

**PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME
SÜREÇLERİNDE MATEMATİKSEL MODELLEME
TABANLI DİJİTAL İKİZ YAKLAŞIMI**

**DIGITAL TWIN APPROACH BASED ON
MATHEMATICAL MODELLING IN PROJECT
PLANNING AND PLAN REVISION PROCESSES**

SEVGİ ÖZLEM KAYA

PROF. DR. MURAT CANER TESTİK

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. CEREN TUNCER ŞAKAR

Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2023

i

ÖZET

PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME SÜREÇLERİNDE MATEMATİKSEL MODELLEME TABANLI DİJİTAL İKİZ YAKLAŞIMI

Sevgi Özlem KAYA

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Caner TESTİK

Eş Danışman: Doç. Dr. Ceren Tuncer ŞAKAR

Şubat 2023, 47 sayfa

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel bir sistemin dijital bir kopyasını oluşturmaya ve bu kopyayı gerçek zamanlı olarak izlemeye ve analiz etmeye olanak tanıyarak üretim, tasarım, işletme ve bakım süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Örneğin, bir fabrikanın dijital ikizi kullanılarak, üretim süreci optimize edilebilmekte, arızalar önceden tespit edilmekte ve bakım ihtiyacı belirlenebilmektedir. Ayrıca, bir bina ya da ulaşım araçlarının dijital ikizi oluşturularak, enerji tüketimi azaltılabildiği gibi güvenlik konuları da iyileştirilebilmektedir. Bir sistemin dijital ikizinin oluşturulabilmesi için öncelikle sistem hakkında detaylı veri toplanması gerekmektedir. Bu veriler, sensörler, kameralar, tarama cihazları veya diğer teknolojiler kullanılarak elde edilebilmekte ve sistemin fiziksel özelliklerini, performansını, çalışma şartlarını ve diğer bilgileri içermektedir. Ardından, bu veriler kullanılarak, ürünün dijital bir kopyası oluşturulmaktadır. Bu dijital kopya, 3D model, bir yazılım uygulaması veya bir sanal gerçeklik ortamı gibi farklı şekillerde oluşturularak sistemin fiziksel özelliklerini, performansını ve diğer bilgileri içerecek şekilde tasarlanmaktadır. Son olarak, dijital

kopya gerçek zamanlı olarak izlenerek durumu analiz edilmektedir. Bu işlem, sistemin performansını ve çalışma şartlarını izlemek, arızaları tespit etmek ve bakım ihtiyacını belirlemek için kullanılarak sistemin geliştirilmesine ve optimize edilmesine yönelik kararlar alınmasına yardımcı olmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, proje süreçlerinin daha hızlı ve verimli hale gelmesi bir gereklilik olmuştur. Gantt Şeması, Kritik Yol Yöntemi gibi geleneksel proje planlama yöntemleri, günümüzdeki hızlı proje süreçlerine ve değişimlere uymakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında proje planlama ve planın güncelliğinin korunması konularında dijital ikiz teknolojisinden yararlanılarak proje sürecinde olası değişikliklere daha hızlı ve esnek bir şekilde uyum sağlayan bir model tasarlanması hedeflenmektedir. Özellikle literatürde dijital ikiz ile ilgili yapılan çalışmaların genellikle fiziksel ürünler ya da yapılarla ilgili olması, proje planlama süreçleriyle ilgili benzer bir çalışmanın bulunmayışı tez çalışmasında motivasyonu sağlamıştır.

Bu tez kapsamında proje planlama ve plan güncelleme süreçlerinde matematiksel modelleme tabanlı dijital ikiz yaklaşımı ile ilgili kavramsal model oluşturularak proje süreçlerinde verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, proje planlama süreçlerinde veri analizi ve ileri analitik tekniklerin kullanımını da içererek proje yöneticilerine daha etkili karar verme imkânı sunmaktadır. Bu doğrultuda proje planlama ve güncelleme süreçlerinin otomatizasyonunu sağlamayı amaçlayan kavramsal model oluşturularak ilgili kavramsal model çerçevesinde bir çözüm seçilmiş, seçilen çözüm 15 iş adımından oluşan bir proje sistemine uygulanmıştır.

Önerilen kavramsal model İş Süreçleri Akış Diyagramı kullanılarak gösterilmiştir ve dijital ikiz teknolojisindeki en önemli adımlardan biri olan verilerin hazırlaması adımının modellenmesiyle başlamaktadır. Personel, personel yetkinlikleri, personel performansları, iş adımı isim listesi, iş adımı birim sayıları, iş adımı süreleri ve iş adımı yetkinlikleri verilerini kullanan model gerçek zamanlı veri akışı ile ileri ve geri yönlü çalışarak kullanıcıya bilgiler sunmaktadır. Bu amaçla, bir veri analizi yöntemi ya da bir matematiksel model kullanılarak projenin planlanmasına ve güncelliğinin korunmasına yönelik gerçek zamanlı veri akışına imkân tanınmıştır.

Tasarlanan kavramsal modelin bir kısmı kullanılarak bir proje için uygulama yapılmıştır. Uygulama kapsamında; projedeki iş paketlerinin planlanması, her bir işe personel havuzundan uygun yetkinlik ve performansta personelin atanması, proje tamamlanma zamanının belirlenmesi, projenin ilerleyen aşamalarında meydana gelebilecek bir değişim sonucunda proje planının güncellenmesi, projenin beklenen tamamlanma zamanı verildiğinde personel performanslarının belirlenmesi ve ilgili personel atamalarının gerçekleştirilmesi, gerekiyorsa yeni personel alımının önerilmesi faaliyetleri bir matematiksel model ile modellenmiştir. Kullanılan metodoloji ile çalışmanın verimli ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, proje planlama ve plan güncelleme süreçlerinde matematiksel model tabanlı dijital ikiz yaklaşımı için önemli fırsatlar sunmakta ve gelecekte yapılacak çalışmalar için yol göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Proje Planlama, Plan Güncelleme, Dijital İkiz, Matematiksel Modelleme, Süreç Yönetimi, Proje Yönetimi

ABSTRACT

DIGITAL TWIN APPROACH BASED ON MATHEMATICAL MODELLING IN PROJECT PLANNING AND PLAN REVISION PROCESSES

Sevgi Özlem KAYA

Master of Science, Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat Caner TESTİK

Co-Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Ceren Tuncer ŞAKAR

February 2023, 47 pages

Digital twin technology provides significant advantages in production, design, operation and maintenance processes by allowing creation of a digital copy of a physical system, and monitoring and analyzing this copy in real time. For example, by using the digital twin of a factory, a production process can be optimized, faults can be detected in advance, and the need for maintenance can be determined. In addition, by creating a digital twin of a building or transportation vehicles, energy consumption can be reduced as well as security issues can be improved. In order to create a digital twin of a product, it is necessary to collect detailed data about the product first. This data is obtained using sensors, cameras, scanning devices or other technologies and includes the physical characteristics of the system, its performance, operating conditions and other information. Then, using this data, a digital copy of the system is created. This digital copy is created in different ways, such as a 3D model, a software application, or a virtual reality environment, and is designed to include the physical properties, performance, and other information of the product. Finally, the digital copy is monitored in real time and its status is analyzed. This process can be used to monitor system performance and operating

conditions, detect malfunctions, and identify maintenance needs, helping to make decisions about product development and optimization.

With the development of technology, it has become a necessity for project processes to become faster and more efficient. Traditional project planning methods such as the Gantt Chart and the Critical Path Method are insufficient to adapt to today's rapid project processes and changes. Therefore, within the scope of this thesis, it is aimed to design a model that can adapt to possible changes in the project process in a faster and more flexible way by using the digital twin technology in project planning and keeping the plan up-to-date. In particular, the fact that the studies on digital twins in the literature are generally related to physical products or structures, and the absence of a similar study on project planning processes provided motivation in the thesis study.

Within the scope of this thesis, it is aimed to increase efficiency and reduce costs in project processes by creating a conceptual model with a mathematical modeling-based digital twin approach in project planning and plan-update processes. This approach includes the use of data analyses and advanced analytical techniques in the project planning processes, giving project managers the opportunity to make more effective decisions. In this direction, a conceptual model aimed at automating the project planning and updating processes was created and a solution was selected within the framework of the relevant conceptual model, and the selected solution was applied to a project system consisting of 15 work packages.

The proposed conceptual model is shown by the Business Process Flow Diagram and it starts with the modeling of the data preparation step, which is one of the most important steps in the digital twin technology. The model, which utilize; preparation of personnel, personnel competencies, personnel performances, job step name list, job step unit numbers, job step durations and job step competencies data, provides information to the user by working forward and backward with real-time data flow. For this purpose, the model allows real-time data flow for the planning of the project and keeps it up-to-date by using a data analyses method or a mathematical model.

An implementation is done for a project by using a part of the designed conceptual model. Within the scope of the application, by using a mathematical model; work packages in the project are planned, for each job personnel from a personnel pool are assigned with appropriate competences and performances, project completion time is determined, project plan is updated as a result of a change that may occur in the later stages of the project, performance of the personnel is determined when the expected completion time of the project is given and relevant personnel assignments are made, if necessary. Using the methodology, it has been seen that the study gives efficient and accurate results. The results obtained provide important opportunities for mathematical model-based digital twin approach in project planning and plan-update processes and guide for future studies.

Keywords: Project Planning, Plan Revision, Digital Twin, Mathematical Modeling, Process Management, Project Management

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, desteğini benden esirgemeyerek her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat Caner TESTİK'e,

Çalışmamın uygulama sürecinde yardım ve yönlendirmeleriyle tezimin başarıyla sonuçlanabilmesine destek veren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ceren TUNCER ŞAKAR'a

Lisans ve Lisansüstü eğitim sürecimde emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü hocalarıma,

Bütün eğitim hayatım boyunca, desteklerini esirgemeyerek bana inanan ve her zaman yanımda olduklarını hissettiren, bugünlere gelmemde büyük katkıları olan canım annem Emine BULU ve sevgili babam Gökhan BULU'ya,

Önceliklerini her zaman benim önceliklerime göre düzenleyen, desteğini ve sabrını benden esirgemeyerek her zaman yanımda olan, hayatımda önemli bir yere sahip canım eşim Furkan KAYA'ya,

Bu süreçte her an yanımda olan ve sabırlı bir şekilde onunla oynamamı bekleyen, stresli anlarımda moralimi yerine getiren kedim Tarçın'a,

Sonsuz Teşekkürler...

