



A novel scheduling methodology for resource constrained projects by a new mathematical model and a hybrid metaheuristic: A case study

Ayfer Başar*

Industrial Engineering, Faculty of Management, Istanbul Technical University, Istanbul, 34357, Turkey

Highlights:

- A new mathematical model for time planning of project activities
- A hybrid meta heuristic to solve the model
- Application in a Turkish company, establishing reliable and successful results.

Keywords:

- Project management
- Project scheduling
- Mathematical modeling
- Hybrid metaheuristic
- Case study

Article Info:

Research Article
Received: 12.04.2021
Accepted: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.913666

Correspondence:

Author: Ayfer Başar
e-mail:
ayferbasar@gmail.com
phone: +90 212 484 6387

Graphical/Tabular Abstract

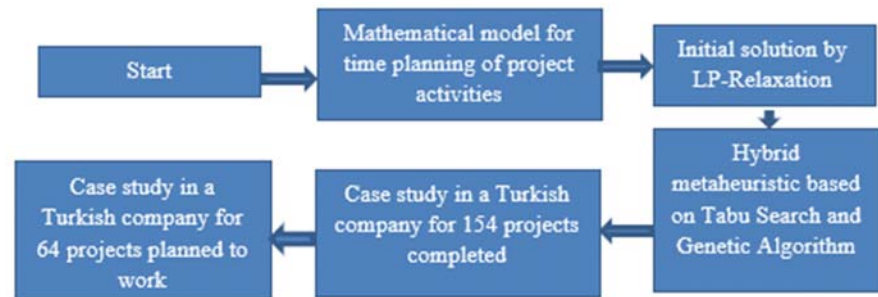


Figure A. Overview of the study

Purpose: Although project management techniques have been widely developed in recent years, there is a need for structured methodologies and optimization models for time planning of project activities since traditional methods (i.e., Critical Path Method – CPM, Program Evaluation and Review Technique – PERT) do not provide optimal results. Moreover, as the parameters and constraints affecting the time planning of projects and the number of activities increase, time management of projects have become more complex. For this reason, this paper presents a new mathematical model to complete activities of resource constrained projects in accordance with their logical relationships.

Theory and Methods:

Optimal solution of the proposed NP-Hard model cannot be found in case of a high number of activities. Therefore, a hybrid metaheuristic approach based on Tabu Search and Genetic Algorithm is proposed to find efficient solutions for the mathematical model. Moreover, the proposed mathematical model and hybrid metaheuristic are applied to plan the activities of projects in an information technology company in Turkey.

In the first step of the application, activities of 154 projects completed in 2018, 2019, and 2020 have been scheduled by the proposed methods. Thus, both the methods have been validated and the best parameters of the proposed techniques (i.e. tabu list size, diversification, stopping criteria, mutation) have been determined. The results found by CPLEX solver and proposed methods have been compared. Since CPLEX cannot provide optimum solutions for the projects with more than 30 activities, the results found in 10 hours have been compared with the proposed methods. In the second step of the application, activities of 64 projects planned to work in 2021 have been scheduled by the proposed methods.

Results:

It is observed that proposed metaheuristic gives 3.91% better objective function values than CPLEX for 154 projects completed in 2018, 2019, and 2020. Furthermore, proposed methods find these better solutions in a short time (on average 178 seconds) in comparison with CPLEX (on average 34,833 seconds). Moreover, proposed metaheuristic gives 5.01% better results than CPLEX in also very short time (on average 130 seconds) in comparison with CPLEX (on average 35,438 seconds) for 64 projects planned to work in 2021.

Conclusion:

It is observed that proposed model and solution approach provide efficient solutions with high success ratio and reliable plans. Thus, experts working in the company and the customers have approved the schedules obtained by the proposed methods.



Yeni bir matematiksel model ve hibrit meta sezgisel ile kaynak kısıtlı projelerin çizelgelenmesi: Bir vaka çalışması

Ayfer Başar*

İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34357 Maçka, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Proje çizelgeleme probleminin çözümü için yeni bir matematiksel model
- Modelin çözümü amacıyla hibrit meta sezgisel tasarımı
- Gerçek hayat uygulaması ve CPLEX'e kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.04.2021

Kabul: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.913666

Anahtar Kelimeler:

Proje çizelgeleme,
matematiksel model,
hibrit meta sezgisel,
vaka çalışması

ÖZ

Projeler, başlangıç ve bitiş tarihi belli olacak şekilde belirlenmiş bir zaman diliminde özgün çıktılarının sunulmasının hedeflendiği çalışmalardır. Proje çıktısı olan yeni ürün veya servisin pazara çıkış süresini hızlandırmak amacıyla zaman baskısı her işletmede rastlanan bir durumdur. Bunun için işletmeler, projelerin doğru çizelgelenmesi için yeni yöntem arayışına girmek durumundadır. Bu çalışmada, kaynak kısıtlı projelerin çizelgelenmesi için proje aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişkileri dikkate alacak şekilde yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Projelerin aktivite sayısının fazla olduğu durumlarda karmaşık yapıya sahip bu modelin en iyi çözümü bulunamamaktadır. Bu nedenle önerilen hibrit meta sezgisel sayesinde kaynak kısıtlı projelerin çizelgelenmesi ve aktivitelerinin zamanında tamamlanması hedeflenmiştir. Geliştirilen model ve meta sezgisel yöntem, Türkiye'de hizmet vermekte olan bir teknoloji şirketinin proje çizelgelemesi için uygulanmıştır. Şirketin önceki 3 yıl üzerinde çalıştığı 154 proje için CPLEX ile ortalama 34.883 sn.'de bulunan çözüme karşılık önerilen yöntemle ortalama 178 sn.'de %3,91 oranında daha başarılı amaç fonksiyonu elde edilmiştir. Ayrıca 2021 yılında üzerinde çalışılması planlanan 64 proje için CPLEX ile ortalama 35.438 sn.'de bulunan çözüme karşılık ortalama 130 sn. içinde %5 daha başarılı çözüm bulunmuştur. Sonuç olarak önerilen yöntem sayesinde geciken proje ve aktivite sayısının çok az olduğu, proje çizelgelerinin gerçekçi olduğu, yöntemlerin hız ve amaç fonksiyon değeri açısından başarılı olduğu görülmüştür.

A novel scheduling methodology for resource constrained projects by a new mathematical model and a hybrid metaheuristic: A case study

H I G H L I G H T S

- Proposing a new mathematical model to solve project scheduling problem
- Developing a hybrid metaheuristic to solve the model
- A case study and establishing more successful results compared to CPLEX

Article Info

Research Article

Received: 12.04.2021

Accepted: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.913666

Keywords:

Project scheduling,
mathematical modeling,
hybrid metaheuristic,
case study

ABSTRACT

Projects are set of processes which aim to serve a unique product or a service in a time-bounded period. Pressure in terms of accelerating the time to market of the unique product or service has become the reality in every organization. Thus, companies need to search for new methodologies to schedule projects effectively. This paper presents a new mathematical model to schedule resource constrained projects in accordance with their logical relationships. Optimal solution of this complex model cannot be found in case of a high number of activities. Therefore, a new hybrid metaheuristic is proposed to find efficient solutions. Moreover, the proposed methodology is applied to schedule projects in a Turkish technology company. For 154 projects completed between 2018 and 2020, proposed methods finds on the average 3.91% better solution in 178 seconds compared to solutions obtained by CPLEX in 34,883 seconds. Proposed methods are also applied for 64 projects planned in 2021 and finds on the average 5% better results in 130 seconds compared to solutions found by CPLEX in 35,438 seconds. In brief, the proposed methodology provides efficient solutions with a very small number of delayed projects, reliable plans, better solution time and objective function value.

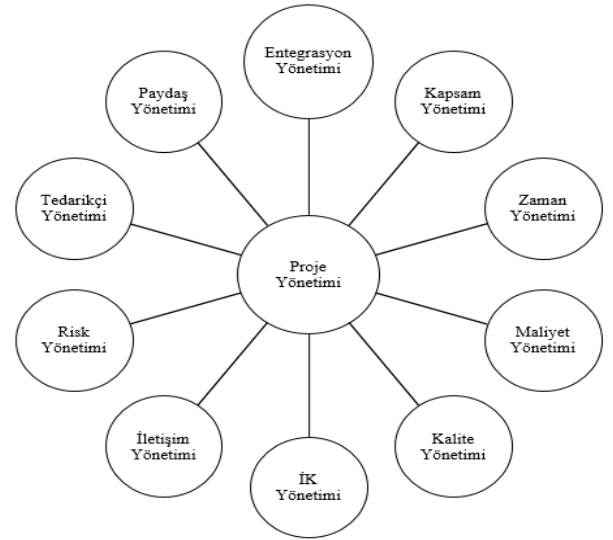
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Proje Yönetim Enstitüsüne göre proje, benzersiz bir ürün veya hizmet sağlamaya yönelik geçici bir çaba olarak tanımlanmaktadır. Proje yönetimi; projenin önceden belirlenen hedeflerine ulaşabilmesi için entegrasyon, kapsam, zaman, maliyet, kalite, insan kaynakları, iletişim, risk, tedarik, paydaş bilgi alanlarının sistematik olarak yönetilmesidir. Bu yönetim fonksiyonları; projelerin başlangıç, planlama, yürütme, kontrol ve izleme, kapanış olarak sınıflandırılan beş süreç alanında yürütülmektedir [1].

Şekil 1'de gösterilen proje yönetimi bilgi alanlarından entegrasyon yönetimi, proje yönetiminin temel çatısını oluşturur. Bu alan diğer süreçleri baştan sona etkiler ve projenin başarıya ulaşabilmesi için kilit rol oynar. Entegrasyon yönetiminde ana hatlarıyla tüm diğer bilgi alanlarına ait plan oluşturulur, bu planlar uygulanır ve gerektiğinde değişiklik yönetim süreçleri işletilir. Kapsam yönetiminde, projenin önceden tanımlı hedeflerine ulaşabilmesi ve çıktılarının beklenen şekilde teslim edilebilmesi amacıyla gerekli çalışmalar yürütülür. Bu bilgi alanında ilgili tüm paydaşlarla bir araya gelerek gereksinimler toplanır ve kapsam tanımlanır, iş kırılımı yapıları oluşturulur, kapsam doğrulanır ve kontrol edilir. Zaman yönetimi, projenin planlanan zamanda tamamlanmasını sağlamak için gerekli süreçlerin işletildiği bilgi alanıdır. Bu aşamada proje aktiviteleri tanımlanır ve sıralanır, kaynak ve süre ihtiyaçları tahmin edilir, çizelge geliştirilir ve kontrol edilir. Maliyet yönetimi, projenin sponsoru tarafından onaylanan bütçe dâhilinde tamamlanması için gerekli süreçlerin işletildiği bilgi alanıdır. Proje süresince katlanılacak tüm maliyetler tahmin edilir, bütçe belirlenir ve planlanan/gerçekleşen maliyetler kontrol edilir. Kalite yönetimi, müşteri paydaşlarının ihtiyaç ve beklentilerinin karşılanması için kalitenin planlandığı, kalite güvence tekniklerinin uygulandığı ve kalitenin kontrol edildiği bilgi alanıdır. İnsan kaynakları (İK) yönetimi, projede aktif rol alan tüm takım üyelerinin etkin hale getirilmesi için gerekli bilgi alanıdır. Bu aşamada proje süresince ihtiyaç duyulacak insan kaynağı planlanır, takım üyeleri temin edilir, takım geliştirilir ve yönetilir. İletişim yönetimi, proje süresince üretilen bilgilerin tüm proje paydaşları ile doğru zamanda ve doğru şekilde paylaşılması, proje paydaşları arasında iletişim sorunlarının yaşanmaması için gerekli süreçleri tarif eder. Bu bilgi alanında iletişim planlanır, yönetilir ve kontrol edilir. Risk yönetimi, proje süresince ortaya çıkabilecek risklerin planlandığı, tanımlandığı, nitel ve nicel olarak çözümlendiği, izlendiği ve kontrol edildiği bilgi alanıdır. Tedarik yönetimi, projede ihtiyaç duyulacak her türlü ürün, malzeme ve servisin satın alınmasına yönelik sözleşme planlaması, tedarikçi seçimi, sözleşme yönetimi ve sözleşmenin kapanışını içeren bilgi alanıdır. Paydaş yönetimi ise tüm proje paydaşlarının belirlendiği, paydaş yönetiminin planlandığı, paydaşların yönetildiği ve kontrol edildiği bilgi alanıdır [1].

