktadır.



Şekil 6.1. Projelerin kaynak değişimi

Arama uzayının tamamının taranması hesap yükü açısından ilk bakışta verimsiz bir çözüm yöntemi olarak düşünülebilir. Fakat rastsal biçimde çözüm arayan modern sezgisel yöntemlerin, NP-Zor sınıfında bir problem türü olan kaynak dengeleme probleminin çözümünde çok yeterli olmadıkları bilinmektedir. Ayrıca çözüm ararken daha önce denenmiş çözümleri rastsal arama yaptıkları için tekrar deneyerek arama işlemini verimsizleştirmektedirler. Bunun tek istinası Tabu arama yöntemidir. Bu yöntemde ise geçmiş aramalar tekrarlama olmaması için bellekte tutulur ve bu da önemli ölçüde bellek ihtiyacı oluşturur. Bu tez çalışmasında uygulanan yöntemle özellikle arama uzayının 50.000'in altında kalan küçük ölçekli problemlerde modern sezgisel yöntemlerden daha az hesap yükü ile kesin en iyi çözüme ulaşılmıştır. Bu durum uygulanan yöntemin hesap yükü açısından verimli olduğunu göstermektedir. Daha büyük problemlerde hesap yükü modern-sezgisel yöntemlere kıyasla daha fazla olmakta fakat tüm arama uzayının taranması daha iyi sonuçlar vermektedir.

Çalışmada hem kaynak miktarı dengelenmiş hem de arama uzayına göre projelerin çözüm süreleri değerlendirilmiştir. HCU ile yapılan analizler sonucunda incelenen projelerin arama uzayının tamamı taranarak, projelerin mümkün olan en iyi çözümü elde edilmiş ve bazı projelerde dikkat çekici oranda iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak geliştirilen algoritma, orta ve küçük ölçekli inşaat projelerinde etkin bir kaynak kullanımı sağlayarak, inşaatla planlama sürecinin verimliliğini arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adeli, H., & Vishnubhotla, P. (1987). Parallel processing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **2**(3), 257-269.
- Adeli, H., & Kamal, O. (1989). Parallel structural analysis using threads. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **4**(2), 133-147.
- Adeli, H., Kamat, M. P., Kulkarni, G., & Vanluchene, R. D. (1993). High-performance computing in structural mechanics and engineering. *Journal of Aerospace Engineering*, **6**(3), 249-267.
- Agin, N. (1966). Optimum seeking with branch and bound. *Management Science*, **13**(4), B-176.
- Akpan, E. O. P. (2000). "Resource smoothing: a cost minimization approach." *Production Planning & Control*, **11**(8), 775 - 780.
- Atan, T., & Eren, E. (2018). Optimal project duration for resource leveling. *European Journal of Operational Research*, **266**(2), 508-520.
- Bandelloni, M., Tucci, M., & Rinaldi, R. (1994). Optimal resource leveling using non-serial dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, **78**(2), 162-177.
- Bettemir Ö. H. (2009). "Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristicalgorithms." PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Boushaala, A. (2014). An approach for project scheduling using PERT/CPM and Petri Nets (PNs) Tools. *Industrial engineering and operations management*, **5**(85), 939-947.
- Burgess, A. R., and Killebrew, J. B. (1962). "Variation in activity level on a cyclic arrow diagram." *J. Industrial Engrg.*, **13**(2), pp. 76-83.
- Chakroun, I., & Melab, N. (2015). Towards a heterogeneous and adaptive parallel Branch-and-Bound algorithm. *Journal of Computer and System Sciences*, **81**(1), 72-84.
- Chan, W. T., Chua, D. K., & Kannan, G. (1996). Construction resource scheduling with genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*, **122**(2), 125-132.
- Chelaka, M., Abeyasinghe, L., Greenwood, D. J., and Johansen, D. E. (2001). "An efficient method for scheduling construction projects with resource constraints." *Int. J. Proj. Manage.*, **19**(1), 29-45.
- Chen, D., Lee, C. Y., & Park, C. H. (2005, November). Hybrid genetic algorithm and simulated annealing (HGASA) in global function optimization. In *Tools with Artificial Intelligence, 2005. ICTAI 05. 17th IEEE International Conference on* (pp. 5-pp). IEEE.
- Christodoulou, S. E., Ellinas, G., & Michaelidou-Kamenou, A. (2009). Minimum moment method for resource leveling using entropy maximization. *Journal of construction engineering and management*, **136**(5), 518-527.