Sevgi Özlem KAYA

Şubat 2023, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER.....	x
ÇİZELGELER	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Motivasyon.....	2
1.3. Tezin Literatüre Katkıları.....	3
1.4. Tezin Organizasyonu	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. Proje Planlama	5
2.2. Kaynak Atama.....	7
2.3. Dijital İkiz	10
3. PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME İÇİN DİJİTAL İKİZ KAVRAMSAL MODELİ.....	15
4. BİR PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME PROBLEMİ İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER VE BİLGİSAYAR UYGULAMASI.....	21
4.1. Senaryo 1.....	25
4.2. Senaryo 2.....	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	48

ŞEKİLLER

Şekil 3.1. Verilerin Hazırlanması.....	15
Şekil 3.2. Proje Planlama ve Plan Güncelleme için Kavramsal Model	17
Şekil 4.1. İş Paketleri Nod Diyagramı.....	22
Şekil 4.2. Senaryo 1 Kullanıcı Giriş Ekranı	32
Şekil 4.3. Senaryo 1 Kullanıcı Sonuç Ekranı	33
Şekil 4.4. Senaryo 1 Kullanıcı Ekranı Gantt Şeması.....	33
Şekil 4.5. Senaryo 2 Kullanıcı Bilgi Ekranı	39
Şekil 4.6. Senaryo 2 Kullanıcı Veri Girişi	41
Şekil 4.7. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Personel Ataması	42
Şekil 4.8. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Gantt Şeması.....	42
Şekil 4.9. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Süre Güncelleme	43
Şekil 4.10. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Güncel Personel Ataması	44
Şekil 4.11. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Güncel Gantt Şeması	45

ÇİZELGELER

Çizelge 4.1. İş Adımları, Her İş Paketinin Süresi ve Bitişik Öncülü.....	23
Çizelge 4.2. Departman Kodları	26
Çizelge 4.3. İş Paketleri, Süreleri, Yetkin Departmanı ve Öncüllük İlişkisi	26
Çizelge 4.4. Departmanlar ve Yetkin Personelleri	27
Çizelge 4.5. Personeller, Performansları ve Durumları	35

1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

18. Yüzyılın ikinci yarısında insanların artan ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilmek için birinci sanayi devrimi gerçekleşmiştir. Birinci sanayi devrimi ile enerji kaynağı olarak maden kömürü ve buhar gücü kullanılmaya başlanmış, buhar gücüyle çalışan makinelerin geliştirilmesiyle küçük atölyelerde yapılan üretimden fabrika üretim sistemlerine geçilmiştir. Buhar gücünün kullanımı demiryolu taşımacılığının ortaya çıkmasına imkân sağlamış, bu sayede fabrikalarda üretilen endüstriyel ürünlerin farklı bölgelere taşınması da mümkün kılınmıştır. Enerji kaynağı olarak elektrik enerjisinin buhar gücünün yerini aldığı dönem ikinci sanayi devrimi olarak adlandırılır. Bu dönemde, elektrik enerjisini kullanan montaj hatlarının geliştirilmesiyle seri üretim sistemleri fabrikalarda kullanılmaya başlamıştır. Yarı iletken ve programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) teknolojilerindeki gelişmelerin etkisiyle üretimde otomasyonun sağlandığı dönem üçüncü sanayi devrimi olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde, bir sonraki dönem olarak dördüncü sanayi devrimi yaşanmaktadır ve bu dönemde internetin de ortaya çıkmasıyla akıllı ve bağlantılı makineler üretim süreçlerinde görev almaktadır. Sanayinin dijitalleşmesi olarak da adlandırılan dördüncü sanayi devrimi ile fabrika içerisindeki bütün süreçlerin birbirine internet üzerinden bağlı olarak sürekli iletişim halinde olduğu, süreçlerden toplanan verilerle analizlerin yapıldığı, sistemlerin kendi kendilerini yönetebildiği bir yapı ortaya çıkmaktadır. [1]

Dördüncü sanayi devrimi ile ortaya çıkan gelişmeler olarak; siber fiziksel sistemler, yatay ve dikey entegrasyon, nesnelerin interneti (IoT), öğrenen robotlar, büyük veri ve veri analitiği, bulut bilişim, artırılmış gerçeklik, siber güvenlik, katmanlı üretim (3D Yazıcılar) teknolojiler öne çıkmaktadır. Bu tez kapsamında siber fiziksel sistemler üzerinde durulacaktır.

Siber fiziksel sistemler ile gerçek dünyadaki nesnelerin ve davranışlarının bilgisayar ortamında simülasyonunun oluşturulması ve ihtiyaca göre gerçek zamanlı olarak sistemin incelenebilmesi, geçmiş ya da gelecek dönemli analizlerin yapılabilmesi gibi konular ortaya çıkmış ve buna bağlı olarak “dijital ikiz” kavramı kullanılmaya başlanmıştır [2]. Dijital ikiz teknolojisinin kullanım alanları incelendiğinde; bir fabrika kurulmadan önce

simülasyon ile fizibilite çalışmalarının yapılabilmesi, seyir halinde olan bir geminin motorundan sensörler yardımıyla alınan veriler ile motorda oluşabilecek arızaların önceden tespiti, insandan sensörler ile toplanan kalp atış hızı, vücut sıcaklığı gibi verilerle oluşabilecek hastalıklara karşı önceden uyarı yapılması gibi farklı alanlarda çalışmalar örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte üretim alanlarının modellenmesi ile uygulanan dijital ikiz çalışmaları da karar destek sistemlerinin iyileştirilmesi, sürecin optimize edilmesi ve öngörülebilir bakım faaliyetlerinin uygulanması açısından önemli çalışmalardır [3].

Sanayinin bu denli hızlı gelişiminin bir sonucu olarak işletmelerde meydana gelen büyüme faaliyetlerde koordinasyon zayıflıklarına neden olmuş, zaman ve kaynak kullanımının sınırlı olmasıyla da sistematik bir düzen ihtiyacı doğurmuştur. “Proje yönetimi” kavramı ile üretim süreçlerindeki koordinasyonun sağlanması; zaman, maliyet ve kalite kısıtlarının doğru şekilde kullanılması amaçlanmaktadır. Proje yönetiminde çok önemli olan ve demir üçgen ile ifade edilen bu üç kısıt projelerin başarısını etkilemekte ve işletmelerin geleceğinde rol almaktadır [4].

Bir projenin yönetiminde, meydana gelebilecek olası durumların önceden tahmini ya da beklenmedik durumlarda en az zarar ile sonuca ulaşılması için alınabilecek alternatif tedbirlerin sunulması büyük bir öneme sahiptir [5]. Bu tez kapsamında, proje planlama ve plan güncelleme faaliyetlerinde dijital ikizlerin uygulanabilirliği araştırılarak, zaman gereksinimlerini ve personel yetkinliklerini kullanan, maliyet etkin proaktif bir yaklaşımla karar desteği sağlayan bir dijital ikiz sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Motivasyon

Dijital ikizin bir tanımı “Yaşam döngüsü boyunca fiziksel bir nesneyi veya süreci yansıtan sanal bir model”dir [6]. Literatürde, bu konuda yapılan çalışmaların genellikle fiziksel nesnelere ele aldığı, süreç bazında dijital ikiz teknolojisinin uygulamalarının kısıtlı kaldığı görülmektedir. Dijital ikiz ile ilgili yapılan örnek çalışmalar incelendiğinde, IoT'nin giderek yaygınlaşması ve kullanım kolaylığı sonucunda dijital ikiz çalışmalarının yakın zamanda hızla önem kazandığı ve makinelerde küçük endüstriyel parçaların bile dijital ikizlerinin oluşturulmaya başlanmasıyla farklı senaryoları test ve tahmin etmek,

geriye dönük hesaplamalar yapmak, makine tasarımcıları ve bakım görevlilerine işlerinde kolaylık sağlamak gibi amaçlarla modellerin kullanıldığı görülmektedir [7].

Diğer yandan proje yönetim faaliyetleri değerlendirildiğinde projenin en başında yapılan ve uzun zaman alan proje planlarının proje başladığında bir öneminin kalmadığı, gerçek zamanlı olarak projede çalışan personel değişimlerinin projeyi zaman ve maliyet açısından olumsuz etkilediği, çalışan personelin görevlere etkili şekilde atanamadığı, proje başladıktan sonra proje takibinin zorlaştığı, projenin beklenen maliyete göre yönetilemediği, planın istenen sonuca göre entegrasyonunun zor olduğu gibi sonuçlar ortaya çıkmaktadır [8].

Bu tez kapsamında, proje yönetiminde sık karşılaşılan proje planlama ve plan güncelleme problemlerine sistematik bir çözüm sunulması hedeflenmektedir. Proje yönetim süreçlerinde, planlardan ve fiziksel sistemden elde edilen verinin dijital ikize aktarılması ile gerçek dünyada meydana gelebilecek takvimsel ve kaynak değişikliklerinin etkilerinin öngörülebilmesi, proje kısıtları göz önünde bulundurularak da alternatif çözüm önerilerinin getirebilmesi amaçlanmıştır.

Literatürde, proje yönetim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde bunların teorik olarak iyi sonuçlar verebilecek olmasına rağmen gerçek hayat uygulamalarında çözümlerin basit kalabileceği veya uyarlanamayabileceği görülmektedir [9]. Bu çalışmada, gerçek dünyayı daha iyi temsil edecek bir matematiksel modelleme yaklaşımı ile proje planına ilişkin karar değişkenlerinin değerlendirilmesi, potansiyel risklerin önceden görülmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda; iş kısıtlılarının, personel yetkinlik ve performans gereksinimlerinin ve iş önceliklerinin modellenmesi ile proje zaman ve maliyetinin minimizasyonu için çözüm önerileri getirilmektedir.

1.3. Tezin Literatüre Katkıları

Literatür incelendiğinde dijital ikizin daha çok konsept seviyesinde kaldığı, uygulama aşamasında çok fazla örneğe rastlanmadığı görülmektedir. Bunun nedenlerinden birisi dijital ikizin uygulanmasındaki en önemli girdilerden birisi olan düzenli ve kesintisiz veriye erişimin zor olmasıdır. Literatür araştırmasında bir diğer dikkat çeken nokta yapılan çalışmaların büyük bölümünün üretimin yapıldığı alanlar olmasıdır [2]. Bunun

nedenlerinden biri olarak dijital ikiz uygulamalarının temel taşı olan verilerin genel olarak üretimden daha kolay elde edilmesi gösterilmektedir.