Wateridge [2], Atkinson [3] ve Blaskovics [4] tarafından ifade edildiği şekilde sektörü, konusu ve müşteri

beklentilerine bağlı olarak her projenin farklı kısıtları olsa da projelerin ortak başarı kriterleri temelde kapsam, zaman ve maliyettir. Kapsam, proje tamamlandığında müşteriye hangi ürün ya da hizmetin hangi niteliklere uygun olarak sunulması gerektiğini tarif eder. Zaman, projenin ne zaman tamamlanacağını gösterir, böylece ürün ya da hizmetin hangi takvimde müşteriye ve pazara sunulacağını temsil eder. Maliyet ise, projenin tamamlanmasına karşılık işgücü, satın alma, kira vb. toplam giderlerdir. Projelerin başarısı, çıktılarının kapsam ve müşteri beklentilerine uygun olarak sunulması, projenin önceden planlanan zaman planına ve bütçeye uygun teslimi ile ölçülür. Başarı kriterleri olan kapsam, zaman ve maliyetten sapmaların doğru yönetilmemesi durumunda müşteri memnuniyetinin sağlanamayacağı, projelerin gecikeceği ve bütçenin aşılacağı aşikârdır [5].



Şekil 1. Proje yönetimi bilgi alanları
(Project management knowledge areas)

Bu çalışmada, kaynak kısıtlı projelerin birçoğunun başarısızlığına neden olan çizelgeleme ile ilgili yöntemler sunulmuştur. Öncelikle kaynak kısıtlı projelerin doğru çizelgenmesi için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Özellikle projelerdeki aktivite sayısının fazla olduğu durumlarda karmaşık yapıya sahip bu modelin en iyi çözümünün bulunamadığı görülmüştür. Bu nedenle problemin başarılı bir şekilde çözülmesi amacıyla olurlu bir başlangıç çözümü kullanan hibrit meta sezgisel geliştirilmiştir. Önerilen yöntemler, Türkiye’de hizmet vermekte olan ve çalışmalarını büyük ölçüde proje bazlı yürüten bir bilgi teknolojileri şirketinde uygulanmış ve CPLEX’e kıyasla daha kısa sürede daha iyi sonuç elde edildiği görülmüştür. Makalenin devamı şu şekilde özetlenmiştir. 2. bölümde proje çizelgeleme yöntemleri ve meta sezgisel yaklaşımlarla ilgili literatürde yer alan çalışmalar aktarılacak, 3. bölümde önerilen matematiksel model ve hibrit meta sezgisel yaklaşım sunulacak, 4. bölümde önerilen yöntemlerin gerçek hayat uygulaması

detaylandırılacak, 5. bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalar aktarılacaktır.

2. PROJE ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİ VE META SEZGİSEL YAKLAŞIMLAR LİTERATÜR TARAMASI

(LITERATURE REVIEW ON PROJECT SCHEDULING METHODS AND METAHEURISTICS)

Zaman yönetimi; projelerin daha üretken ve verimli bir şekilde yürütülmesi, planlanan çalışmaların onaylanan süre içinde tamamlanması için takvimin kontrolünü temsil eder. Proje zaman yönetiminde öncelikle müşteri beklentileri ve kapsama uygun olarak en az zaman ve kaynak ihtiyacı olan faaliyetler tanımlanır. Faaliyetlerin doğru tanımlanması, proje süresinin doğru tahmini ve geliştirilecek ürün ya da servisin kalitesi açısından çok önemlidir.

Proje süresince yürütülecek faaliyetler arasında çeşitli mantıksal ilişkiler vardır. Örneğin arasında girdi-çıkı ilişkisi olan iki faaliyetten birinin başlaması için diğerinin tamamlanmış olması gerekir. Bazı durumlarda ise bir proje faaliyetinin başlaması için diğerinin başlamış olması gerekir. Projelerde etkin bir zaman yönetimi için doğru tanımlanmış faaliyetler arasındaki ilişkilerin hatasız belirlenmesi beklenir. Sonraki aşamada proje faaliyetlerinin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan iş gücü, malzeme, araç-gereç vb. kaynaklar tahmin edilir. Proje faaliyetleri arasındaki ilişki belirlendikten sonra farklı teknikler kullanılarak her faaliyetin ne kadar sürede tamamlanacağı tahmin edilir. Faaliyet sürelerinin tahmininde yapılacak hata, projelerin bitiş zamanını doğrudan etkileyeceğinden faaliyet sürelerinin olabildiğince doğru tahmin edilmesi şarttır. Hangi tahmin yönteminin kullanılacağı; organizasyonun stratejilerine, yöntemin kullanılması için gerekli bilgilere, proje paydaşlarının deneyimine, beklenen doğruluk payına göre değişmektedir [6]. Uzman görüşü, analog (örneksel) tahmin, parametrik tahmin ve üç nokta tahmini yaygın kullanılan yöntemlerdir [1]. Arkes [7] ile Lin ve Bier [8] tarafından önerilen uzman görüşü, konuyla ilgili deneyime sahip kişilerin ilettiği bilgiye göre proje faaliyetlerinin ne zaman biteceğinin tahmin edildiği yöntemdir. Analog yöntem, proje ve aktivite seviyesinde kullanılabilen, uzman görüşü ve geçmiş verilere dayalı tahmin yöntemidir. Üzerinde çalışılan proje ya da aktivitenin kıyaslandığı geçmiş proje ya da aktiviteye benzerlik oranı, tahminin doğruluğunu etkileyen en önemli faktördür. Diğer tahmin yöntemlerinden daha az zaman gerektirmesine karşılık analog yöntemin doğruluk oranı genelde düşüktür [1]. Parametrik yöntemde, gerekli sürenin tahmin edilmesinde geçmiş veriler ve farklı değişkenler arasındaki istatistiksel ilişki kullanılır. Kullanılan verinin doğru olması durumunda parametrik yöntemle elde edilen tahminin doğruluk payı, analog yöntemle göre daha yüksektir. Bu yöntem; havacılık ve uzay, inşaat ve bilgi teknolojileri alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [9]. İstatistiksel olarak bir proje ya da proje aktivitesinin önceden belirlenmiş bir sürede tamamlanma olasılığı düşüktür. Bu nedenle tek bir değer tahmin edildiği yöntem yerine, üç nokta tahmini yaygın

kullanım alanına sahiptir. Bu yöntemde proje ve aktiviteler ile ilgili fırsat ve tehditlerin doğru değerlendirilmesi sayesinde, “iyimser (İ)”, “olası (O)” ve “kötümser (K)” şeklinde üç tahmini süre geliştirilir. Nihai aktivite süresi, her tahminin eşit öneme sahip olduğu düşüncesiyle basit ortalama yöntemi kullanılarak $(\bar{I} + O + K) / 3$ şeklinde hesaplanabilir. Öte yandan bazı durumlarda iyimser ve kötümser tahmine kıyasla olası tahminin daha önemli olduğu varsayılabilir. Bu nedenle $(\bar{I} + 4xO + K) / 6$ formülüyle beta dağılımının kullanıldığı üç nokta tahmini uygulamada yaygındır [1].

Proje aktivite süreleri tahmin edildikten sonra proje zaman çizelgesi hazırlanır ve projenin ne zaman tamamlanacağı belirlenir. Bu yöntemlerden en yaygın olanları; Gant Şeması, Kritik Yol Yöntemi (Critical Path Method - CPM) ve Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniğidir (Program Evaluation and Review Technique - PERT) [10]. Gant şeması, proje faaliyetlerinin birbirleriyle ilişkilerinin ve sürelerinin bir zaman ekseninde gösterildiği bir şemadır. Bu şemada faaliyetler dikey, aktivite sürelerini referans olarak belirlenen başlangıç-bitiş tarihleri ise yatay eksende sunulur. Gant şeması, özellikle faaliyet sayısının çok ve faaliyetler arası ilişkilerin karmaşık olduğu projelerde kullanışlı değildir. Bu tarz projelerin zaman çizelgelerinin hazırlığında ağ diyagramlarını temel alan CPM ve PERT teknikleri daha yaygındır. CPM ve PERT yöntemlerinin temeli, proje faaliyetleri ve bu faaliyetler arasındaki mantıksal ilişkileri grafik şeklinde gösteren ağ diyagramına dayanmaktadır. İki yöntemin amacı, projenin tüm kaynaklarının (iş gücü, malzeme, teçhizat vb.) optimum kullanımı ile projenin beklenen ve önceden onaylanmış sürede tamamlanmasını sağlamaktır. Bu yöntemler sayesinde ağ diyagramının en uzun yolu (kritik yol) bulunur, projenin tamamlanma süresini etkileyen kritik faaliyetler ve projenin toplam süresi belirlenir, kritik olmayan faaliyetlerden ne kadar kaynak aktarılacağı görülür. CPM ve PERT yöntemleri arasındaki temel fark, proje faaliyet sürelerinin deterministik olup olmamasıdır. CPM, aktivitelerin tamamlanma sürelerinin deterministik olduğu (kesinlik içerdiği) projelerde kullanılır. PERT ise faaliyetlerin tamamlanma sürelerinin kesin olarak bilinemediği (stokastik) projelerde kullanılır. Böylece CPM genellikle önceden tecrübe edilmiş projelerde kullanılmaktayken, PERT'in kullanımı ilk defa gerçekleştirilecek olan projelerde daha yaygındır. CPM ve PERT; Badruzzaman vd. [11], Azaron vd. [12], Hendradewai [13] ile Kholil vd. [14] başta olmak üzere farklı sektörlerde gerçekleştirilen projelerin zaman çizelgelemesi için literatürde yaygın kullanılmıştır. PERT tekniğinde, beta dağılımı ile üç nokta tahmini kullanılarak her faaliyetin tamamlanması için ortalama süre ve standart sapma hesaplanır. Kritik faaliyetlerin varyansları toplanarak, değerlerin karekökünün alınmasıyla projenin standart sapması tespit edilir. Böylece CPM'den farklı olarak PERT yönteminde, bir projenin istenen tarihteki tamamlanma olasılığı elde edilir. PERT yöntemindeki beta dağılımının kullanımı literatürde çok sayıda çalışmada tartışılmış ve farklı dağılımların kullanılması önerilmiştir. Örneğin Kotiah ve Wallace [15] iki taraftan kesilmiş normal dağılımı,

Johnson [16] üçgen dağılımı, Mohan vd. [17] log-normal dağılımı, Hahn [18] beta ve düzgün dağılımı, Trietsch vd. [19] ise Parkinson dağılımının kullanımını önermiştir.