- Christodoulou, S. E., Ellinas, G., and Michaelidou-Kamenou, A. (2010). "Minimum Moment Method for Resource Leveling Using Entropy Maximization", *Journal of Construction Engineering and Management*, **136**(5), pp. 518-527.
- Clausen, J., & Perregaard, M. (1999). On the best search strategy in parallel branch-and-bound: Best-First Search versus Lazy Depth-First Search. *Annals of Operations Research*, **90**, 1-17.
- Crainic, T. G., Cun, B. L., & Roucairol, C. A. T. H. E. R. I. N. E. (2006). *Parallel combinatorial optimization*. chapter Parallel Branchand-Bound Algorithms, pages, 1-28.
- Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (1992). A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem. *Management science*, **38**(12), 1803-1818.
- Demeulemeester, E. (1995). Minimizing resource availability costs in time-limited project networks. *Management Science*, **41**(10), 1590-1598.
- Demeulemeester, E. and Herroelen, W., (2002). *Project Scheduling: A Research Handbook*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Easa, S. M. (1989). Resource leveling in construction by optimization. *Journal of construction engineering and management*, **115**(2), 302-316.
- El-Rayes, K., & Jun, D. H. (2009). Optimizing resource leveling in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(11), 1172-1180.
- Gather, T., Zimmermann, J., & Bartels, J. H. (2011). Exact methods for the resource levelling problem. *Journal of Scheduling*, **14**(6), 557-569.
- Geng, J. Q., Weng, L. P., & Liu, S. H. (2011). An improved ant colony optimization algorithm for nonlinear resource-leveling problems. *Computers & Mathematics with Applications*, **61**(8), 2300-2305.
- Gordon, J., and Tulip, A. (1997). "Resource scheduling." *Int. J. Proj. Manage.*, **15**(6), 359-370.
- Guo, Y., Li, N., & Ye, T. (2009, August). Multiple resources leveling in multiple projects scheduling problem using particle swarm optimization. In *Natural Computation, 2009. ICNC'09. Fifth International Conference on IEEE*, 3, 260-264.
- Harris, R. I. (1978). *Precedence and arrow networking techniques for construction*, Wiley, New York.
- Harris, R. B. (1990). "Packing Method for Resource Leveling (PACK)", *Journal of Construction Engineering and Management*, **125**(3), 167-175.
- Hegazy, T. (1999). Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*, **125**(3), 167-175.
- Hegazy, T., & Kassab, M. (2003). Resource optimization using combined simulation and genetic algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*, **129**(6), 698-705.

- Heon Jun, D., & El-Rayes, K. (2011). Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling. *Journal of construction engineering and management*, **137**(12), 1080-1088.
- Hinze, J. W., (2006). Construction Planning and Scheduling, 3rd Edition, *Pearson Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ.
- 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.
- Hossein Hashemi Doulabi, S., Seifi, A., & Shariat, S. Y. (2010). Efficient hybrid genetic algorithm for resource leveling via activity splitting. *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**(2), 137-146.
- Hwang, S. F., & He, R. S. (2006). Improving real-parameter genetic algorithm with simulated annealing for engineering problems. *Advances in Engineering Software*, **37**(6), 406-418.
- Iranagh M.A and Sonmez R (2012). A genetic algorithm for resource leveling of construction projects In: Smith, S.D (Ed) *Procs 28th Annual ARCOM Conference*, 3-5 September 2012, Edinburgh, UK, Association of Researchers in Construction Management, 1047-1054.
- Ismail, M. M., El-Raoof, O. A., & El-Wahed, W. F. A. (2014). A parallel branch and bound algorithm for solving large scale integer programming problems.
- Iyer, P., Liu, Y., Sadeghpour, F., & Brennan, R. W. (2015). A fuzzy-logic based resource levelling optimisation tool. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(3), 1942-1947.
- Jeetendra, V. A., Krishnaiah Chetty, O. V., & Prashanth Reddy, J. (2000). Petri nets for project management and resource levelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **16**(7), 516-520.
- Karaa, F. A., & Nasr, A. Y. (1986). Resource management in construction. *Journal of construction engineering and management*, **112**(3), 346-357.
- Karakaya, Abdülkadir. (2007). "Genetik Algoritmaların Yapı Proje Yönetiminde Kaynak Dengelemesi Amacıyla Kullanımının Modellenmesi" . Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı Doktora Tezi, İzmir, Haziran, 270 s.
- Kartam, N., & Tongthong, T. (1998). An artificial neural network for resource leveling problems. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, **12**(3), 273-287.
- Karshenas S., and Haber D. (1990). "Economic Optimization of Construction Project Scheduling", *Construction Management and Economics*", **8**(2), 135-146.
- Lai, T. H., & Sahni, S. (1984). Anomalies in parallel branch-and-bound algorithms. *Communications of the ACM*, **27**(6), 594-602.