Tezin konusu olan proje yönetim süreçlerinde dijital ikiz uygulamasına yönelik olarak literatürde bildiğimiz kadarıyla bir çalışma yoktur. Bunun yanı sıra, literatürde sistem modelleme çalışmaları da fiziksel modelleme çalışmalarının önüne geçmemiş ve dijital ikiz teknolojisinin uygulanması için çalışılacak alan olarak seçilmemiştir [9]. Bu nedenle, tez kapsamında açık bir alan olarak görülen proje yönetiminde personel ve iş planlama çalışmalarında dijital ikiz yaklaşımının uygulanması ile literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda, bir proje kapsamında yapılacak iş paketlerinin planlanmasında; her bir işe personel havuzundan uygun yetkinlik ve performansta personelin atanması, proje tamamlanma zamanının belirlenmesi, projenin ilerleyen aşamalarında meydana gelebilecek bir değişim sonucunda proje planının güncellenmesi, projeye atanan personele bağlı olarak proje tamamlanma zamanı ile ilgili çıkarımların yapılması, ve istenilen bir tamamlanma zamanı verildiğinde bundan geriye doğru planın yapılması için geliştirilen karar destek sistemi ile zaman, kaynak ve efor verimliliğinin sağlanması ve bu sayede maliyetlerin düşürülmesi amaçlanmaktadır.

1.4. Tezin Organizasyonu

Tezin devamında, ele alınan konular kapsamında literatürdeki çalışmaların incelendiği ve özetlendiği Literatür Özeti bölümü gelmektedir. Bunu takiben, önerilen kavramsal modelin detaylı olarak anlatıldığı Proje Planlama ve Plan Güncelleme için Dijital İkiz Kavramsal Modeli bölümü yer almaktadır. Ardından, Bir Proje Planlama ve Plan Güncelleme Problemi için Matematiksel Modeller ve Bilgisayar Uygulaması bölümünde kavramsal modelden yola çıkılarak geliştirilen ve iki senaryo halinde incelenen uygulama ele alınmaktadır. Son olarak, sonuçlar ve öneriler sunulurken tez tamamlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Tez kapsamında, proje planlama, kaynak atama ve dijital ikiz konuları bir arada ele alınmıştır. Bu bölümde, literatür bu konuları kapsayacak şekilde üç ayrı başlık olarak incelenmiştir.

2.1. Proje Planlama

Proje planlama süreci, projelerin başarılı bir şekilde yürütülmesi için gerekli olan araçları, yöntemleri ve prosedürleri içermektedir. Bu sürecin amacı, projelerin belirlenen hedeflere ve önceliklere göre planlanmasını, yürütülmesini ve kontrol edilmesini sağlamaktır. Proje planlama süreci, projelerin başlangıcından sonuna kadar devam etmekte ve projelerin amaçlarına ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

Pellerin ve Perrier [10] proje planlama için kullanılan yöntemleri incelemektedir. Çalışmada belirtilen yöntemler ve teknikler arasında; Gantt Şeması (Gantt Chart), Program Değerlendirme ve İnceleme Tekniği (Program Evaluation and Review Technique – PERT), Kritik Yol Metodu (Critical Path Method – CPM), Kazanılmış Değer Analizi (Earned Value Analysis), Kritik Zincir Proje Yönetimi (Critical Chain Project Management), Çevik Proje Yönetimi (Agile Project Management), Scrum, Yalın Proje Yönetimi (Lean Project Management), Altı Sigma (Six Sigma), Toplam Kalite Yönetimi (Total Quality Management) yer almaktadır. Bunların her birinin farklı proje türleri için en uygun yöntem olabileceği, bir "en iyi yöntem" olmadığı belirtilmiştir. Ancak bu proje planlama yöntemlerinin, gerçek zamanlı bilgi sağlamaması ve güncelliğini koruyamaması önemli bir eksiklik olabilecektir. Bu yöntemler genellikle projelerin başlangıcından itibaren belirli bir zaman diliminde kullanılır ve gerçekleştirilir. Projelerin gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkan belirsizlikler ve değişen koşullar nedeniyle yapılan, planlarda tahminlerden sapmalar olabilmektedir. Bu nedenle, gerçek zamanlı bilgi sağlamayan ve güncelliğini koruyamayan yöntemler günümüzde projelerin etkili bir şekilde yürütülmesi için yetersiz kalabilecektir.

Aksoy v.d [11], yakın bir tarihe kadar uygulanan proje yönetim metotlarını inceleyerek zaman ve maliyet odaklı planlamalarda genellikle CPM, PERT gibi geleneksel metotların kullanıldığını belirtmektedir. Benzer olarak, Atin ve Lubis [12] ile Bodunwa ve Olalekan

[13] da proje planlama yöntemi olarak CPM ve PERT ile ilgili çalışmalarından bahsederek yöntemlerin olumlu ve olumsuz sonuçlarını değerlendirmektedir.

Kosztván [14] söz konusu geleneksel yöntemlerin kullanılmaya devam edilmesi ile projelerde karşılaşılan zorlukları değerlendirmiş ve çeşitli önerilerde bulunmuştur. Hızla değişen teknoloji, globalleşen ekonomi, sürekli değişen müşteri ihtiyaçları ve proje yönetiminde esnekliğin sağlanamaması karşılaşılan zorluklar olarak belirtilmiştir. Çalışmada karşılaşılan zorluklarla nasıl başa çıkılacağı noktasında verilen aşağıdaki çözüm önerileri bu tez çalışmasını destekler niteliktedir.

- Proje yönetiminde esnek ve adaptif yöntemlerin kullanılması
- Projelerin sürekli değerlendirilmesi
- Projelerin belirsizliğe karşı esnek olması
- Projelerin önceliklere göre planlanması
- Projelerin sürekli öğrenmeye açık olması
- Çevik (agile) yöntemlerin kullanılması

Hasan v.d. [15] çalışmalarında benzetim yöntemi kullanarak, bir imalat atölyesinde proje planlaması ve programlama işlemlerinin gerçekleştirilmesini ve iyileştirilmesini ele almışlardır. Yaklaşımlarında, atölyede gerçek üretim sürecine geçilmeden önce benzetim modeli üzerinden proje planlaması gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, proje planlaması ile gerçek dünya koşullarına daha yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Çalışmada bu tez kapsamında önerildiği gibi gerçek zamanlı bir veri akışından ya da kendini güncelleyen bir sistemden bahsedilmemesine rağmen atölye ortamının modellenmesiyle daha verimli bir plan oluşturulduğu görülmektedir.

Zwikael ve Gilchrist [16] proje planlamasının hangi durumlarda projeyi olumsuz etkileyebileceğini incelemektedir. Çalışmada, proje planlamasının etkin olmadığı, iyi oluşturulmadığı durumlarda projenin esnekliğinin azalabileceği, proje ekibinin yenilikçi yönünün kısıtlanabileceği, proje yöneticisinin ve ekibinin kendilerini plana bağlı kalmak zorunda hissedebileceği gibi proje planlamadan kaynaklı olarak ortaya çıkabilecek olumsuzluklar değerlendirilmektedir. Gantt Şeması, PERT, CPM gibi geleneksel proje

planlama yöntemleri esnek olmamaları nedeniyle verimli olmayan, problem yaratabilecek yöntemler olarak ele alınmaktadır.

Proje planlama ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde genellikle geleneksel proje planlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Buna rağmen ilgili yöntemlerin teknolojinin ve müşteri teslim sürelerinin hızına yetişemediği de görülmektedir.

Literatürde, ihtiyaçlar doğrultusunda farklı yöntemler ile gerçek süreçlerin simülasyonu gibi çalışmalar yapılmışsa da, bir projenin ihtiyacına göre sürekli kendini güncelleyen, ileriye yönelik bilgiler sunan ya da proje süresince ürettiği verilerle projenin son durumu ile ilgili kullanıcıyı bilgilendiren bir sistemin olmadığı görülmüş ve böyle bir sisteme projelerin başarısının artırılması açısından ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle, proje planlama sürecinde esnek ve adaptif yöntemlerin kullanılmasının önemine dikkat çekilmek istenmektedir.

2.2. Kaynak Atama

Projelere kaynak atamasının düzgün yapılması, proje başarısının bir anahtarıdır. Doğru kaynağın doğru yere atanması ile projenin süresinde ve maliyetinde önemli ölçüde azalma sağlanır. Bu nedenle, personel atamasının doğru yapılması proje planlama sürecinin önemli bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle bir şirketin veri yapısına uygun olarak modellemelerin yapıldığı görülmektedir.

Campbell ve Diaby [17] çalışmalarında çok yönlü, bir diğer ifadeyle birden çok yeteneği olan personelin atamalarında kullanılan bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemin klasik personel atama yöntemlerinden daha etkili olduğu belirtilerek, işletmelerde daha esnek ve verimli çalışmasını sağladığı ifade edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen kavramsal modelde de personel yetkinlikleri üzerinde durularak projedeki iş adımlarının en uygun personele atanması sağlanmaktadır. Bu sayede, proje çalışmaları hızlandırılarak verimlilik artırılmaktadır.

Lin v.d. [18] minimum maliyet ile maksimum verimlilik için oluşturdukları çok amaçlı problemi çözmek için bir arama algoritması (Particle Swarm Optimization (PSO)) kullanmaktadır. Çalışma kapsamında ilk önce rastgele olarak personel ve işler arasında

atamalar yapılmaktadır. Her atamada verimlilik ve maliyet değerleri hesaplanmaktadır. PSO yöntemi, verimlilik ve maliyet değerleri arasında denge kurmak amacıyla çalıştırılmaktadır ve değerler iteratif olarak değiştirilerek en iyi sonucu bulmak amaçlanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde de amaç fonksiyonu maliyeti azaltmak ve projenin en kısa zamanda tamamlanmasını sağlayarak verimliliği artırmak üzere oluşturulmuştur.