Zaman yönetimine etki eden parametre-kısıtlar arttıkça ve projelerin büyüklüğüne bağlı olarak aktivite sayısı çoğaldıkça projeler karmaşık hale gelmiş, böylece çizelgeleme probleminin en iyi çözümünün elde edilmesi için matematiksel modellere ihtiyaç duyulmuştur [20]. Matematiksel modellerin optimum çözümünün Gant Şeması, CPM ve PERT ile bulunamayacağı aşikardır.

Tamsayılı lineer programlama ile modellenen ve karmaşık olmayan matematiksel modellerin en iyi sonucunun bulunması amacıyla Dantzig vd. [21], Gomory [22], Bellman [23] ve Geoffrion [24] tarafından Dal – Sınır, Kesme Düzlemi, Dinamik Programlama ve Lagrange Gevşetme yöntemlerinin kullanımı önerilmiştir. NP – Zor nitelikli matematiksel modellerde ise problemin boyutuna bağlı olarak en iyi çözümü bulmak için gerekli zaman üstel artış gösterir. Bu problemlerde kabul edilebilir süre içinde en iyi çözüm bulunamamaktadır. Bu nedenle NP – Zor problemlerde, en iyi çözümün bulunmasını garanti etmeyen ancak kesin yöntemlere kıyasla daha kısa sürede en iyiyi yakın uygun çözüm sağlayan meta sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan meta sezgisel yöntemler; Tabu Arama, Genetik Algoritma, Benzetimli Tavlama, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleridir.

Glover [25] tarafından önerilen Tabu Arama, kısa süre içinde en iyi çözüme yakın sonuçları vermektedir. Bu sayede, farklı karmaşık problemler için uygun çözümün bulunması amacıyla literatürde çok sayıda çalışmada kullanılmıştır. Arıkan [26] tarafından montaj hattı dengeleme ve Başar vd. [27] tarafından banka şube yerleşim probleminin çözümü için Tabu Arama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde, yerel en iyi noktaya takılmayı engellemek için mevcut çözümü iyileştirmeyen hareketlere izin verilir ve aramanın tarihçesini tutan tabu listeleri sayesinde önceki aşamalarda ziyaret edilen noktalara tekrar uğrama olasılığı düşer. Arama uzayı, komşuluk yapısının nasıl olacağı, tabu listesinin oluşturulması ve tabunun yıkım koşulları; Tabu Arama tekniğinde çözüm kalitesine etki eden önemli unsurlardır.

Holland [28] tarafından önerilen Genetik Algoritma, Tabu Arama gibi karmaşık yapıdaki problemler için kısa sürede başarılı sonuçların bulunmasına sağladığı katkı dolayısıyla Goldberg [29], Uçaner ve Özdemir [30] ile Hosseinabadi vd. [31] tarafından farklı çalışmalarda kullanılmıştır. Bu yöntemde genetik bilimi ile uyumlu olarak popülasyon, kromozom, gen, mutasyon, kopyalama, çaprazlama vb. kavramlar kullanılır. Genetik Algoritmada sonuca etki eden en önemli parametreler; kodlama, seçim yöntemi, mutasyon oranı ve yöntemi, uygunluk fonksiyonudur.

Cerny [32] tarafından önerilen Benzetimli Tavlama stokastik arama özelliğini kullanan meta sezgisel yöntemlerden

biridir. Bu teknikte, olasılığı gittikçe azalmak koşuluyla mevcut amaç fonksiyonundan daha kötü çözümlere izin verilir. Şahin [33] tarafından dinamik tesis tasarımı ve Abdel-Basset vd. [34] tarafından özellik seçimi konusunda Benzetimli Tavlama yönteminin kullanılması önerilmiştir. Başlangıç sıcaklığı, sıcaklık azaltma fonksiyonu, aranacak çözüm sayısı; bu yöntemin çözüm kalitesine etki eden parametrelerdir. Karınca Kolonisi Optimizasyonu karınca topluluklarının davranışlarının matematiksel modellerine dayalı bir meta sezgiseldir [35]. Keskintürk ve Söyler [36] ile Deng vd. [37], çalışmalarında Karınca Kolonisi Optimizasyonunu kullanmıştır. Parçacık Sürü Optimizasyonu, kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilen ve parçacıkların sürü halindeki hareketinden yararlanan bir meta sezgisel yaklaşımdır [38]. Bu parçacıklar, başlangıç aşamasında sezgisel ya da rassal olarak belirlenip sonraki adımlarda serbest bırakılır ve her biri çözüm adayını temsil eder. Parçacık Sürü Optimizasyonu, Turan vd. [39] ile Lei vd. [40] tarafından önerilmiştir.

Kaynak kısıtlı projelerin çizelgelenmesine yönelik çalışmalar birçok araştırmacının ilgisini çekmiş, problemin çözümüne yönelik çok sayıda kesin ve sezgisel yöntem önerilmiştir. Talbot [41], aktivite listesinde yüksek önceliğe sahip işlerin öncelikle atanmasını önermiştir. Patterson [42], toplam proje süresini en küçükleme amacıyla en kısa işlem süresi kriterini uygulamıştır. Brucker vd. [43], Dal Sınır ve Kesme Düzlemi yöntemlerinin kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemlerinde en iyi sonuca ulaşmakta yetersiz olduğunu öne sürmüştür. Rahman vd. [44], yerel arama tekniği olarak memetik algoritmanın kullanımını önermiştir. Baar vd. [45] ile Pan vd. [46], proje zaman çizelgelemesi için Tabu Arama kullanımını önermiştir. Ayrıca Leu vd. [47], Demirel vd. [48], Kumar ve Kumar [49], Hussain vd. [50] ile Calp ve Akcayol [51], çalışmalarında proje çizelgeleme probleminin çözümü için Genetik Algoritma geliştirmiştir. Ancak literatürdeki çalışmalar, henüz gerçek hayat problemlerinin karmaşıklığını çözebilecek nitelikte değildir [52]. Hartmann ve Briskorn [52], kaynak kısıtlı problemlerin çözümü ile ilgili geliştirilen model ve yaklaşımları özetlemiştir. Bu çalışmada önerilen modelde; literatürden farklı olarak proje aktivitelerinin önemi ve aralarındaki mantıksal ilişki dikkate alınmış, aktivite gecikme ve insan kaynağı maliyetinin en küçülenmesi hedeflenmiştir. Bir sezgisel yöntem ile elde edilen başlangıç çözümü, hibrit meta sezgisel ile iteratif olarak iyileştirilmiş ve en iyi çözüme ulaşılması hedeflenmiştir. Bir teknoloji şirketinin gerçek projeleri üzerinde uygulanan yöntemin kısa sürede başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

3. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL YÖNTEM VE HİBRİT META SEZGİSEL YAKLAŞIM (PROPOSED MATHEMATICAL MODEL AND HYBRID METAHEURISTIC APPROACH)

Proje aktivitelerinin zamanında ve düşük maliyetli tamamlanması genellikle karşılanması zor bir hedeftir. Son dönemlerde proje yönetimi teknikleri gelişmiş olsa da her

projenin yapısal farklılığı, kaynak kısıtları ve sektör dinamikleri göz önünde bulundurulduğunda proje aktivitelerinin gecikmesi sık karşılaşılan bir durumdur [53]. Proje aktivitelerinden birinin beklenen zamanda tamamlanmaması, aralarındaki mantıksal ilişkiye bağlı olarak diğer aktivitelerin başlangıç / bitiş zamanını etkiler, böylece projelerin gecikmesine neden olur. Bu nedenle, projelerin çizelgelenmesi, aktivitelerin doğru zamanda başlayıp beklenen zamanda tamamlanması ve kaynak kısıtının doğru kullanımı proje yönetimi açısından çok önemlidir. Gant Şeması, CPM ve PERT'in proje çizelgelenmesi için en iyi çözüm verememesi, bu konuda matematiksel modele ihtiyaç olduğunu gösterir [54]. Bu çalışmada işgücü kaynağının kısıtlı olduğu durumlarda, proje aktivitelerinin gecikmesi ve toplam işgücü maliyetini en küçükleyen bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model şu şekildedir: (Modelde kullanılan notasyonun açıklaması Tablo 1'de verilmiştir).

$$\text{Enküçükle } \sum_{i \in I (k_i > l_i)} u_i (k_i - l_i) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijt} x_{ijt}$$

Öyle ki;

$$k_i = m_i + d_i \quad \forall i \in I \quad (1)$$

$$m_b \geq k_a \quad \forall (a, b) \in I_1 \quad (2)$$

$$k_g \geq k_f \quad \forall (f, g) \in I_2 \quad (3)$$

$$m_z \geq m_y \quad \forall (y, z) \in I_3 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} \leq p_j \quad \forall t \in T, j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} x_{ijt} \leq r_j \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$x_{ijt} = q_{ij} \times H_{it} \quad \forall t \in T, j \in J, i \in I \quad (7)$$

$$H_{it} \geq S_{it} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (8)$$

$$H_{it} \geq E_{it} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} H_{it} = d_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$S_{it} = E_{i,t+d_i} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (11)$$

$$H_{i,(t+f-1)} \geq S_{it} \quad f = 1, 2, \dots, d_i, \forall t \in T, i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{t \in T} E_{it} = 0 \quad t \neq k_i, \forall i \in I \quad (13)$$

$$E_{it} = 1 \quad t = k_i, \forall i \in I \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} S_{it} = 0 \quad t \neq m_i, \forall i \in I \quad (15)$$