- Leu, S. S., & Yang, C. H. (1999). GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling. *Journal of construction engineering and management*, **125**(6), 420-427.
- Leu, S. S., Yang, C. H., & Huang, J. C. (2000). Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application. *Automation in construction*, **10**(1), 27-41.
- Li, Z., Wuliang, P., & Zhongliang, Z. (2010, May). An ant colony system for solving resource leveling problem. In *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on* (Vol. 1, pp. 489-492). IEEE.
- Li, H., & Dong, X. (2018). Multi-modere source leveling in projects with mode-dependent generalized precedence relations. *Expert Systems with Applications*, **97**, 193-204.
- Lin, L., & Gen, M. (2018). Hybrid evolutionary optimisation with learning for production scheduling: state-of-the-art survey on algorithms and applications. *International Journal of Production Research*, **56**(1-2), 193-223.
- Martinez, J., & Ioannou, P. (1993, June). Resource leveling based on the modified minimum moment heuristic. In *Computing in civil and building engineering* (pp. 287-294). ASCE.
- Mason, A. T., and Moodie, C. L. (1971). "A Branch and Bound Algorithm for Minimizing Cost in Project Scheduling", *Management Science*, **18**(4), B-158-B-173.
- Mattila, K. G., & Abraham, D. M. (1998). Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. *Journal of Construction Engineering and Management*, **124**(3), 232-244.
- Mubarak, S. A. (2010). *Construction Project Scheduling and Control*. 2nd Ed. Wiley, India
- Mutlu, M. Ç. ve Sönmez, R. (2010). "Kaynak Dengeleme Probleminin Dal ve Sınır Yöntemiyle Çözülmesi", *1. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 102-113.
- Mutlu, C. (2010). "A Branch and Bound Algorithm for Resource Leveling Problem. Unpublished MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Neumann, K., & Zimmermann, J. (1999). Resource levelling for projects with schedule-dependent time windows. *European Journal of Operational Research*, **117**(3), 591-605.
- Neumann, K., & Zimmermann, J. (2000). Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints. *European Journal of Operational Research*, **127**(2), 425-443.
- Newitt, J. S. (2004). *Construction Scheduling: Principles and Practices*. Pearson Prentice Hall, NJ.
- Nübel, H. (2001). The resource renting problem subject to temporal constraints. *OR-Spektrum*, **23**(3), 359-381.

- Oral, M., Laptalı Oral, E., Bozkurt, S. and Erdis, E. (2003). "Resource Leveling in Construction Projects by Using Genetic Algorithms", *Ç. Ü. J. Fac. Eng. Arch*, **18**(2), 185-194.
- Pang, N., Shi, Y., and You, Y. (2008). "Resource Leveling Optimization of Network Schedule Based on Particle Swarm Optimization with Constriction Factor", *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, pp. 652-656.
- Petrovic, R. (1969). On optimization of resource leveling in project plans. In *Project planning by network analysis: proceedings of the 2nd international congress*, 268, p. 273.
- Perregaard, M., & Clausen, J. (1998). Parallel branch-and-bound methods for the job-shop scheduling problem. *Annals of Operations Research*, **83**, 137-160.
- Ponz-Tienda, J. L., Salcedo-Bernal, A., & Pellicer, E. (2017). A parallel branch and bound algorithm for the resource leveling problem with minimal lags. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **32**(6), 474-498.
- Ponz-Tienda, J. L., Salcedo-Bernal, A., Pellicer, E., & Benlloch-Marco, J. (2017). Improved adaptive harmony search algorithm for the resource leveling problem with minimal lags. *Automation in Construction*, **77**, 82-92.
- Qi, J. X., Wang, Q., & Guo, X. Z. (2007, August). Improved particle swarm optimization for resource leveling problem. In *Machine Learning and Cybernetics, 2007 International Conference on IEEE*, 2, 896-901.
- Qiao, J., & Li, Y. (2018). Resource leveling using normalized entropy and relative entropy. *Automation in Construction*, **87**, 263-272.
- Rieck, J., Zimmermann, J., & Gather, T. (2012). Mixed-integer linear programming for resource leveling problems. *European Journal of Operational Research*, **221**(1), 27-37.
- Rieck, J., & Zimmermann, J. (2015). Exact methods for resource leveling problems. In *Handbook on Project Management and Scheduling*, Springer, Cham, **1**, 361-387.
- Roca, J., Pugnaghi, E., & Libert, G. (2008). Solving an extended resource leveling problem with multiobjective evolutionary algorithms. *International Journal of Computational Intelligence*, **4**(4), 289-300.
- Rui, L., and Xiao-ya, W. (2008). "Using elitist particle swarm optimization to facilitate resources leveling optimization analysis." In *IEEE 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, ICIEA, 90-95.
- Savin, D., Alkass, S., & Fazio, P. (1996). Construction resource leveling using neural networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **23**(4), 917-925.
- Savin, D., Alkass, S., & Fazio, P. (1997). A procedure for calculating the weight-matrix of a neural network for resource leveling. *Advances in Engineering Software*, **28**(5), 277-283.