Valouxis ve Housos [19] sağlık sektöründe çalışan personeller için çalışma ve dinlenme zamanlarının planlaması için hibrit bir model önermektedir. Matematiksel modelleme ve genetik algoritma (GA) tekniklerini birleştiren model ile personellerin işlere ataması yapılmaktadır. Çalışma kapsamında, hibrit yöntemin sadece matematiksel model ya da GA kullanmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Fakat modelin birden çok algoritma içermesi yeniden uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle en başta yapılan atamalar iyi sonuç verse de gerçek hayattaki uygulamalar modelin verdiği sonuca göre olmadığında plan bozulmaktadır. Bu durum da gerçek zamanlı bir sistemin ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır.

Fernandez-Viagas ve Framinan [20] proje planlaması ve personel atamalarını birlikte değerlendirmenin projede daha etkili bir sonuç elde edilmesini sağlayabileceğini öne sürmektedir. İki farklı değişkenin birlikte değerlendirilmesiyle, işlem süreleri ve çalışan sayısı arasındaki ilişki modellenerek değişken işlem sürelerinin dikkate alınmasıyla projede yapılacak tüm işlerin tamamlanması için gereken sürenin önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmektedir. Tez kapsamında, bu çalışmaya benzer şekilde, matematiksel model oluşturulurken işlerin süreleri atan personelle ve personelin o işteki performansına göre değişmektedir.

Wu ve Sun [21] tarafından yapılan başka bir atama çalışmasında toplam dış kaynak maliyetini en aza indirmek amacıyla projeyi planlayarak karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama yardımıyla atama yapılması önerilmektedir. Çalışma kapsamında 30 personel, 15 görev için 5 dönem boyunca çalışmaktadır. Çalışma kapsamında önerilen model ile problem çözüldüğünde her bir dönem için problemin çözüm süresi 104 dakika sürmektedir. Çalışmada, planlama ve personel atama kararlarının her dönem bir kez alındığı belirtilmektedir ve bu nedenle hesaplama süresi endüstri için kabul edilebilir sayılmıştır. Çalışma, dönem içerisinde yaşanabilecek değişimleri (personel istifası vb.)

incelemediği için gerçek hayattan uzak kalmaktadır. Ayrıca, çalışmada kullanılan programlama yöntemi ile çözümün çok uzun zaman alması, bu tez kapsamında önerilen kavramsal modelin, özellikle de gerçek zamanlı çalışacak olmasından dolayı, daha az işlem süresine sahip bir model ile kullanılması gerekliliğini doğurmuştur.

Chen v.d. [22] Bilgi Teknolojileri alanında ürün geliştirmek için birden fazla proje planlamasının yapılması ve birden fazla yetenekli personelin atanması için çok amaçlı bir model sunmaktadır. Çalışma, yeteneklerin zaman içinde değişebildiğini varsaymakta, bu değişimin proje planlamasını ve personel atama kararlarını nasıl etkilediğini inceleyerek çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunmakta, ve bu modeli kullanarak hem proje işlerinin hem de çalışanların yeteneklerinin en iyi şekilde kullanımının sağlanmasını amaçlamaktadır. Çok amaçlı oluşturulan matematiksel modelde amaçlar arasında; minimum projelerin tamamlanma süresi, maksimum çalışan kullanımı (çalışanların yeteneklerinin en iyi şekilde kullanımı) ve minimum çalışan değişim maliyeti (çalışanlar arasında atama ve değiştirme maliyetleri) yer almaktadır. Çalışma değerlendirildiğinde, çalışanların yeteneklerinin zaman içinde değişebildiği dikkate alınsa da, bu değişimin nasıl gerçekleştiği veya nasıl öngörülebileceği konusunda yeterli bilgi sağlanmamaktadır.

Başka bir çalışmada Gutjahr ve Reiter [23] belirsizlik altında proje portföy seçimi ve personel atama problemi için iki amaçlı bir model sunmaktadır. Bu model, proje portföyünde en iyi performansı sağlayarak projenin tamamlanma zamanını minimize etmeyi ve personel atamaları için en az maliyeti amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında bahsedilen söz konusu belirsizlikler proje zaman çizelgesi, personel yetkinliği ve proje bütçesi olarak değerlendirilmektedir. Belirsizlikler yönetilmeden proje yönetimi yapmanın zor olduğu ifade edilerek belirsizliklerin projelerin başarısının artması açısından kritik bir sınav olduğu belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında da geliştirilen matematiksel modelin gerçek zamanlı verilerin anlamlandırıldığı bir sistem içerisinde kullanılması ile bahse konu belirsizliklerin giderilmesi amaçlanmaktadır.

Gutjahr v.d [24] başka bir çalışmada yine personel atamalarıyla ilgili araştırmalarını paylaşarak proje yönetiminde yetenek odaklı bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır. Doğrusal programlama ile ifade edilen problem çözümü ile modelin, projelerin tamamlanmasını, personel atamalarının maliyetlerini ve personel yeteneklerinin en iyi şekilde kullanılmasını optimize ettiği görülmektedir. Fakat diğer çalışmalarda da

belirtildiği gibi bütün çalışma tek yönlü olarak yapılmaktadır. Model uygulamaya geçirildikten sonra elde edilen verilerle model tekrar desteklenmemektedir. Bu tez kapsamında, gerçek zamanlı ve çift yönlü modellerin proje planlamada kullanılması ele alınmıştır.

2.3. Dijital İkiz

Endüstri 4.0 ile önemi ve bilinirliği artan Dijital İkizler, fiziksel ve sanal dünyanın birbiri ile entegrasyonunu kurarak gerçek zamanlı veriler ile etkileşim kuran süreç ve hizmetlerin modellenmesini sağlamak içindir. Dijital İkiz kavramı çok yeni olmakla birlikte bunun literatürdeki çoğu uygulaması genellikle konsept seviyesindedir. Grieves ve Vickers [25] Dijital İkiz'i inceledikleri çalışmalarında, dijital ikiz kavramsal modeli üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; fiziksel dünyada fiziksel ürün, siber dünyada fiziksel ürünün sanal karşılığı, ve fiziksel alan ve siber alan arasındaki veri ve bilgi etkileşimidir. Çalışmada, ürün yaşam döngüsünün birbirine bağlanabilmesinin bu bölümlerin birbiri ile etkileşimli olarak çalışabilmesi ile mümkün olduğu açıklanmaktadır. Dijital İkiz kavramının ilk çalışmalarından biri NASA tarafından [26] yapılmıştır. NASA, Dijital İkiz konseptini bir veya daha fazla fiziksel sistemi en iyi şekilde yansıtan fiziksel modelleri, sensör verilerini ve geçmiş verileri kullanan gerçekçi, yüksek ölçeklemeli bir simülasyon olarak tanımlamıştır. Verilerin sistemin bütün yaşam döngüsü boyunca toplanıp işlenmesiyle elde edilen bilginin sistemin dijital ikizine aktarılmasıdır. NASA'ya göre dijital ikizin dört ana işlevi bulunmaktadır. Bunlar; fiziksel ürünün gelecekteki durumunu ve performansını kestirebilmek için tahmin, sistemin sürekli izlenmesiyle elde edilen güven, projenin gelecek dönemlerde yaşayabileceği olası arızaları tahmin edebilmesi için teşhis ve son olarak eldeki bütün verilerin de kullanılmasıyla sorgulama işlevidir. Bu dört ana işlev göz önünde bulundurulduğunda ürünün kullanım ömrü boyunca ürettiği bütün verinin kullanılmasıyla oluşturulan simülasyonların sorunları ortaya çıkmadan önce öngörebilmek, arızalanma ve zaman kaybını önlemek gibi özelliklerle başta savunma olmak üzere farklı birçok sektörde kullanımına ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Deng v.d. [27] dijital ikiz teknolojisinin kapsadığı özellikleri aşağıdaki şekilde tanımlamıştır:

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye tüm verilerini birleştirir.

- Yaşam döngüsü boyunca fiziksel üründe var olur, gelişir ve sürekli bilgi biriktirir.
- Fiziksel nesnelere tanımlanması ve optimize edilmesini sağlar.

Yukarıdaki özellikler değerlendirildiğinde dijital ikiz oluşturmak için nesnelere bütün verilerinin toplanarak işlenmesi ve optimize edilerek sisteme geri beslemeler yapılması da konsept içerisinde yer almaktadır. Buradan da anlaşıldığı şekilde dijital ikizin oluşturulması için tek yönlü bir veri akışının oluşturulması yeterli değildir. İki yönlü veri akışı oluşturularak fiziksel sistem üzerinde karar verme yetkisinin oluşturulması amaçlanmaktadır.

Sektörler içerisinde dijital ikiz kullanımının getireceği faydalar düşünüldüğünde dijital ikiz oluşturulması ile daha ekonomik ve esnek çalışmanın mümkün olduğu görülmektedir. Özellikle hızın önem kazandığı bugünlerde müşterinin beklentilerine ve rekabet koşullarına en uygun ürünü daha az maliyet ile daha hızlı bir şekilde üretmek firmaları öne geçirecektir.

Dijital İkiz uygulamaları en çok üretim sektöründe görülmesine rağmen [2], eğitim, sağlık, akıllı şehirler gibi çalışma ve iş alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, akıllı şehirler tarafından üretilen verilerle oluşturulan dijital ikizler sayesinde kentsel planlama, politika, sağlık, eğitim gibi alanlarda alınacak kararlar önceden modellenerek sistemlerin simülasyonu dijital ikizlerle oluşturulabilmektedir. Göçen [28], eğitim sektöründe açık ve uzaktan öğrenmede dijital ikizin kullanılabilmesine, bu sayede özellikle kişiselleştirilmiş eğitim modellerinin öğrencilere uygulanabileceği gibi kişiselleştirilmiş eğitim modellerine ve öğrencilerle ilgili veri kaynağı oluşturularak sistemden ayrılmasında bildirimlerin verilebileceğine, sanal sınıfların oluşturulabileceğine ve bir çok alanda dijital ikizden yararlanılabileceğine değinmiştir.

Özen ve Gürel [29] çalışmalarında kamu denetimlerinde dijital ikizin kullanılmasıyla denetim maliyetlerinin düşürülebileceğini, iş yükünün azalabileceğini ve denetim kalitesinin artabileceğini belirtmişlerdir. Dijital ikiz ile işletmeler ürünleri modelleyebilir, izleyebilir, test ve kontrol edebilir; sürekli gerçek ortamdan toplanan veriler ile işin görünen ve görünmeyen yönleri kapsamında bilgi sağlayabilir; fiziksel ve sanal sistem arasında entegrasyon kurarak anlık haberleşme sağlayabilir, aynı zamanda üretimden

sonra da devam eden ürün yaşam döngüsü ile üretim sürdürülebilirliği, pazar payı, toplam gelir, müşteri memnuniyeti gibi alanlarda fayda sağlayabilir [30].