$$S_{it} = 1 \quad t = m_i, \forall i \in I \quad (16)$$

$$E_{it}, S_{it}, H_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (17)$$

$$k_i, m_i \geq 0, \text{Integer} \quad \forall i \in I \quad (18)$$

Amaç fonksiyonu, projedeki tüm aktivitelerin gecikmesinden kaynaklı ceza ve proje aktivitelerinin yürütülmesi için tüm dönemlerde gerekli insan kaynağı maliyetinin minimize edilmesini temsil eder. Her aktivitenin gecikmesi, diğer aktiviteleri ve projeyi farklı seviyede etkileyeceğinden u_i gecikme cezasının yanı sıra aktivitelerin kritikliğini temsil eder. Amaç fonksiyonunun tutarlı olması için takvim günü şeklinde olan l_i , k_i , ve m_i değerlerinin sayısallaştırılması gerekmektedir. Kısıt (1), her aktivitenin başlangıç zamanı ve tahmini süresinin toplanarak bitiş zamanının hesaplanmasını gösterir. Kısıt (2), (3) ve (4) proje aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişkiyi temsil eder. Öyle ki aktiviteler arasında üç farklı ilişki olabileceği düşüncesiyle; Kısıt (2) bitir-başla ilişkisinde, bir aktivitenin başlaması için başka aktivitelerin tamamlanması gerektiğini temsil eder. Kısıt (3) bitir-bitir ilişkisinde, bir aktivitenin tamamlanması için başka aktivitelerin tamamlanması gerektiğini ve Kısıt (4) ise başla-başla ilişkisinde, bir aktivitenin başlaması için başka aktivitelerin başlamış olması gerektiğini gösterir. Kısıt (5), her kaynak için günlük işgücü kapasitesinin insan-saat cinsinden belirlenmiş maksimum seviyenin (p_j) altında olmasını gerektirir. Benzer şekilde Kısıt (6), her kaynak için yıllık işgücünün insan-saat cinsinden r_j 'nin altında olmasını gösterir. Kısıt (7)'de, üzerinde çalışılan her proje aktivitesi için her dönem ne kadar kaynağa ihtiyaç duyulduğu hesaplanır. Kısıt (8) ve (9) proje aktivitesi ile ilgili çalışmaların bir dönem başlaması ya da bitmesi için aktivitenin o dönem devam etmesi gerektiğini temsil eder. Kısıt (10), proje aktivitesinin tahmini süre (d_i) boyunca devam ettiğini gösterir. Kısıt (11), her aktivitenin başlangıç anından d_i süre sonra bittiğini; Kısıt (12) ise aktivite tamamlanmadan önce d_i süre boyunca devam ettiğini temsil eder. Kısıt (13) ve (14), her aktivitenin tamamlanma zamanında (k_i) bittiğini gösterir. Aynı şekilde Kısıt (15) ve (16), her aktivitenin başlama zamanında (m_i) başladığını gösterir. Kısıt (17), bir proje aktivitesinin belli bir dönem çalışıldığını, başladığını ya da tamamlandığını gösteren değişkenlerin ikil olduğunu tarif eder. Kısıt (18) aktivitelerin başlama ve bitiş zamanının pozitif tamsayı olduğunu gösterir.

Tablo 1. Matematiksel modelde kullanılan notasyon (The notation used in the mathematical model)

Notasyon	Açıklama
Kümeler	
T	Planlama dönemleri (gün)
I	Planlanması beklenen proje aktiviteleri
I ₁	Aralarında bitir-başla ilişkisi olan proje aktiviteleri
I ₂	Aralarında bitir-bitir ilişkisi olan proje aktiviteleri
I ₃	Aralarında başla-başla ilişkisi olan proje aktiviteleri
J	Proje aktivitesinin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan yazılım, analiz, test kaynağı
İndisler	
t	Günlük planlama dönemi
i	Bekleyen proje aktivitesi
j	Proje aktivitesinin yürütülmesi için atanan yazılım, analiz, test kaynağı
Parametreler	
d _i	Proje aktivitesi i'yi tamamlamak için gereken tahmini süre (insan-saat cinsinden)
q _{ij}	Proje aktivitesi i'yi tamamlamak için gereken işgücü kaynağı j (insan-saat cinsinden)
p _j	Günlük insan-saat cinsinden kaynak j'nin kapasitesi
r _j	Yıllık insan-saat cinsinden kaynak j'nin kapasitesi
l _i	Projenin gecikmemesi için aktivite i'nin bitirilmesi beklenen zaman
u _i	Proje aktivitesi i'nin gecikme maliyeti
c _{ijt}	Proje aktivitesi i'yi, j kaynağı kullanarak t döneminde yürütmenin sabit maliyeti
Karar Değişkenleri	
x _{ijt}	Proje aktivitesi i'yi, t döneminde yürütmek için gereken insan-saat cinsinden j kaynağı
S _{it}	Eğer proje aktivitesi i, dönem t'de başlamışsa 1, aksi durumda 0
E _{it}	Eğer proje aktivitesi i, dönem t'de tamamlanmışsa 1, aksi durumda 0
Notasyon	
H _{it}	Eğer proje aktivitesi i, dönem t'de devam ediyorsa 1, aksi durumda 0
m _i	Proje aktivitesi i için başlama zamanı
k _i	Proje aktivitesi i için bitiş zamanı

Modelin NP – Zor olduğu, aktivite sayısına bağlı olarak problemin en iyi çözümünü bulmak için gerekli zamanın üstel artış göstereceği ve kabul edilebilir süre içinde en iyi çözümün bulunamayacağı açıktır. Bu nedenle, problemin çözümü için diğer tekniklere kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği bilinen Tabu Arama ve Genetik Algoritma temellerine dayalı hibrit meta sezgisel önerilmektedir [55]. Bu yöntemin adımları şu şekildedir:

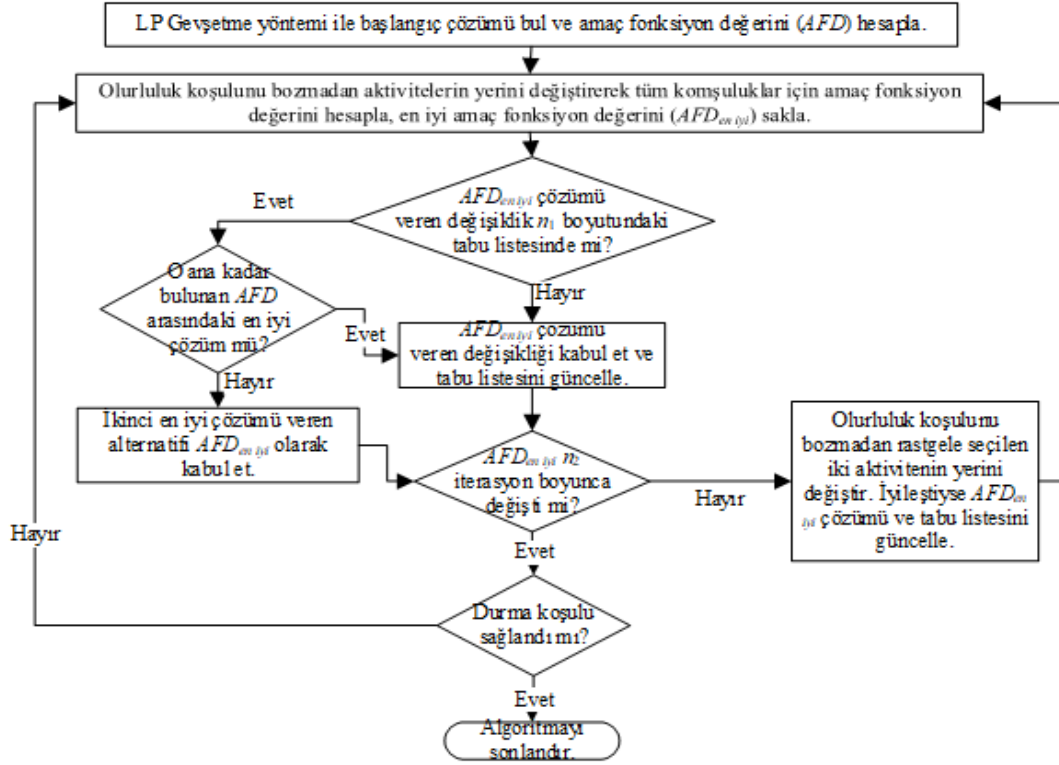
Adım 1: Bir başlangıç çözümü bulunur. Başlangıç çözümünün matematiksel modeldeki kısıtları sağlayacak şekilde olurlu olması için LP-gevşetme yöntemi önerilmektedir. Böylece matematiksel modeldeki ikil değişkenlerin sürekli olduğu varsayılarak t dönem için model çözülür. Böylece aralarındaki mantıksal ilişkiye bağlı olarak aktivitelerin günlük zaman planlaması yapılır ve projeler çizelgelenir. Elde edilen çözümün en iyi amaç fonksiyon değeri hesaplanır ve Adım 2'ye geçilir.

Adım 2: Adım 1'de elde edilen çözümde olurluluk koşulları bozulmadan alternatif çözümler aranır. Komşuluk yapısı olarak her gün için aktivitelerin olabilecek tüm sıralama değişiklikleri önerilir. Böylece olası tüm çözümlerin araştırılması ve en iyi çözüme ulaşılması hedeflenir. Elde edilen tüm çözümlerin amaç fonksiyon değeri kıyaslanır, en iyi çözümü veren değişiklik yapılır ve Adım 3'e geçilir.

Adım 3: Tekrar aynı noktanın ziyaret edilmesini engellemek için yapılan değişiklik n₁ iterasyon boyunca bir tabu listesinde tutulur. Tabu olmasına rağmen amaç fonksiyonunu iyileştiren değişiklik kabul edilir. Baştan itibaren elde edilen en iyi amaç fonksiyon değeri n₂ iterasyon boyunca aynı kalmadığı müddetçe Adım 2'ye dönülür ve yeni çözümler aranır, aksi durumda Adım 4'e geçilir.

Adım 4: Tabu Arama yönteminin çözümü hızla iyileştirdikten sonra yerel en iyi noktaya takılacağı bilinmektedir. Bu nedenle n₂ iterasyon boyunca en iyi amaç fonksiyonunun değişmediği durumda çeşitlendirme uygulanır. Bu amaçla t dönem boyunca her günlük plandaki (olurluluk koşulunu bozmayan) rastgele seçilen iki aktivite Genetik Algoritma yöntemindeki kromozom olarak kabul edilir ve “yer değiştirme” şeklinde mutasyon uygulanır. Böylece sonraki iterasyonlarda yeni ve daha iyi çözümlere ulaşma olasılığı artırılır. Elde edilen çözümün amaç fonksiyonunu iyileştirmesi durumunda en iyi çözüm güncellenir ve Adım 2'ye dönülür.

Adım 5: Durma koşulu olan n₃ iterasyon boyunca önceki adımlar tekrar eder. n₃ iterasyonun sonunda algoritma durdurulur, en iyi çözümü veren çizelge ve amaç fonksiyon değeri tutulur.



Şekil 2. Hibrit meta sezgisel yöntemin adımları (Steps of hybrid metaheuristic)

Hibrit meta sezgisel yöntemin adımları ayrıca Şekil 2’de gösterilmiştir.

4. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Bölüm 3’te sunulan matematiksel model ve hibrit meta sezgisel yöntem, bilgi teknolojileri sektöründe faaliyet sunan bir Türk firmasında gerçek hayat verileri kullanılarak uygulanmıştır. Bu projelerin çizelgelenmesi için gereken tahmini süre (d_i) ve kaynak ihtiyacını temsil eden parametreler, işletmede en az 10 yıl boyunca görev alan yönetici pozisyonundaki uzmanların görüşünden yararlanılarak belirlenmiştir. Çalışmanın kısıt ve varsayımları şu şekildedir:

Kısıtlar:

- Proje aktivitelerini yürütmek için işletmede toplam 420 yazılım, 312 analiz ve 105 test personeli görev almaktadır. Her proje aktivitesinin kaç adet yazılım, analist ve test kaynağı gerektirdiği projenin ana sorumlusu teknik ekibin yöneticisi tarafından belirlenmektedir.
- Proje aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişki, aktivitelerin başlangıç-tamamlanma zamanını etkilemektedir.

Varsayımlar:

- Resmi tatil günleri haricinde bir yıl boyunca 240 gün çalışılacağı varsayılmıştır.