- Senouci, A. B., & Eldin, N. N. (2004). Use of genetic algorithms in resource scheduling of construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, **130**(6), 869-877.
- Shah, K. A., Farid, F., & Baugh, J. W. (1993). Optimal resource leveling using integer-linear programming. In *Computing in Civil and Building Engineering* (pp. 501-508). ASCE.
- Son, J., & Skibniewski, M. J. (1999). Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach. *Journal of construction engineering and management*, **125**(1), 23-31.
- Son, J., & Mattila, K. G. (2004). Binary resource leveling model: Activity splitting allowed. *Journal of construction engineering and management*, **130**(6), 887-894.
- Stevens, J. D. (1990). *Techniques for Construction Network Scheduling*, McGraw-Hill, New York.
- Tzanetos, A., Kyriklidis, C., Papamichail, A., Dimoulakis, A., & Dounias, G. (2018, July). A Nature Inspired metaheuristic for Optimal Leveling of Resources in Project Management. In *Proceedings of the 10th Hellenic Conference on Artificial Intelligence* (p. 17). ACM.
- Wah, B. W., Li, G. J., & Yu, C. F. (1985). Multiprocessing of combinatorial search problems. *IEEE computer*, **18**(6), 93-108.
- Wang, L., & Zheng, D. Z. (2001). An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, **28**(6), 585-596.
- Wang, Q., & Qi, J. X. (2009, July). Research on resource leveling problem under resource constrained condition. In *Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on* (Vol. 2, pp. 901-906). IEEE.
- Woodworth, B. M., & Willie, C. J. (1975). A heuristic algorithm for resource leveling in multi-project, multi-resource scheduling. *Decision Sciences*, **6**(3), 525-540.
- Xiong, Y., & Kuang, Y. P. (2006). Ant colony optimization algorithm for resource leveling problem of construction project. *Adv. of Con. Man. and Re. Es*, **1**, 212-226.
- Yeniocak, Hüseyin (2013). *An efficient branch and bound algorithm for the resource leveling problem* (Master's thesis, Middle East Technical University, School of Natural and Applied Sciences).
- Yıldırım, A., Ergün, E., Bettemir, Ö. H. (2016). " Bina Bilgi Modeli Destekli Kaynak Dengeleme Uygulaması Örneği", 4. *Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi*, Eskişehir, 705-717.
- Yıldırım, A. ve Bettemir, Ö. H. (2017), " Solution Of Resource Constrained Project Scheduling By Line Of Balance", *International 7th Construction Management Congress*, Samsun, 553-566.
- Younis, M. A., & Saad, B. (1996). Optimal resource leveling of multi-resource projects. *Computers & industrial engineering*, **31**(1-2), 1-4.

Zheng, D. X., Ng, S. T., & Kumaraswamy, M. M. (2003). GA-based multi objective technique for multi-resource leveling. *In Construction Research Congress: Wind of Change: Integration and Innovation* (pp. 1-8).



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Tuğba ERZURUM

Doğum Yeri ve Tarihi: MALATYA – 12.12.1992

E-Posta: tugbaerzrm@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans (Varsa):

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Malatya Uluata Yapı Denetim Ltd. Şti. (2017-...)

Yayın Listesi:

Erzurum, T. ve Bettemir, Ö. H. (2017), “Determination Of Search Domain Of Resource Leveling Problem”, *International 7th Construction Management Congress*, Samsun, 437-453.

Erzurum, T. ve Bettemir, Ö. H. (2018), “Optimum or Near-Optimum Resolution of Resource Leveling Problems with Spreadsheet Application”, *5th International Project and Construction Management Conference - IPCMC2018*, Cyprus International University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, North Cyprus, 1285-1299.