Bir dijital ikiz sisteminin kurulması ve sağlıklı bir şekilde devam ettirilebilmesi için mühendislik ve operasyonel verilerin birleştirilmesi ve daha sonrasında sayısallaştırılan bu verilerin bir üretim ortamı düşünüldüğünde sensörlerle, gömülü sistemlerle, makinelerle entegre edilmesi gerekmektedir [31]. Verilerin sayısallaştırılmasıyla oluşturulmuş dijital ikiz modellerinin sürekli geliştirilerek güncellenmesi, modellerin düzgün çalışabilmesi için de sabit, kesintisiz veri akışı yani veri kalitesi gerekmektedir. Verilerin tutarsız olması durumunda, dijital ikiz yanlış tahminler yapabilir ve sonucunda yanlış kararlar alınabilir. Dijital ikiz sistemlerinin oluşturulmasındaki bir diğer önemli nokta güvenlik ve gizliliğidir. Şirketlerin bu teknolojiyi uygularken bu konulara da önem vermesi gerekmektedir [32].

Jiang [33] çalışmasında, dijital ikizlerden elde edilen gerçek zamanlı kaynak durumunu ve proje ilerleme bilgilerini kullanarak planlama, çizelgeleme ve uygulamayı kolaylaştırmayı amaçlayan dijital ikiz özellikli gerçek zamanlı bir senkronizasyon sistemi önermektedir. Bu kapsamda: (1) İşlevsel verilere dayalı gerçek zamanlı bir planlama, çizelgeleme ve uygulama senkronizasyon modeli, belirsizliklerle başa çıkmak için kaynaklarla ilgili gerçek zamanlı verileri göz önünde bulundurarak operasyon ve kaynakları yerinde koordine ve senkronize etmek için tasarlanmıştır. (2) Amaç fonksiyonlarını, kapasite veya öncelik kısıtlarını kullanan geleneksel planlama modellerinin çoğu, değişken ortamlardaki belirsizlikleri ele almaları zor olduğundan, gerçek projeler için uygulanabilir değildir. Önerilen çözüm gerçek verileri anlık olarak dikkate alacağı için temel performans göstergelerinin optimizasyonunu garanti eder ve belirsizliklere karşı daha iyi uyum sağlar. (3) Çalışma birçok farklı alanda uygulanabilir. Çalışmanın en önemli şartı halihazırda projede planlamaya dahil edilecek bilgilerin gerçek zamanlı olarak alınmasıdır. Bu kapsamda çalışmanın gereklilikleri yerine getirildiğinde ortaya çıkan sonuçların geleneksel yöntemlere göre daha verimli olduğu görülmektedir.

Taner ve Parlak Biçer [34] çalışmalarında Endüstri 4.0'ın proje yönetimine olan etkisini organizasyon, koordinasyon, verimlilik, standardizasyon ve kısıtlar olarak beş başlık altında incelemişlerdir. Bu kapsamda, organizasyonel değişimlerle ilgili olarak

geleneksel proje yönetiminde olmayıp Endüstri 4.0 ile gelen yetenekler arasında proje metrikleri kullanılarak gerçek zamanlı olarak rapor hazırlanabilmesi, proje ekiplerinde bulunan farklı disiplinlerin bulut bilişim sistemleri ile sürekli olarak haberleşebilmesi, yönetim ekibi ile internet ve teknolojik araçlar kullanılarak sürekli iletişim halinde olunması ve bu sayede sorunların gerçek zamanlı olarak tanımlanması ve anında çözülmesi ile karmaşık, teknik projelerin yürütülmesi değerlendirilmektedir. Endüstri 4.0'dan etkilenen proje yönetimi ile koordinasyon alanında da gelişmelerin olduğu belirtilmiştir. Bunlar; simülasyonlar ile etkin ve verimli iletişimin kurulması, IoT yardımıyla yapı bileşenleri ve personellere ait gerçek zamanlı verilerin elde edilmesi, proje paydaşlarının da bulut bilişim kullanmasıyla veri paylaşımı ve iletişimin kolay olması olarak ele alınmıştır. Verimlilik alanında sağlanan gelişmeler kapsamında; yapı üretim süreçlerinde yapı bileşenlerinin IoT kullanılarak izlenmesi ile fazla stok ya da eksik malzemenin oluşturabileceği problemlerin engellenmesi, büyük üretim tesislerinde otonom robotların kullanılmasıyla makine ve iş gücünde yaşanan problemlerin önüne geçilmesi, simülasyon ve bilgisayar tabanlı araçların yardımıyla mühendislik ve yapım teknikleriyle ilgili olası problemlerin önceden tespit edilmesi ve bulut bilişim ile verimli bir iletişimin kullanılması değerlendirilmektedir. Standardizasyon kapsamında; proje ve malzemelerle ilgili kullanılan standartlara kolay erişim olması, siber güvenlik ile ürün tasarımlarına ilişkin bilgilerin korunması ve teknolojinin ilerlemesiyle hayatımıza giren ve Endüstri 4.0 ile önemi daha çok artan simülasyon, katmanlı üretim ve artırılmış gerçeklik ile standart tespitinin yapılması belirtilmiştir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim ve yönetim süreçlerinde kullanılması ile birlikte, bu süreçlerin daha az dış faktörlere bağımlı hale geleceği belirtilmektedir. Örneğin, otomatikleştirilmiş üretim süreçleri, daha az işgücü ihtiyacını ve daha az hata yapma ihtimalini beraberinde getirmektedir. Aynı şekilde, yapay zeka destekli yönetim süreçleri, daha hızlı ve doğru karar vermeyi sağlamaktadır. Bu nedenle, Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanılması ile üretim ve yönetim süreçleri daha az dış faktörlere bağımlı hale gelmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, projelerin planlama sürecinde mevcut kaynak ve iş paketleri kullanıldığında projenin tahmini tamamlanma süresinin ne olacağı ve personellere uygun iş atamalarının nasıl yapılması gerektiği gibi sorulara çözüm aranmaktadır. Bunun yanında, projenin tamamlanması gereken süre verildiğinde, söz konusu tarihte projenin bitmesi için mevcut ve yeni alınacak personel bilgisi ile geriye

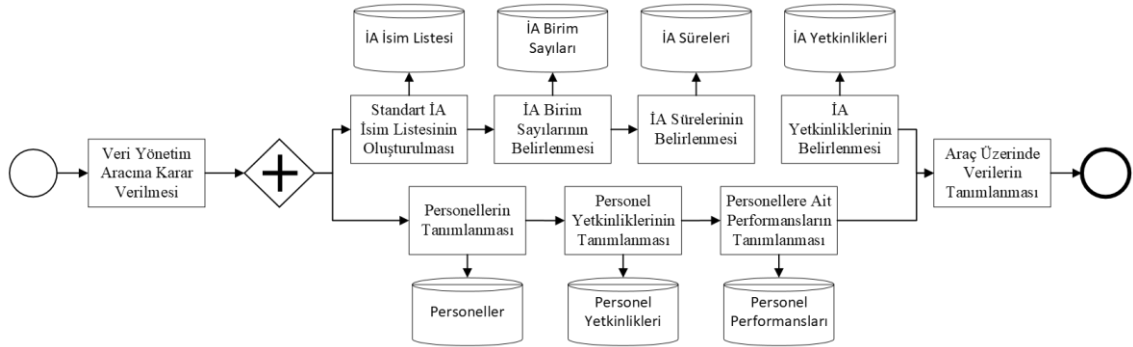
yönelik analizler yapılabilmesi, projenin herhangi bir aşamasında güncelleme yapılması gerektiği durumlarda da buna izin veren bir sistemin kurulması hedeflenmektedir.

Literatürde bulunan proje planlama ve personel atama çalışmaları kapsamında önerilen yaklaşımlar incelendiğinde bunların gerçek problemler için sınırlı çözümler sunabildiği, gerçek hayatta herhangi bir değişiklikte çözümün geçersiz hale gelebileceği ve belirsizliklerin ortaya çıkabileceği görülmektedir. Dijital ikiz teknolojisinin, proje planlamada ve personel atamalarında pratikte oluşabilen açığın kapatılması konusunda fayda sağlayabileceği öngörülmektedir. Bir dijital ikiz ile gerçek zamanlı veriler kullanılarak geriye ve ileriye yönelik tavsiye mekanizması kurulabilecek ve süreçlerde optimizasyon sağlanabilecektir. Bu tezin, proje planlama ve planın güncellenmesi süreçlerinde dijital ikiz teknolojisinin uygulanmasına ışık tutması beklenmektedir.

3. PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME İÇİN DİJİTAL İKİZ KAVRAMSAL MODELİ

Proje yönetim süreçlerinde en önemli ama belki de en çok değişikliğe uğrayan faaliyetlerden birisi proje planının oluşturulması ve meydana gelen değişikliklerin proje planına yansıtılarak güncelliğinin sağlanmasıdır. Tez kapsamında bu faaliyetler dijital ikiz yaklaşımıyla ele alınmıştır. Bu doğrultuda bir kavramsal model geliştirilmiş, modelin uygunluğunu test etmek amacıyla örnek bir çalışma yapılmıştır.