- Her kaynağın günde 8 saat çalışacağı varsayılmıştır.
- Her kaynak aynı anda sadece bir projeye atanabilmektedir.

Ayrıca kaynakların uygunluğu açısından planlı izinler dikkate alınmıştır. Her projede görev alacak ekip çalışanlarının ortak görüşü doğrultusunda aktivitelerin kritikliği belirlenmiş, böylece her aktivitenin birim gecikme maliyeti elde edilmiştir. Her kaynak tipinin birim zaman çalışma maliyeti, işletmenin İnsan Kaynakları yöneticiliği tarafından sunulmuştur.

Matematiksel modelde kullanılan bu parametrelerin etkinliğinin test edilmesi ve hibrit meta sezgisel yöntemdeki n_1 , n_2 ve n_3 parametrelerinin belirlenmesi için işletmede önceki 3 yıl (2018-2020) içinde tamamlanan 154 proje üzerinde uygulama yapılmıştır. Bu projelerin aktivite sayıları ve aktivite sayıları arasındaki mantıksal ilişkileri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2’deki verilere göre 2018-2020 arasında üzerinde çalışılan projelerin büyük çoğunluğunda aktivite sayısının fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca proje aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişkinin büyük oranda bitir-başla olduğu, böylece bir aktivitenin başlamasının başla aktivitenin tamamlanmasına bağlı olduğu açıktır. Başla-başla ve bitir-bitir ilişkilerinin, aktivite sayısı büyük olan projelerde görüldüğü fark edilmektedir.

Önerilen hibrit meta sezgisel yöntemin parametrelerinden olan n_1 , n_2 ve n_3 için farklı kombinasyonlar test edilmiştir.

Tablo 2. 2018-2020 Arasında tamamlanan projelerin aktivite sayıları ve aktiviteler arası mantıksal ilişkiler (Number of activities and logical relationships between activities for projects completed in 2018-2020)

Proje Aktivite Sayısı:Z	Proje Adedi	Aktiviteleri Arasında Bitir-Başla İlişkisi Olan Proje Sayısı	Aktiviteleri Arasında Başla-Başla İlişkisi Olan Proje Sayısı	Aktiviteleri Arasında Bitir-Bitir İlişkisi Olan Proje Sayısı
$0 \leq z < 10$	0	0	0	0
$10 \leq z < 20$	1	1	0	0
$20 \leq z < 30$	4	4	0	0
$30 \leq z < 40$	5	5	0	0
$40 \leq z < 50$	11	9	2	0
$50 \leq z < 60$	12	8	2	2
$60 \leq z < 70$	17	13	1	3
$70 \leq z < 80$	20	15	4	1
$80 \leq z < 90$	24	18	3	3
$90 \leq z < 100$	28	20	2	6
$z \geq 100$	32	27	3	2
Toplam	154			

Tabu listesi uzunluğu olan n_1 'in sabit bir değer yerine aktivite sayısına bağlı olacak şekilde dinamik tanımlanmasının daha başarılı sonuçlar vereceği aşikârdır. Öyle ki faaliyet sayısının az ya da çok olması, Tabu Arama yönteminde kabul edilen bir hareketin ne kadar süre tabu olmasını doğrudan etkileyecek, aktivite sayısı arttıkça daha büyük bir tabu listesinin kullanımı global en iyi çözüme ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Bu nedenle her projede aktivite sayısının dörtte biri ile yarısı arasındaki tüm değerler, tabu listesi uzunluğu olarak test edilmiş ve tüm kombinasyonlar ile elde edilen çözümler arasından en iyi olanı referans alınmıştır. Örneğin projenin aktivite sayısı 20 ise tabu listesi uzunluğu olarak {5, 6, 7, 8, 9, 10}, aktivite sayısı 30 ise {8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15} değerlerinin verdiği sonuçlar incelenmiştir. Sonuç olarak projenin aktivite sayısına bağlı olarak en iyi değeri veren tabu listesi uzunluğu, ilgili proje için n_1 değeri olarak kabul edilmiştir. Benzer şekilde çeşitlendirme öncesi amaç fonksiyonunun değişmediği toplam iterasyon sayısı olan n_2 için alternatif değerlerin aktivite sayısına bağlı olarak dinamik bir şekilde belirlenmesi çözüm kalitesini arttıracaktır. Bu amaçla tabu listesi örneğinde olduğu gibi yine aktivite sayısının dörtte biri ile yarısı arasındaki tüm değerler, n_2 için alternatif olarak ele alınmıştır. Bu durum, aktivite sayısı 20 olan bir projede {5, 6, 7, 8, 9, 10} iterasyon boyunca en iyi çözüm değişmediği takdirde mutasyon uygulanacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca kabul edilebilir süre olan durma koşulu olarak n_3 için 250, 500 ve 1.000 iterasyon test edilmiştir. Sonuç olarak ILOG OPL Studio (CPLEX versiyon 20.1) aracılığıyla, Intel (R) Core (TM) i5-3470 CPU 3.20 GHz 16 GB RAM 64-bit işletim sistemine sahip bilgisayar üzerinde 2018-2020 arasında üzerinde çalışılan projeler için matematiksel model, LP-gevşetme yöntemi ve 1.000 iterasyon sonunda hibrit meta sezgisel ile elde edilen çözümlerin detayları Tablo 3'te sunulmuştur. Aktivite sayısı 30'dan fazla olan projeler için CPLEX ile en iyi çözümün bulunamadığı görülmüş, karşılaştırma açısından CPLEX ile 10 saat (36.000 sn.) sonunda bulunan en iyi tamsayı değeri dikkate alınmıştır.

Tablo 3'te sunulan değerlere göre [(önerilen başlangıç çözümü ya da meta sezgisel yaklaşım ile bulunan sonuç/CPLEX ile bulunan çözüm)-1] formülü ile % olarak hesaplanan CPLEX'e uzaklığın negatif olduğu durumlar, önerilen yöntemlerle elde edilen değerlerin CPLEX'ten daha iyi olduğunun göstergesidir. Bu durum, amaç fonksiyonunun en küçükleme niteliğinde olmasının bir sonucudur. Tablo 3'te görüldüğü üzere, aktivite sayısı 30'dan küçük 5 proje için en geç 90,57 sn. içinde CPLEX ile en iyi çözüm bulunmuştur. Bu projeler için başlangıç çözüm yöntemi olan LP-gevşetme ile CPLEX'e ortalama %4 uzaklıkta çözüm kısa sürede bulunmuştur. Ayrıca hibrit meta sezgisel yaklaşım ile bu 5 proje için en iyi çözüm, ortalama olarak CPLEX'ten daha kısa sürede bulunmuştur (5 proje için CPLEX'in çözüm bulma süresi ortalama 59,16 sn. iken, hibrit sezgisel yöntemin ortalama süresi 35,65 sn.'dir). Aktivite sayısı 30'dan fazla olan 149 proje için CPLEX'in 36.000 sn. sonunda verdiği en iyi tam sayı çözümü ile hibrit meta sezgisel kıyaslandığında, tüm projeler için önerilen meta sezgisel yöntemin daha kısa sürede daha iyi sonuç (en küçükleme niteliğindeki amaç fonksiyonunda daha düşük değer) verdiği görülmüştür. 154 proje için CPLEX'in ortalama 34.833 sn.'de bulunduğu değerlere kıyasla, önerilen hibrit yöntemle ortalama 178 sn.'de %3,91 oranında daha iyi çözüm bulunduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca geçmiş projelerin gerçekleşen verileri ile kıyaslandığında önerilen yöntemle göre 154 projeden sadece 7 adedinde gecikme olduğu, bu gecikmelerin de toplam aktivite sayısı 50'den az olan projelerde görüldüğü analiz edilmiştir. Bu durum, özellikle aktivite sayısı fazla olan projelerde amaç fonksiyonu, çözüm süresi ve zaman planı açısından önerilen yöntemlerin başarılı olduğunu kanıtlamaktadır. Sonuç olarak 2018-2020 yıllarında gerçekleşen 154 proje üzerindeki analiz sayesinde önerilen yöntemlerin başarılı olduğu test edilmiş, ayrıca planlama aşamasındaki projeler için kullanılacak parametrelerin en iyi değerleri belirlenmiştir. Böylece önerilen yöntemler, işletmenin 2021 yılında üzerinde çalışacağı 64 projenin çizelgelenmesi için uygulanmıştır. Bu projelerin aktivite sayıları ve aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişki dağılımı Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3: 2018-2020 Arasında tamamlanan projeler için önerilen yöntemlerin çözümleri
(Results of proposed methods for the projects completed in 2018-2020)

Proje	Toplam Aktivite Sayısı	CPLEX (Amaç Fonksiyon Değeri)	CPLEX Süre (sn)	LP-Gevşetme (Amaç Fonksiyon Değeri)	LP-Gevşetme Yönteminin CPLEX'e Uzaklığı	LP Gevşetme Süre (sn)	Hibrit Meta Sezgisel Amaç Fonksiyon Değeri	Hibrit Meta Sezgisel Yöntemin CPLEX'e Uzaklığı	Hibrit Meta Sezgisel Süre (sn): 1000 iterasyon	Önerilen Yöntem Sonunda Projenin Gecikme Durumu (E: Gecikme var, H: yok)
1	14	14,56	18,20	15,20	4,40%	2,56	14,56	0,00%	23,76	H
2	21	20,25	50,54	20,94	3,40%	10,29	20,25	0,00%	29,77	H
3	25	24,93	67,36	27,40	9,90%	13,76	24,93	0,00%	33,66	E
4	26	27,56	69,13	27,62	0,20%	20,41	27,56	0,00%	41,06	H
5	26	43,85	90,57	44,77	2,10%	22,55	43,85	0,00%	49,99	E
6	33	61,50	36,000	66,36	7,90%	24,69	60,49	-1,64%	54,36	E
7	35	68,57	36,000	70,35	2,60%	27,33	58,56	-14,60%	53,70	H
8	35	66,41	36,000	69,93	5,30%	39,18	63,37	-4,58%	63,79	H
9	36	68,50	36,000	72,34	5,60%	41,68	65,40	-4,53%	75,57	H
10	39	69,67	36,000	71,83	3,10%	45,57	59,57	-14,50%	74,34	E
11	40	70,88	36,000	77,90	9,90%	48,79	66,83	-5,71%	93,56	H
12	41	77,55	36,000	81,04	4,50%	50,66	70,46	-9,14%	87,37	H
13	41	76,50	36,000	77,95	1,90%	51,08	76,45	-0,07%	85,62	H
14	42	77,38	36,000	81,48	5,30%	51,16	70,34	-9,10%	98,48	H
15	43	78,24	36,000	85,13	8,80%	51,39	72,24	-7,67%	89,92	E
16	43	79,67	36,000	86,36	8,40%	51,43	71,57	-10,17%	103,12	E
17	45	82,48	36,000	85,86	4,10%	51,91	81,41	-1,30%	114,10	H
18	45	83,37	36,000	86,70	4,00%	52,31	79,28	-4,91%	126,18	H
19	46	83,40	36,000	86,32	3,50%	52,58	76,31	-8,50%	120,05	H
20	46	84,60	36,000	90,52	7,00%	52,86	79,59	-5,92%	136,75	H
21	48	90,45	36,000	92,26	2,00%	52,93	80,42	-11,09%	128,22	E
22	51	92,28	36,000	94,40	2,30%	53,31	82,19	-10,93%	149,59	H
23	52	101,14	36,000	105,29	4,10%	53,81	100,10	-1,03%	117,12	H
24	52	102,11	36,000	102,31	0,20%	54,35	100,05	-2,02%	125,08	H
25	52	102,46	36,000	107,68	5,10%	54,41	94,39	-7,88%	124,59	H
26	53	103,47	36,000	109,06	5,40%	54,62	98,47	-4,83%	137,55	E
27	54	103,49	36,000	111,15	7,40%	54,93	97,41	-5,87%	114,95	H
28	55	103,71	36,000	107,75	3,90%	55,09	98,67	-4,86%	135,76	H
29	55	104,53	36,000	114,35	9,40%	55,20	97,46	-6,76%	117,92	H
30	56	104,80	36,000	112,56	7,40%	55,50	103,76	-0,99%	136,96	H
31	58	105,36	36,000	112,41	6,70%	55,50	105,33	-0,03%	132,71	E
32	59	105,95	36,000	110,71	4,50%	55,55	104,90	-0,99%	156,29	H
33	59	106,27	36,000	107,44	1,10%	56,04	101,19	-4,78%	116,37	H
34	60	107,33	36,000	113,98	6,20%	56,28	104,24	-2,88%	112,58	H
35	60	107,81	36,000	112,98	4,80%	56,82	107,80	-0,01%	158,47	H
36	61	108,01	36,000	109,53	1,40%	57,21	105,95	-1,91%	200,25	H
37	62	108,59	36,000	116,62	7,40%	57,39	106,59	-1,84%	162,01	H
38	62	109,54	36,000	115,79	5,70%	57,90	102,44	-6,48%	120,88	H
39	62	110,46	36,000	112,78	2,10%	58,00	107,46	-2,72%	149,37	H
40	63	110,92	36,000	114,13	2,90%	58,22	110,85	-0,06%	195,09	H
41	64	111,36	36,000	112,03	0,60%	58,41	105,34	-5,41%	113,77	H
42	65	111,75	36,000	115,44	3,30%	58,69	109,71	-1,83%	125,07	H
43	65	112,53	36,000	114,67	1,90%	58,83	111,52	-0,90%	205,20	H
44	65	112,76	36,000	121,44	7,70%	58,85	108,75	-3,56%	179,43	H
45	65	113,02	36,000	116,63	3,20%	59,13	109,01	-3,55%	165,69	H
46	66	113,48	36,000	117,68	3,70%	59,68	113,39	-0,08%	219,97	H
47	67	113,50	36,000	117,81	3,80%	59,74	105,41	-7,13%	185,52	H
48	68	114,08	36,000	115,11	0,90%	60,34	103,99	-8,84%	154,95	H
49	68	114,70	36,000	122,95	7,20%	60,54	107,64	-6,16%	109,79	H
50	69	115,55	36,000	118,66	2,70%	61,09	114,45	-0,95%	155,65	H
51	70	116,00	36,000	123,77	6,70%	61,53	111,00	-4,31%	198,68	H
52	70	117,09	36,000	118,14	0,90%	62,04	112,00	-4,35%	191,51	H
53	71	117,95	36,000	126,21	7,00%	62,43	113,88	-3,45%	163,99	H
54	72	118,74	36,000	123,37	3,90%	62,63	109,69	-7,62%	212,80	H
55	72	119,28	36,000	120,95	1,40%	62,71	117,26	-1,69%	185,27	H
56	72	119,41	36,000	129,20	8,20%	63,29	115,32	-3,43%	181,05	H
57	73	120,15	36,000	131,68	9,60%	63,81	114,06	-5,07%	128,89	H
58	73	120,73	36,000	125,31	3,80%	64,12	117,65	-2,55%	163,53	H
59	73	120,89	36,000	124,40	2,90%	64,19	112,85	-6,65%	125,27	H
60	74	121,79	36,000	128,37	5,40%	64,69	111,73	-8,26%	129,61	H

61	75	122,48	36.000	124,81	1,90%	64,99	122,39	-0,07%	155,44	H
62	76	122,74	36.000	131,09	6,80%	65,54	115,66	-5,77%	223,22	H
63	76	123,10	36.000	124,57	1,20%	66,10	114,10	-7,31%	174,57	H
64	77	123,17	36.000	133,15	8,10%	66,46	114,13	-7,34%	176,90	H
65	77	123,58	36.000	132,84	7,50%	66,88	123,54	-0,03%	219,90	H
66	78	123,81	36.000	126,16	1,90%	67,10	113,77	-8,11%	120,60	H
67	78	124,76	36.000	135,87	8,90%	67,14	124,76	0,00%	137,24	H
68	78	125,16	36.000	136,93	9,40%	67,57	118,09	-5,65%	168,87	H
69	79	125,63	36.000	128,77	2,50%	68,08	115,60	-7,98%	186,11	H
70	79	126,10	36.000	132,66	5,20%	68,71	118,10	-6,34%	137,00	H
71	80	126,22	36.000	138,59	9,80%	69,17	118,12	-6,42%	236,24	H
72	80	127,13	36.000	135,39	6,50%	69,69	126,10	-0,81%	138,71	H
73	80	127,47	36.000	134,23	5,30%	70,27	120,45	-5,51%	196,33	H
74	81	128,32	36.000	131,40	2,40%	70,66	128,27	-0,04%	209,09	H
75	81	128,44	36.000	134,22	4,50%	71,22	128,38	-0,05%	181,02	H
76	82	129,34	36.000	132,18	2,20%	71,93	121,24	-6,26%	151,55	H
77	82	129,84	36.000	135,43	4,30%	72,20	119,80	-7,73%	188,09	H
78	82	130,02	36.000	141,86	9,10%	72,35	129,92	-0,08%	226,07	H
79	82	131,09	36.000	133,58	1,90%	72,76	128,02	-2,34%	230,44	H
80	83	132,35	36.000	139,89	5,70%	72,88	122,34	-7,56%	201,86	H
81	83	132,85	36.000	143,61	8,10%	73,49	128,76	-3,08%	171,25	H
82	84	133,24	36.000	144,03	8,10%	73,74	128,16	-3,81%	138,41	H
83	85	133,96	36.000	145,75	8,80%	74,37	131,86	-1,57%	258,44	H
84	85	134,21	36.000	145,08	8,10%	74,43	127,13	-5,28%	191,97	H
85	86	135,12	36.000	137,83	2,00%	74,71	125,05	-7,45%	165,07	H
86	86	135,29	36.000	145,57	7,60%	75,25	134,27	-0,75%	177,23	H
87	86	136,38	36.000	145,52	6,70%	75,75	131,29	-3,73%	166,74	H
88	87	137,41	36.000	138,37	0,70%	75,82	127,31	-7,35%	199,87	H
89	88	137,67	36.000	143,45	4,20%	75,84	131,65	-4,37%	193,52	H
90	88	138,89	36.000	144,31	3,90%	76,32	136,82	-1,49%	269,54	H
91	88	140,20	36.000	142,44	1,60%	76,72	138,15	-1,46%	273,53	H
92	89	140,55	36.000	143,08	1,80%	76,98	131,50	-6,44%	231,44	H
93	89	141,28	36.000	143,12	1,30%	77,51	140,18	-0,78%	196,25	H
94	89	142,66	36.000	143,09	0,30%	77,82	141,60	-0,74%	243,56	H
95	90	143,59	36.000	149,33	4,00%	78,21	134,51	-6,32%	146,62	H
96	90	144,35	36.000	152,43	5,60%	78,68	141,31	-2,11%	231,75	H
97	90	144,70	36.000	146,58	1,30%	79,04	140,62	-2,82%	188,43	H
98	91	145,35	36.000	153,34	5,50%	79,76	139,31	-4,16%	215,93	H
99	91	145,67	36.000	148,58	2,00%	80,23	138,58	-4,87%	275,77	H
100	92	146,30	36.000	148,05	1,20%	80,32	146,26	-0,03%	184,28	H
101	92	147,63	36.000	151,61	2,70%	80,69	137,54	-6,83%	258,57	H
102	93	147,91	36.000	149,39	1,00%	80,93	147,89	-0,01%	170,07	H
103	93	148,75	36.000	156,63	5,30%	81,65	144,73	-2,70%	189,60	H
104	93	149,95	36.000	158,50	5,70%	82,25	140,86	-6,06%	150,73	H
105	94	151,17	36.000	154,19	2,00%	82,91	142,07	-6,02%	191,79	H
106	94	152,50	36.000	152,50	0,00%	82,97	142,48	-6,57%	161,00	H
107	94	153,73	36.000	155,27	1,00%	83,53	150,66	-2,00%	165,73	H
108	94	154,04	36.000	162,21	5,30%	84,05	148,98	-3,28%	183,25	H
109	95	155,21	36.000	158,16	1,90%	84,45	146,14	-5,84%	201,68	H
110	95	156,25	36.000	166,72	6,70%	84,66	156,18	-0,04%	157,74	H
111	96	156,36	36.000	168,56	7,80%	85,26	156,29	-0,04%	264,13	H
112	96	157,02	36.000	171,78	9,40%	86,08	154,93	-1,33%	288,17	H
113	96	157,63	36.000	173,08	9,80%	86,31	156,55	-0,69%	273,97	H
114	97	157,88	36.000	171,78	8,80%	87,03	156,78	-0,70%	188,14	H
115	97	158,17	36.000	161,65	2,20%	87,86	153,15	-3,17%	159,27	H
116	98	158,37	36.000	159,32	0,60%	87,91	152,33	-3,81%	178,23	H
117	98	158,42	36.000	161,75	2,10%	87,99	154,36	-2,56%	160,54	H
118	98	159,05	36.000	167,80	5,50%	88,64	153,05	-3,77%	226,52	H
119	98	159,95	36.000	161,38	0,90%	88,92	155,90	-2,53%	179,28	H
120	98	160,15	36.000	169,92	6,10%	89,16	150,06	-6,30%	256,61	H
121	99	161,03	36.000	164,90	2,40%	89,35	153,02	-4,97%	160,68	H
122	99	161,36	36.000	173,46	7,50%	90,01	160,36	-0,62%	266,19	H
123	104	161,55	36.000	166,07	2,80%	90,60	151,52	-6,21%	156,07	H
124	110	161,99	36.000	172,84	6,70%	91,36	159,96	-1,25%	289,52	H
125	122	162,15	36.000	177,71	9,60%	92,22	159,05	-1,91%	209,94	H
126	135	163,01	36.000	174,09	6,80%	92,40	160,94	-1,27%	315,44	H
127	142	163,94	36.000	175,41	7,00%	92,56	153,84	-6,16%	213,83	H
128	145	164,26	36.000	175,27	6,70%	93,30	154,22	-6,11%	185,07	H
129	145	164,26	36.000	170,84	4,00%	93,68	157,25	-4,27%	221,73	H
130	151	164,43	36.000	175,28	6,60%	93,95	164,37	-0,04%	262,99	H
131	155	165,30	36.000	168,11	1,70%	94,62	155,29	-6,06%	290,39	H
132	170	165,61	36.000	177,70	7,30%	95,43	156,53	-5,48%	183,15	H