Dijital ikiz yaklaşımıyla proje planının oluşturulması ve güncelliğinin korunması için verinin hazırlanması tezde geliştirilen kavramsal modelin ilk aşamasıdır. Verilerin doğru, çalışmaya uygun ve güncel olması çalışmadan elde edilen sonuçların etkinliği açısından önemlidir. Şekil 3.1’de İş Süreçleri Akış Diyagramı kullanılarak önerilen veri hazırlama süreci gösterilmiştir. Burada, sürecin başında ve sonunda bulunan daireler iş sürecinin başlangıcını ve bitişini ifade etmektedir. Dikdörtgen iş sürecinin adımlarını, içerisinde artı (+) işareti bulunan eşkenar dörtgen aktiviteyi paralel olarak gerçekleştirildiğini, içi boş eşkenar dörtgen kontrol ve karar noktalarını, oklar iş akış yönünü, paralel kenar veri girişi ve çıkışını, kutu şeklindeki simgeler ise veri topluluğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Verilerin Hazırlanması

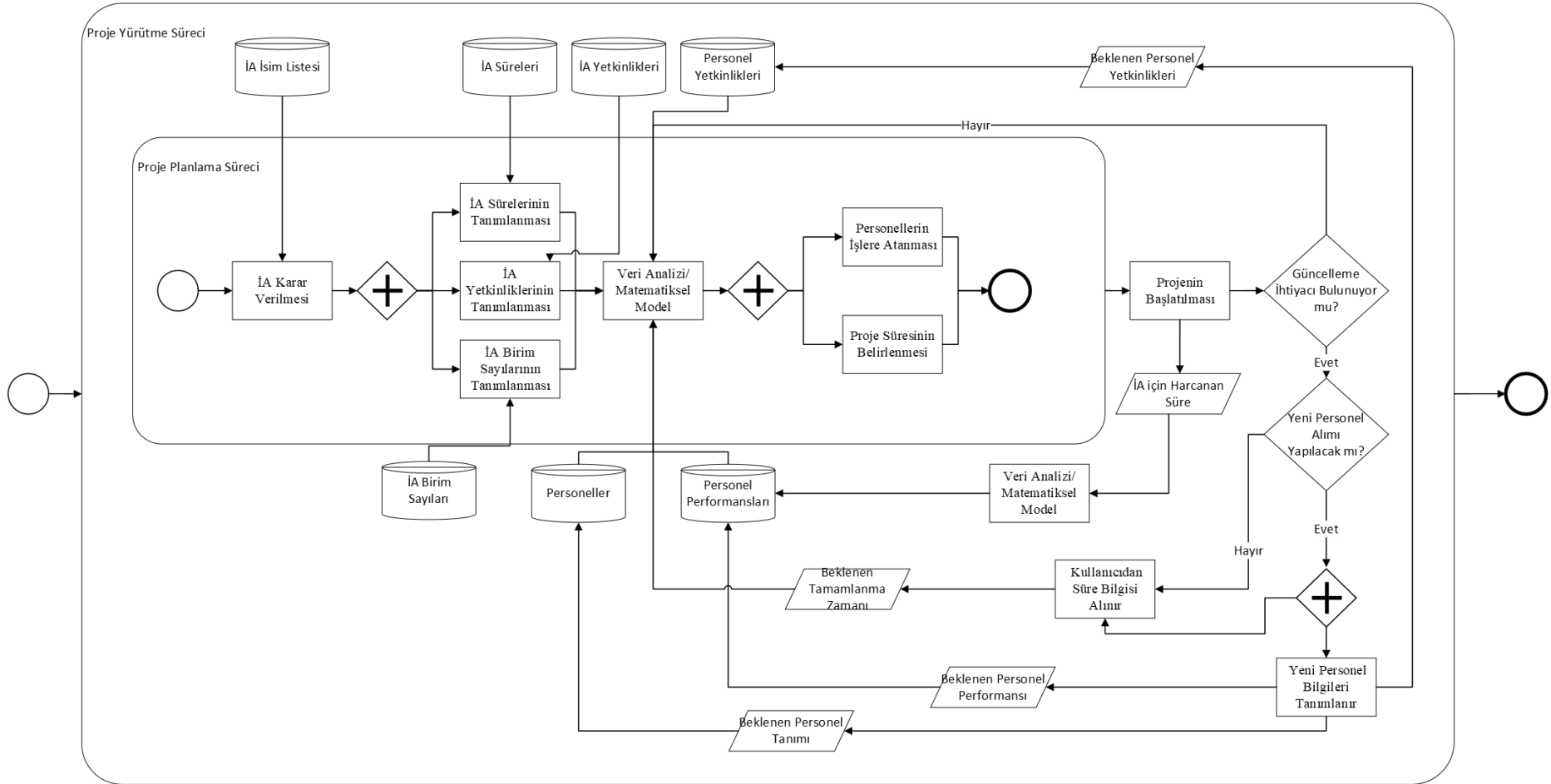
Daha önce belirtildiği üzere, dijital ikiz teknolojisinin kritik bir unsuru gerçek zamanlı verilerle sürekli kendini güncelleyen ileri ve geri yönlü modeller oluşturularak risk ve maliyetin minimize edilmesi, sürecin otomatize edilerek insan müdahalesinin minimuma indirilmesidir. Bu amaçla, proje planlama aşamasında dijital ikize girdi verilerin toplanacağı, işleneceği ve sunulacağı bir veri yönetim araç gereklidir. Bu araç kullanıcılar tarafından tasarlanabileceği gibi bir platform olarak satın da alınabilir. Şekil 3.1’de

gösterildiği üzere verilerin nasıl yönetileceğine karar verilmesi ile veri hazırlığı süreci başlamaktadır. Seçilen veri yönetimi aracı, verileri sakladığı gibi aynı zamanda kullanıcı tarafından verinin büyüklüğüne, yapısına göre seçilen veri anlamlandırma yöntemini de uygulamaktadır.

Veri yönetimi aracı seçimi yapıldıktan sonra verilerin düzenli bir şekilde toplanabilmesi için projelerde iş adımları (İA) olarak tanımlanan süreçler standartlaştırılarak aynı şekilde isimlendirilir. Bu sayede, araç üzerinde iş adımları her projede aynı isimlendirme kullanılacak şekilde tanımlanmış olur. Aynı zamanda her bir iş adımının hangi yetkinlikleri içermesi gerektiği de sisteme eklenir. İş adımları kapsamında deneyimli bir personel ile her bir iş adımı için gereken iş birimi sayısı (İB) belirlenir. İş birimi sayısı bütün iş adımlarında ortak kullanılacak bir terimdir ve yine sürecin standardizasyonu için önemli bir adımdır. Örneğin; yarım gün alacak işlere 1 İB denilirse, 5 günlük bir iş 10 İB olarak tanımlanacaktır.

Verilerin hazırlanması sürecinde önemli bir diğer nokta her bir personel için personel yetkinliklerinin ve personel performanslarının tanımlanmasıdır. Personel performansları, bir personelin araç üzerine ilk kaydı yapılırken tanımlanması gereken bir bilgidir. İlerleyen adımlarda model, personel performanslarını güncel duruma göre gerçek zamanlı olarak güncelleyecektir.

Verilerin hazırlanması sürecinde son ve dijital ikiz yaklaşımı için önemli bir aşama her bir personelin iş adımlarına harcadıkları zamanın kaydının tutulmasıdır. Bu bilgi, personelin gerçekte ne kadar zamanını ilgili iş adımında geçirdiğini belirlemekte ve buna bağlı olarak ilk başta personele atanan performansın güncellenmesini ve sürekli bir veri akışı sağlanarak güncel tutulmasını sağlamaktadır. Örneğin bir personelin 10 İB için 100 saat harcaması sonucunda 1 İB için 10 saat harcadığı belirlenmektedir. Şekil 3.2’de bir projenin başlangıç aşamasında planlamanın nasıl yapılacağı ve projenin ilerleyen aşamalarında planın nasıl güncelliğinin korunacağı gösterilmektedir. Burada gösterildiği üzere, projenin başlamasıyla birlikte, iş adımlarına harcanan süreler personeller tarafından anlık olarak veri analizi ya da matematiksel modele girdi sağlamakta, personel performanslarının güncellenmesi gerçekleşmektedir. Bu sayede, iş süreçlerinin verimliliği ve personel performansının optimize edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.2. Proje Planlama ve Plan Güncelleme için Kavramsal Model

Yeni bir projenin planlanma aşamasında veri yönetimi aracı üzerinden proje kapsamında yürütülecek iş adımları seçilmektedir. İş adımları seçildikten sonra önceden tanımlanmış olan iş adımlarının birim sayıları, süreleri ve gerekli yetkinlik tanımları da proje kapsamında değerlendirilmektedir. Bir sonraki aşamada, personelin işlere atanması için matematiksel model veya alternatif veri analizi yöntemleri uygulanmaktadır. Bu tez kapsamında, bir matematiksel model geliştirilmiştir ve dışarıdan alınacak yeni personel gereksiniminin ve maliyetinin de göz önünde bulundurulmasıyla projenin tamamlanma zamanı minimize edilerek proje planı sunulmaktadır. Ancak, kurumun veri yapısına uygun olarak makine öğrenmesi, klasik veri analizi yöntemleri de kullanılabilir yaklaşımlardır.

Matematiksel modelin çıktısı projenin tamamlanma zamanını minimize edecek, her bir iş adımına atanan personel ve projenin tamamlanma zamanıdır. Matematiksel model ilk çalıştırıldığında personel performansı olarak veri yönetimi aracına tanımlanan personel performansları kullanılmaktadır. Plana göre projeye başlanmasıyla personeller iş adımlarına harcadıkları zamanı sisteme girecekleri için performansları iş adımı birim sayıları ile oranlanarak yeniden hesaplanacak ve performansın değişimi ile matematiksel model tekrar çalıştırılarak projenin güncel bir tamamlanma zamanı hesaplanacaktır. Bir diğer ifade ile, örnek olarak 140 günde tamamlanacağı ön görülen bir proje başladıktan sonra sistemde oluşan personel performanslarına göre gerçek zamanlı olarak yeniden hesaplamalar yapılacak ve belki projenin bundan daha uzun/kısa sürede tamamlanabileceği ön görülecektir. Günlük ya da haftalık olarak söz konusu bilginin proje yöneticisine iletilmesiyle projenin en önemli amaçlarından biri olan projenin zamanında tamamlanması konusunda riskler görülebilecek ve çözümüne yönelik olarak harekete geçilebilmesine olanak sağlanacaktır. Aynı zamanda, projede personel değişikliği olması durumunda, açık kalan iş adımlarına yeni personeli atayarak değişime hızlı uyum sağlayan bir sistem oluşturulacaktır. Böylece, proje planlamada ve planın güncelliğinin sürdürülmesindeki belirsizlikler azaltılacak ve planın güncel tutulması sağlanacaktır. Kullanılacak veri yönetimi aracında veri sayısı arttıkça çıktıların kalitesi de iyileşecektir.

Projenin tamamlanma zamanı veri tabanında bulunan veriler her güncellendiğinde otomatik olarak güncellenmektedir; fakat personellerin sabit kalması durumunda bir noktadan sonra performansları da sabitleneceği için çok bir değişim olması

beklenmemektedir. Bu şekilde elde edilen proje tamamlanma süresi eğer proje teslim zamanı ile uygunluk göstermiyorsa sistem üzerinde güncelleme yapılarak eldeki personel değişikliği ile daha yüksek bir performansa sahip personelin projeye başlaması talep edilmektedir. Bu amaçla yeni personel ataması, kullanıcıdan projenin beklenen tamamlanma zamanı bilgisi alınarak tekrar matematiksel model üzerinden alınan sonuca göre olmaktadır.

Projenin tamamlanma zamanı değiştirilmek istendiğinde, ancak matematiksel modelin sonucuna göre mevcut personelle bu değişikliğin mümkün olmadığını anlaşıldığı durumda yeni personel alımı değerlendirilebilecektir. Sisteme eğer yeni personel alınacaksa proje bütçesine uygun olarak alınabilecek veya proje kapsamında değerlendirilebilecek personeller ve performansları veri tabanına kaydedilmektedir. Yeni personel performanslarının tanımlanmasının ardından projenin beklenen tamamlanma zamanı kullanıcı tarafından sisteme girilerek model tekrar çalıştırılmaktadır.

Bu aşamada da matematiksel model çalıştırılırken ya da veri analizi yaparken dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Yeni personel almak daha maliyetli olduğu gibi yeni personelin işleri öğrenmesi de uzun zaman alacaktır. Yeni alınacak personelin performanslarına göre uygun bir maliyet katsayısının modele dahil edilmesi modelin ilk önce eldeki personeli kullanmasını, eldeki personel ile işin zamanında tamamlanamayacağı durumda yeni alınacak en uygun maliyetteki personelin seçilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde projenin tamamlanması gereken gün sayısı sınırlı tutularak personel seçimi gün sayısına uygun olacak şekilde yapılmaktadır.

Tasarlanan kavramsal model, projeler için ortak bir veri havuzu oluşturmaktadır. Bu sayede birden fazla projenin planlanması ve takibi tek bir sistem üzerinden yürütülmektedir. Personel atamaları sistem üzerinde yapıldığından dolayı herhangi bir projede çalışan personel veri yönetimi aracı üzerinde atandığı işin başlangıç ve bitiş zamanı dikkate alınarak farklı bir projeye atanabilmektedir. Ortak bir veri tabanı kullanmanın yararı olarak kurum içerisindeki bütün projeler birbiriyle eş zamanlı olarak tek bir platformdan planlanabilmektedir. Bu şekilde personellerin üzerindeki iş yükleri takip edilerek, personel kullanımının verimli bir hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Önerilen kavramsal model, gerçek zamanlı personel verilerini kullanarak projenin ilerleyişinin çevrim içi takip edilebilmesini sağlamaktadır. Bu sayede kavramsal model, projenin başında tahminlenen projenin tamamlanma zamanında bir değişiklik olduğunda değişikliğin erken tespit edilebilmesini ve gerekli önlemlerin alınabilmesini desteklemektedir. Örneğin; projenin başlangıcında herhangi bir iş adımına atanan personelin izin kullanması durumunda söz konusu iş adımının tamamlanma zamanının etkilenmesi söz konusudur. Özellikle projelerdeki personel değişikliklerinin artması, projelerin teslim sürelerinin kısalması ve gecikme cezalarının yüksek olması gibi nedenlerden dolayı önerilen kavramsal modelin proje planlama sürecinde faydalı olacağı ve önerilere göre olası problemlerde hızlı aksiyon alınmasını sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak önerilen kavramsal model sayesinde, proje planlaması süreci daha verimli ve hızlı hale gelmekte, proje için gerekli olan personel ve maliyetlerin tahmini yapılabilmekte ve proje teslim süresi ile ilgili olarak olası gecikmeler önceden tespit edilerek önlem alınabilmektedir.

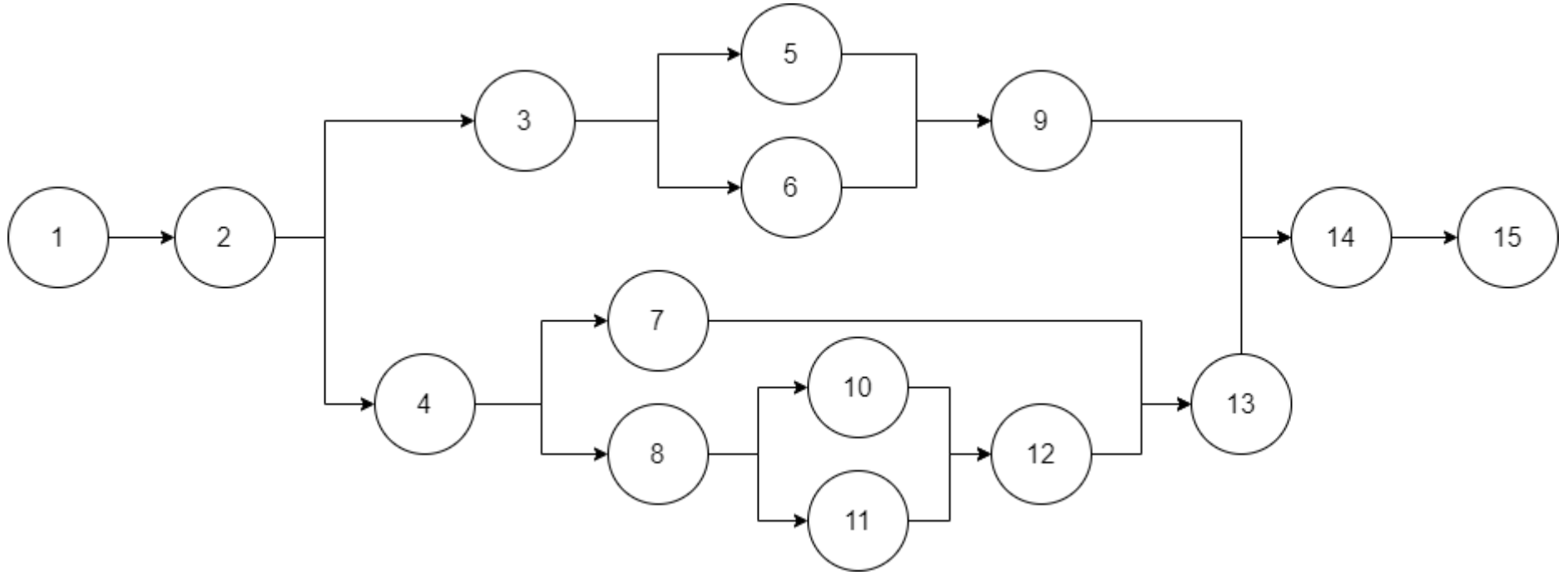
Bu tez kapsamında, önerilen kavramsal modelin uygulanması amacıyla, modelin belirli bir bölümünden yararlanılarak bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, sistem içerisinde tanımlanan projenin çözümüne yönelik olarak matematiksel bir model geliştirilmiş ve bir sonraki bölümde detayları verilen matematiksel model proje planlama çalışması sırasında, proje için gerekli olan zaman, maliyet ve personel gibi faktörleri de dikkate alarak, uygulanmıştır.

4. BİR PROJE PLANLAMA VE PLAN GÜNCELLEME PROBLEMİ İÇİN MATEMATİKSEL MODELLER VE BİLGİSAYAR UYGULAMASI

Bu tez kapsamında, önerilen kavramsal modelin bir kısmı kullanılarak, proje planlaması için iş adımlarının ve personel bilgilerinin dahil edildiği matematiksel model tabanlı bir çözüm tasarlanmıştır. Önerilen yöntemin proje planlamada uygulanabilirliği göstermek amacıyla bir proje ele alınmıştır. Bu proje, önerilen kavramsal modelin gerçek dünya uygulamalarında ne kadar etkili olduğunu ve hangi durumlarda kullanılabileceğini anlamaya yönelik bir çalışmadır.

Ele alınan proje iki senaryo üzerinden incelenmektedir. Senaryo 1, projenin işlerinin bölünebileceği varsayımıyla projenin en kısa zamanda tamamlanması için hangi personelin hangi işlere atanması gerektiğini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu senaryo, proje tamamlanma süresini belirlemeye ve hangi personelin hangi işlere atanması gerektiğini tespit etmeye yöneliktir. Senaryo 2 ise, projenin beklenen tamamlanma süresi verildiğinde personel performansının nasıl olması gerektiğini incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Aynı zamanda bu senaryo, proje başladıktan sonra herhangi bir zamanda işlerin kalan süreleri verildiğinde projenin kaç günde tamamlanacağını belirlemeye yöneliktir. Bu iki senaryo ile proje planlamada etkili bir yol haritası oluşturulması amaçlanmaktadır.

Proje iş adımları ve personel bilgileri tasarlanırken iş adımı ya da personel sayısı yerine metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla veri çeşitliliğine dikkat edilmiştir. Önemli olan, projenin amacına ulaşmak için gerekli olan iş adımlarının doğru ve etkili bir şekilde yürütülmesidir. Bu kapsamda, projede 15 iş adımı tanımlanmıştır. İş adımları arasındaki ilişkileri göstermek amacıyla Şekil 4.1’de görülen nod diyagramı (activity on node) kullanılmıştır. Nod diyagramında yer alan her bir düğüm (daire ile gösterilmektedir), proje çizelgesindeki bir iş adımı ile ilişkilendirilmiştir. İş adımlarına ait süreler ve iş adımları arasındaki ilişkiler Çizelge 4.1’de tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. İş Paketleri Nod Diyagramı

Çizelge 4.1. İş Adımları, Her İş Paketinin Süresi ve Bitişik Öncülü

İş Adımı	Süresi (Gün)	Bitişik Öncül
1	5	-
2	15	1
3	20	2
4	25	2
5	15	3
6	20	3
7	15	4
8	15	4
9	25	5, 6
10	10	8
11	5	8
12	15	10, 11
13	10	7, 12
14	20	9, 13
15	15	14

Çizelge 4.1’de görüldüğü şekilde projede 15 iş adımı bulunmaktadır. İş adımlarını belirtmek üzere numaralandırma yöntemi tercih edilmiştir. Numaralandırma yönteminin tercih edilmesinin nedeni tez kapsamında isimlendirmelerin karışıklık yaratmasının önüne geçilmesidir. İş adımları olarak bir projenin başarılı bir şekilde tamamlanması için yerine getirilmesi gereken görevler baz alınmıştır. Bunlar, kurumun ya da projenin yapısına göre değişecektir, ancak örnek olarak; projenin amacını, hedeflerini, öncelikleri ve süreçleri belirlemek için yapılan proje planlaması, gereksinimlerin belirlenmesi, tasarım aşamasında mekanik, yazılım, donanım tasarımlarının tamamlanarak geliştirme faaliyetlerine başlanması, projenin tüm modüllerinin test edilmesi, hata çözümlerinin yapılması, kurumların gerçekleştirilmesi, raporlamalar ve kapanış verilebilecektir. Proje süreleri ve bitişik öncül ilişkileri, tanımlanan iş adımlarına göre genel bir proje süreci düşünülerek belirlenmiştir.