133	172	166,72	36.000	172,06	3,20%	95,80	157,70	-5,41%	200,28	H
134	180	168,02	36.000	179,45	6,80%	95,87	162,94	-3,02%	184,13	H
135	182	169,60	36.000	182,49	7,60%	96,17	160,53	-5,35%	170,17	H
136	185	171,27	36.000	186,85	9,10%	96,58	162,24	-5,27%	295,27	H
137	192	172,77	36.000	178,65	3,40%	97,33	167,68	-2,95%	199,54	H
138	196	173,15	36.000	175,58	1,40%	97,73	171,06	-1,21%	336,99	H
139	204	173,26	36.000	178,80	3,20%	98,11	172,26	-0,58%	225,66	H
140	211	173,62	36.000	178,66	2,90%	98,95	168,62	-2,88%	188,86	H
141	220	174,58	36.000	177,19	1,50%	99,43	173,53	-0,60%	258,55	H
142	225	174,73	36.000	191,33	9,50%	99,63	166,68	-4,61%	285,03	H
143	232	175,80	36.000	189,34	7,70%	99,90	170,78	-2,86%	283,49	H
144	244	176,22	36.000	192,96	9,50%	100,87	173,22	-1,70%	187,08	H
145	250	177,54	36.000	191,57	7,90%	101,65	167,51	-5,65%	172,54	H
146	268	178,04	36.000	192,99	8,40%	101,91	170,03	-4,50%	272,05	H
147	304	179,23	36.000	186,04	3,80%	102,77	172,16	-3,94%	265,13	H
148	312	180,95	36.000	186,92	3,30%	103,76	174,89	-3,35%	272,83	H
149	315	182,18	36.000	197,12	8,20%	103,77	180,12	-1,13%	308,01	H
150	320	183,46	36.000	186,94	1,90%	104,15	178,37	-2,77%	180,15	H
151	334	184,69	36.000	197,80	7,10%	104,97	175,62	-4,91%	259,91	H
152	340	185,43	36.000	197,66	6,60%	105,47	177,41	-4,33%	223,53	H
153	365	186,65	36.000	198,41	6,30%	106,29	178,55	-4,34%	212,48	H
154	373	186,97	36.000	195,94	4,80%	106,54	182,96	-2,14%	294,56	H
		129,53	34.833,09	135,84	4,82%	71,75	124,59	-3,91%	178,30	

Tablo 4. 2021 Yılında çalışılacak projelerin aktivite sayıları ve aktiviteler arası mantıksal ilişkiler
(Number of activities and logical relationships between activities for projects planned in 2021)

Proje Aktivite Sayısı:Z	Proje Adedi	Aktiviteleri Arasında Bitir-Başla İlişkisi Olan Proje Sayısı	Aktiviteleri Arasında Başla-Başla İlişkisi Olan Proje Sayısı	Aktiviteleri Arasında Bitir-Bitir İlişkisi Olan Proje Sayısı
0<z<10	0	0	0	0
10<=z<20	0	0	0	0
20<=z<30	1	1	0	0
30<=z<40	2	2	0	0
40<=z<50	4	3	0	1
50<=z<60	6	5	0	1
60<=z<70	6	5	1	0
70<=z<80	8	8	0	0
80<=z<90	9	8	1	0
90<=z<100	10	8	1	1
z>=100	18	13	3	2
Toplam	64			

Önceki 3 yılda olduğu gibi, 2021 yılında üzerinde çalışılacak projelerin de çoğunlukla aktivite sayılarının fazla olduğu ve aktiviteler arasındaki ilişkinin bitir-başla prensibine dayandığı görülmüştür. Ayrıca 2018-2020 döneminde tamamlanan 154 projede olduğu gibi, 2021 yılında çalışılacak 64 proje için n_1 ve n_2 parametreleri olarak her projedeki aktivite sayısının dörtte biri ile yarısı arasındaki tüm değerler test edilmiş ve elde edilen en iyi sonuç dikkate alınmıştır. Kabul edilebilir süre sonunda çözüme ulaşılması dolayısıyla durma koşulu olan n_3 parametresi için 1.000 iterasyon referans alınmıştır. Sonuç olarak önceki 3 yıl üzerinde çalışılan projelerde olduğu gibi aynı yazılım platformu ve bilgisayar kullanılarak 2021 yılında çalışılacak 64 proje için CPLEX ve önerilen yöntemler ile bulunan çözümler Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5'te görüldüğü üzere aktivite sayısı 23 olan bir proje için CPLEX ile en iyi çözüm bulunmuş, diğer projeler için CPLEX ile 10 saat sonunda elde edilen en iyi tamsayı değeri referans kabul edilmiştir. CPLEX ile 74,58 sn.'de elde edilen bu çözüme, önerilen yöntemler sayesinde 24,66 sn.'de ulaşılmıştır. Ayrıca diğer 63 proje için önerilen yöntemlerle CPLEX'e kıyasla daha kısa sürede daha başarılı amaç fonksiyon değerine ulaşılmıştır. Ortalama 130,33 sn.'de, 64 proje için CPLEX'in ortalama 35.438 sn.'de bulunduğu çözümden ortalama %5,01 oranında daha başarılı sonuç elde edilmiştir. Projelerin henüz çalışılmamış olması nedeniyle önerilen yöntemler sonucunda ortaya çıkabilecek olası gecikmeler değerlendirilememiştir. Öte yandan projeleri talep eden müşteri ve gerekli çalışmalarını yürütecek teknik ekip yöneticileri tarafından, önerilen planlama bilgileri gerçekçi ve başarılı bulunmuştur.

Tablo 5. 2021 Yılında çalışılacak projeler için çözümler (Results for projects planned in 2021)

Proje	Toplam Aktivite Sayısı	CPLEX (Amaç Fonksiyon Değeri)	CPLEX Süre (sn)	LP-Gevşetme (Amaç Fonksiyon Değeri)	LP-Gevşetme Yönteminin CPLEX'e Uzaklığı	LP Gevşetme Süre (sn)	Meta Sezgisel Amaç Fonksiyon Değeri	Meta Sezgisel Yöntemin CPLEX'e Uzaklığı	Hibrit Meta Sezgisel Süre (sn)
1	23	15,14	74,58	15,28	0,92%	2,60	15,14	0,00%	24,66
2	35	20,50	36.000	21,34	4,09%	10,35	20,34	-0,79%	30,36
3	38	25,61	36.000	27,99	9,29%	13,79	25,02	-2,32%	33,80
4	42	27,86	36.000	28,33	1,67%	20,51	27,61	-0,91%	41,55
5	45	44,81	36.000	45,65	1,88%	22,62	43,91	-2,02%	50,29
6	46	62,10	36.000	67,33	8,42%	24,74	60,55	-2,50%	55,20
7	46	68,78	36.000	70,69	2,78%	27,40	58,61	-14,78%	54,47
8	50	66,52	36.000	70,44	5,89%	39,19	63,38	-4,72%	64,06
9	50	69,32	36.000	72,85	5,09%	41,78	65,42	-5,63%	76,40
10	52	69,78	36.000	72,55	3,97%	45,59	59,61	-14,57%	74,35
11	53	71,87	36.000	78,30	8,94%	48,80	66,89	-6,93%	94,23
12	57	78,38	36.000	81,14	3,52%	50,67	70,54	-10,00%	87,85
13	59	76,90	36.000	78,75	2,41%	51,13	76,47	-0,57%	85,77
14	61	78,32	36.000	82,37	5,17%	51,18	70,41	-10,10%	98,51
15	62	78,63	36.000	86,07	9,46%	51,45	72,28	-8,08%	90,31
16	64	80,19	36.000	87,16	8,69%	51,51	71,59	-10,73%	103,27
17	65	83,24	36.000	86,40	3,80%	51,97	81,51	-2,08%	114,39
18	68	83,50	36.000	87,04	4,25%	52,32	79,31	-5,02%	126,73
19	69	83,57	36.000	86,82	3,89%	52,58	76,35	-8,64%	120,12
20	70	85,22	36.000	90,57	6,28%	52,92	79,66	-6,52%	137,58
21	71	90,91	36.000	93,11	2,42%	52,94	80,45	-11,51%	129,14
22	72	92,48	36.000	95,10	2,84%	53,38	82,25	-11,06%	150,57
23	72	101,50	36.000	106,12	4,55%	53,83	100,16	-1,32%	117,21
24	74	102,83	36.000	102,96	0,13%	54,41	100,07	-2,68%	125,58
25	74	103,32	36.000	108,25	4,78%	54,41	94,45	-8,58%	124,71
26	76	103,64	36.000	109,43	5,58%	54,67	98,53	-4,93%	138,46
27	77	103,66	36.000	111,29	7,36%	55,01	97,42	-6,02%	115,67
28	80	104,08	36.000	108,56	4,31%	55,18	98,77	-5,10%	136,70
29	81	105,52	36.000	114,58	8,59%	55,29	97,53	-7,57%	118,09
30	81	105,77	36.000	113,41	7,22%	55,60	103,77	-1,89%	137,58
31	82	105,79	36.000	112,53	6,38%	55,60	105,42	-0,35%	132,74
32	82	106,88	36.000	111,16	4,01%	55,59	104,98	-1,78%	157,17
33	84	106,28	36.000	108,31	1,91%	56,12	101,29	-4,70%	117,04
34	85	108,29	36.000	114,92	6,13%	56,31	104,27	-3,71%	113,11
35	85	108,57	36.000	113,85	4,87%	56,92	107,81	-0,70%	158,52
36	85	108,41	36.000	110,28	1,72%	57,28	106,04	-2,19%	200,97
37	92	108,69	36.000	116,99	7,64%	57,46	106,64	-1,88%	162,57
38	92	110,50	36.000	115,94	4,92%	57,92	102,45	-7,29%	121,56
39	93	110,68	36.000	113,37	2,43%	58,03	107,49	-2,89%	149,39
40	94	110,99	36.000	115,09	3,70%	58,23	110,94	-0,04%	195,79
41	95	112,18	36.000	113,03	0,76%	58,42	105,36	-6,08%	113,81
42	95	112,63	36.000	115,57	2,61%	58,78	109,74	-2,56%	125,67
43	96	112,59	36.000	114,77	1,93%	58,91	111,57	-0,91%	205,97
44	97	113,03	36.000	121,97	7,91%	58,90	108,80	-3,74%	179,49
45	98	113,93	36.000	116,66	2,40%	59,21	109,08	-4,26%	166,00
46	98	114,44	36.000	118,29	3,36%	59,68	113,44	-0,88%	220,60
47	106	114,28	36.000	118,11	3,35%	59,83	105,49	-7,70%	186,23
48	111	114,13	36.000	115,42	1,13%	60,37	104,08	-8,81%	155,46
49	124	115,23	36.000	123,34	7,05%	60,55	107,72	-6,51%	110,12
50	135	116,25	36.000	118,82	2,22%	61,13	114,54	-1,47%	156,03
51	138	116,13	36.000	123,88	6,68%	61,53	111,00	-4,41%	199,68
52	140	117,29	36.000	118,58	1,10%	62,06	112,09	-4,43%	192,10
53	144	118,28	36.000	126,51	6,96%	62,52	113,95	-3,66%	164,04
54	152	119,27	36.000	123,65	3,67%	62,72	109,71	-8,02%	213,57
55	168	119,48	36.000	121,06	1,32%	62,79	117,30	-1,82%	186,00
56	180	119,43	36.000	129,50	8,43%	63,38	115,33	-3,43%	182,01
57	182	120,87	36.000	132,63	9,73%	63,82	114,16	-5,55%	129,40
58	189	121,17	36.000	126,16	4,12%	64,20	117,74	-2,83%	164,27
59	198	121,88	36.000	124,52	2,16%	64,29	112,88	-7,38%	126,01
60	214	121,89	36.000	129,08	5,90%	64,77	111,77	-8,30%	129,95
61	226	122,61	36.000	125,76	2,57%	65,01	122,47	-0,12%	155,51
62	230	122,83	36.000	131,44	7,01%	65,56	115,71	-5,80%	223,38
63	245	123,84	36.000	125,46	1,31%	66,14	114,12	-7,84%	174,66
64	251	123,76	36.000	134,00	8,27%	133,15	114,14	-7,77%	114,87
		96,82	35.438,67	101,26	4,59%	53,67	91,98	-5,01%	130,33

5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR (CONCLUSION AND FUTURE STUDIES)

Bu çalışmada, aktiviteleri arasındaki mantıksal ilişki dikkate alınacak şekilde proje çizelgeleme için yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Aktivite sayısı arttıkça en iyi çözümü bulunamayan problemin çözümü için Tabu Arama ve Genetik Algoritma yöntemlerini esas alan hibrit bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen yöntemlerin uygulanabilirliğini test etmek ve sonuçların kalitesini incelemek amacıyla, bir teknoloji şirketinde 2018-2020 döneminde tamamlanan 154 gerçek proje çizelgelenmiştir. CPLEX'e kıyasla çok daha kısa sürede daha başarılı sonuçların elde edildiği görülmüş, ayrıca tamamlanmış projelerin takvim durumu ile karşılaştırıldığında projelerin gecikme oranının çok düşük olduğu görülmüştür. İkinci aşamada önerilen yöntemler, aynı teknoloji şirketinde 2021 yılında yürütülecek 64 projenin çizelgelenmesi amacıyla uygulanmıştır. Önerilen yöntemler sonucunda elde edilen değerlerin çözüm süresi ve amaç fonksiyon değeri açısından CPLEX'e kıyasla yine çok başarılı olduğu kanıtlanmış, ayrıca proje çizelgeleri uzmanlar tarafından gerçekçi ve etkin bulunmuştur.

Gelecekte, bu çalışmada tespit edilen proje çizelgeleri kullanılarak gecikmenin minimize edilmesini amaçlayan modeller oluşturulabilir. Ayrıca aktivite sürelerinin bulanık olduğu durumların çözüme etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. PMI, A Guide to the Project Management Body of Knowledge. (PMBOK® Guide), Newtown Square, Pennsylvania, U.S.A., 2007.
2. Wateridge J., How can IS/IT projects be measured for success?, *International Journal of project Management*, 16 (1), 59- 63, 1998.
3. Atkinson R., Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria, *International Journal of Project Management*, 17, 337-342, 1999.
4. Blaskovics B., The impact of project manager on project success-The case of ICT sector, *Society and Economy*, 38 (2), 261-281, 2016.
5. Knoepfel H., Cost and quality control in the project cycle, *International Journal of Project Management*, 7 (4), 229-235, 1989.
6. Aaron L., *The Engineer's Cost Handbook: Tools for Managing Project Costs.* Marcel Decker Pub., New York, U.S.A, 1997.
7. Arkes H., Overconfidence in judgmental forecasting, In: Armstrong J.S. (eds) *Principles of Forecasting*, *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, U.S.A, 30, 2001.
8. Lin S.W., Bier V.M., A study of expert overconfidence, *Reliability Engineering & System Safety*, 93, 711-721, 2008.
9. Kerzner H., *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*, John Wiley & Sons, 12, Canada, 2017.
10. Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W., Application of a technique for a research and development program evaluation, In: *Operations Research*, 7, 646-669, 1959.
11. Badruzzaman F.H., Fajar M.Y., Rohaeni, O., Gunawan G., Harahap, E., CPM and PERT technique efficiency model for child veil production, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9 (4), 2020.
12. Azaron A., Perkgoz C., Sakawa M., A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks, *Applied Mathematics and Computation*, 168, 1317-1339, 2005.
13. Hendradewai A.P., Schedule risk analysis by different phases of construction project using CPM-PERT and Monte-Carlo simulation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 528, 11th International Seminar on Industrial Engineering & Management, Technology and Innovation Challenges Towards Industry 4.0 Era, Makasar, South Sulawesi, Indonesia, 2018.
14. Kholil M., Alfa B.N., Hariadi M., Scheduling of house development projects with CPM and PERT method for time efficiency (Case Study: House Type 36), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability, Langkawi, Malaysia, 2017.
15. Kotiah T.C.T., Wallace N.D., Another look at the PERT assumptions, In: *Management Science*, 20 (3-4), 44-49, 1973.
16. Johnson D., The triangular distribution as a proxy for the beta distribution in risk analysis, In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 46, 387-398, 1997.
17. Mohan S., Gopalakrishnan M., Balasubramanian H., Chandrashekar A., A lognormal approximation of activity duration in PERT using two time estimates, *Journal of the Operational Research Society*, 58, 827-831. 2007.
18. Hahn E.D., Mixture densities for project management activity times: A robust approach to PERT, *European Journal of Operational Research*, 188, 450-459, 2008.
19. Trietsch D., Mazmany L., Gevorgyan L., Baker K.R., Modeling activity times by the Parkinson distribution with a lognormal core: Theory and validation, *European Journal of Operations Research*, 216 (2), 386-396, 2012.
20. Williams T., The contribution of mathematical modelling to the practice of project management, *Journal of Management Mathematics*, 4 (1), 3-30, 2003.
21. Dantzig G., Fulkerson R., Johnson S., Solution of a large-scale travelling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, 2, 393-410, 1954.
22. Gomory R., An algorithm for integer solutions to linear programs, In: *Recent Advances in Mathematical*

- Programming, 269-302, Eds. Graves, R.L., Wolfe, P., McGraw-Hill, New York, U.S.A., 1963.
23. Bellman R.E., *Dynamic Programming*, Princeton University Press, New Jersey, U.S.A., 1957.
 24. Geoffrion A.M., Lagrangian relaxation and its uses in integer programming, *Mathematical Programming Study*, 2, 82-114, 1974.
 25. Glover F., Heuristics for integer programming using surrogate constraints, *Decision Sciences*, 8, 156-166., 1977.
 26. Arıkan M., A tabu search algorithm for the simple assembly line balancing problem of type-2 with workload balancing objective, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1169 – 1180, 2017.
 27. Başar A., Kabak Ö., Topçu Y.İ., A tabu search algorithm for a multi-period bank branch location problem: A case study in a Turkish bank, *Scientica Iranica*, 26 (6), 3728-3746, 2019.
 28. Holland J., *Adaption in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Michigan, U.S.A., 1975.
 29. Goldberg D.E., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, U.S.A., 1989.
 30. Uçaner M.E., Özdemir O.N., Optimization of booster chlorination in water distribution networks with genetic algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 17 (4), 1169 – 1180, 2002.
 31. Hosseinabadi A.A.R., Vahidi J., Saemi B. et al, Extended Genetic Algorithm for solving open-shop scheduling problem, *Soft Computing*, 23, 5099–5116, 2019.
 32. Cerny V., A thermo dynamical approach to the travelling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45, 41–51, 1985
 33. Şahin R., A simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (4), 863 – 870, 2008.
 34. Abdel-Basset M., Ding W., El-Shahat D., A hybrid Harris Hawks optimization algorithm with simulated annealing for feature selection. *Artificial Intelligence Review*, 54, 593–637, 2021.
 35. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A., *The ant system: An autocatalytic optimizing process*. Technical Report, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
 36. Keskinürk T., Söyler H., Global Ant Colony Optimization, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (4), 689 – 698, 2006.
 37. Deng W., Xu J., Song Y., Zhao H., An effective improved co-evolution ant colony optimisation algorithm with multi-strategies and its application, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 16 (3), 158–170, 2020.
 38. Kennedy J., Eberhart R.C., *Particle swarm optimization*. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 4, Perth, Australia, 1942–1948, 1995.
 39. Turan Ö., Oruç R., Baklacioğlu T., Optimization of an afterburning turbofan engine with multi objective particle swarm method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35 (4), 1997 – 2012, 2020.
 40. Lei H., Lei T., Yuenian T., Sports image detection based on particle swarm optimization algorithm, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103345>, 2021.
 41. Talbot F.B., Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: the nonpreemptive case, *Management Science*, 28 (10), 1197-1210, 1982.
 42. Patterson J.H., A comparison of exact approaches for solving the multiple constrained resource, project scheduling problem, *Management Science*, 30 (7), 854-867, 1984.
 43. Brucker P., Drexl A., Möhring R., Neumann, K., Pesch E., Resources-constrained project scheduling: notation, classification, model and methods. *European Journal of Operational Research*, 112, 3-41, 1999.
 44. Rahman H.F., Chakraborty R.K., Ryan M.J., Memetic algorithm for solving resource constrained project scheduling problems. *Automation in Construction*, 111, 103052, 2020.
 45. Baar T., Brucker P., Knust S., *Tabu-search algorithms for the resource constrained project scheduling problem*, Technical Report, Osnabrück, 1997.
 46. Pan N.H., Hsaio P.W., Chen K.Y., A study of project scheduling optimization using Tabu Search algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 (7), 1101- 1112, 2008.
 47. Leu S.S., Chen A.T., Yang C.H., A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off, *International Journal of Project Management*, 19, 47–58, 2001.
 48. Demirel N., Gokcen H., Akcayol M.A., Demirel E., A hybrid genetic algorithm for multistage integrated logistics network optimization problem, *Journal of the Faculty Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (4), 929-936, 2011.
 49. Kumar N.S., Kumar R.R., Study on application of genetic algorithm in construction resource levelling, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2), 78-83, 2014.
 50. Hussain W., Trivedi M.K., Kansal R., Optimization of construction resource allocation and levelling using genetic algorithm, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4 (6), 2015.
 51. Calp M.H., Akcayol M.A., Optimization of project scheduling activities in dynamic CPM and PERT networks using genetic algorithms, Süleyman Demirel University, *Journal of Natural and Applied Sciences*, 22 (2), 615-627, 2018.
 52. Hartmann S., Briskorn D., An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>

53. Zwikael O., Chih Y., Meredith J.R., Project benefit management: setting effective target benefits, *International Journal of Project Management*, 36 (4), 650 – 658, 2018.
54. Başar A., A novel methodology for time planning of resource-constrained software projects with hesitant fuzzy durations: A case study. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 26 (4), 471-485, 2019.
55. Silberholz J., Golden B., Comparison of Metaheuristics. In: Gendreau M., Potvin JY. (eds) *Handbook of Metaheuristics*. International Series in Operations Research & Management Science, 146. Springer, Boston, U.S.A, 2010.