Şekil 4.1’de bulunan Nod diyagramı ile proje iş adımlarının grafiksel bir temsili verilmiştir. Bu diyagram ile projenin aşamalarının nasıl birbirine bağlı olduğu gösterilmektedir. Nod diyagramları düğümler ve bağlantılar şeklinde oluşmaktadır. Düğümler, projenin aşamalarını temsil ederken, bağlantılar ise söz konusu düğümlerin nasıl birbirine bağlı olduğunu göstermektedir. Başlangıçtan bitişe (finish-to-start)

önceliği olarak adlandırılan bu süreç akışı, bir etkinliğin bir sonraki etkinlik başlamadan önce bitmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Örneğin Şekil 4.1, 9. iş adımının başlayabilmesi için 5. ve 6. iş paketlerinin tamamlanması gerektiğini göstermektedir.

Projenin iş adımları tanımlanarak, çalışılacak senaryolar belirlenmiştir. Bu senaryoların belirlenmesi sürecinde, çalışma ortamlarında karşılaşılabilecek olası senaryolara odaklanılmıştır. Bu sayede, tez çalışması hem akademik hem de sanayi ortamında uygulanabilirliği yüksek ve gerçek hayatta yararlı sonuçlar elde edebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Literatürde, dijital ikiz çalışmalarında gerçek zamanlı veri akışı ile genellikle dijital ortamdan fiziksele ve fizikselden dijitale olmak üzere çift yönlü bilgi akışı olduğu görülmektedir. Tez kapsamında önerilen model ile de proje kapsamında tamamlanması beklenen işlere eldeki personelin dağılımı yapılabileceği gibi geriye dönük olarak projenin bitmesi gereken zaman verildiğinde hangi performansta kaç adet personele ihtiyaç duyulduğu da tanımlanarak ileri ve geri yönlü bilgi üretme mekanizması kurulmuştur.

Ayrıca, herhangi bir zamanda projenin iş adımlarına ya da personele ait güncel bilgiler sisteme tanımlandığında planlamanın nasıl olacağı tekrar modele hesaplatılmaktadır. Bu sayede, proje planlama süreçlerinde daha etkili, güncel ve verimli bir şekilde planlama ve yürütme yapılması amaçlanmaktadır.

Proje kapsamında, belirtilen amaçları gerçekleştirmek için çeşitli durumları dikkate alan ve analiz eden iki farklı senaryo incelenmektedir. Bunlar, senaryo 1 ve senaryo 2 olarak adlandırılmaktadır.

Senaryo 1: İşlerin bölünebilirliği varsayımı altında, proje en erken kaç günde tamamlanır ve bu sürede tamamlanması için personellerin işlere ataması nasıl olmalıdır?

Senaryo 2: Projenin belirlenen süre içerisinde tamamlanması için personelin işlere ataması nasıl olmalıdır? Proje başladıktan sonra herhangi bir zamanda işlerin kalan süreleri verildiğinde proje kaç günde tamamlanır?

4.1. Senaryo 1

Senaryo 1 kapsamında projenin mevcut personel kaynakları ile en erken kaç günde tamamlanacağı ve personel atamalarının projenin en kısa süre içerisinde tamamlanması için nasıl olması gerektiği üzerine çalışılmaktadır. Böylece, projenin belirtilen süre içerisinde tamamlanmasının garanti edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç çerçevesinde, proje için her türlü durum dikkate alınarak işlerin; personel yetenekleri, deneyimleri ve mevcut yükleri göz önünde bulundurularak bölünebileceği varsayılmıştır. Bu sayede, projenin en hızlı şekilde tamamlanmasını sağlamak için personel atamaları yapılırken işlerin bölünebileceği varsayımı da bu uygulama kapsamında geliştirilen matematiksel modele tanımlanacaktır.

Senaryo 1'de Çizelge 4.1 ile tanımlanan iş adımları kullanılarak 14. işin bölünebileceği varsayımı ile projenin en kısa zamanda tamamlanması için personellere uygun işlerin atanması çalışılmaktadır. 14. işin bölünebilir olarak seçilmesinin nedeni 14. işe paralel bir işin bulunmamasıdır. Bu sayede işin bölünebilmesiyle projenin tamamlanma zamanının nasıl değiştiği direkt olarak görülmektedir.

Herhangi bir kurumda, her departmanın kendine özgü görevleri ve bilgi birikimi bulunmaktadır. Örneğin, satış departmanı müşteri ilişkilerini yönetirken, finans departmanı mali işlemleri yürütmektedir. Bu farklı görevler ve bilgi birikimleri nedeniyle her departmanın üyeleri farklı beceriler ve yeteneklere sahiptir. Bu durum projeler için de geçerlidir. Proje için belirlenen görevler ve işler için uygun kişilerin seçilmesi ve atanması projenin tamamlanması için önemli ve kritiktir. Örneğin, mekanik tasarım departmanında bulunan farklı yetkinliklerdeki personellere atanırken, mekanik test faaliyetleri için başka bir departmanda bulunan personeller yetkin olabilmektedir. Ayrıca, geleneksel proje planlama yöntemlerinde genellikle kişi bazlı atamalar yapılmaktadır. Bu, ilgili personelde değişiklik olması durumunda yeni personel atamasının zaman almasına neden olmaktadır. Bunun yerine Senaryo 1 kapsamında önerilen departman bazlı personel seçimleri, değişiklik durumlarına kolay uyum sağlanmasına neden olacaktır.

Çizelge 4.2, proje içerisinde yer alan farklı departmanların kodlarını içermektedir. Bu kodlar, proje içerisinde hangi departmanların ne tür işler yapacağını belirlemekte ve atamaların daha kolay yapılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, proje içerisinde herhangi bir

değişiklik olması durumunda kodlar sayesinde hızlıca hangi departmanın hangi işi yapacağı tespit edilebilmektedir.

Çizelge 4.2. Departman Kodları

Departman Adı
A
B
C
D
E
F
G

Çizelge 4.3, proje içindeki iş paketlerinin detaylı bir şekilde tanımlandığı bir kaynaktır. Bu çizelge, her bir iş adımının süresini, gerekli olan yetkin departmanın kodunu ve iş adımları arasındaki öncüllük ilişkilerini içermektedir.

Çizelge 4.3. İş Paketleri, Süreleri, Yetkin Departmanı ve Öncüllük İlişkisi

İş Paketi	Süresi (Gün)	Yetkin Departman	Öncüllük İlişkisi
1	5	A, B	-
2	15	A	1
3	20	C, D	2
4	25	F, G	2
5	15	D	3
6	20	C, E	3
7	15	F	4
8	15	F, G	4
9	25	E	5, 6
10	10	F	8
11	5	G	8
12	15	F	10, 11
13	10	E, G	7, 12
14	20	C	9, 13
15	15	A	14

Çizelge 4.4'te her bir departmanda yetkin olan personel bilgisi bulunmaktadır. Bu bilgi ile Senaryo 1 kapsamında işlerin ilk önce hangi departmanda yapılacağı belirlenmekte, ardından belirlenen departmanda hangi personellerin yüzde kaç performansla yetkin

olduğu değerlendirilerek ilgili iş adımına personelin ataması yapılmaktadır. Bu sayede bir personel bağımlılığı azaltılarak olası personel değişikliklerinde hızlı aksiyon alınması sağlanmaktadır.

Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere 7 departman ve 5 personel tanımlanmıştır. Çizelgeden de görüldüğü üzere bir personel birden fazla departmanda birden fazla görevi yapabilecek yetkinliğe sahiptir. Genellikle küçük çaplı şirketlerde bu duruma sık rastlanmaktadır. Daha büyük şirketlerde departman bazlı özelleşmeler daha fazla olduğu için genellikle her personel tek bir departmanda yetkin olmaktadır. Kurumun yapısına uygun olarak benzer çizelgeler oluşturulabilecektir.

Çizelge 4.4. Departmanlar ve Yetkin Personelleri

Departman/ Personel	P1	P2	P3	P4	P5
A	%85				
B		%85			
C	%85	%85	%80		
D					%85
E				%80	
F			%90	%90	
G					%85

Çizelge 4.4'te bulunan personel performansları tanımlanırken personelin bağlı olduğu departmandaki yetkinlik durumu değerlendirilerek bir örneklem oluşturulmuştur. Projelerde çalışan personel performanslarının projenin başarısının en önemli etkenlerinden biri olması ve personelin yetkinliğine göre işin tamamlanma zamanının değişiyor olması nedenlerinden dolayı uygulamaya personel performansları da dahil edilmiştir. Örneğin, 10 yıllık personel daha önceki deneyimleriyle bir işi 2 saatte yapabilirken, deneyimi olmayıp iş hayatına yeni başlayan bir personel aynı işi 2 günde yapabilecektir. Bu sebeple, projenin tamamlanma zamanının belirlenmesi ve iş atamalarının yapılması durumunda en kritik parametrelerden biri personel performanslarıdır.

Senaryo 1 kapsamında, doğrusal programlama yöntemi kullanılmıştır. Bu teknik, proje için gerekli olan tüm iş adımlarının zaman ve kaynak kısıtlarını dikkate alarak optimum

çözümü bulmak için matematiksel modeller kullanır. Senaryo 1 için proje tamamlanma zamanı ve personellerin iş atamaları, aşağıda tanımlanan matematiksel model dikkate alınarak hesaplanmış ve sonuçlar elde edilmiştir:

Parametreler

B = bölünebilir işler kümesi

BN = bölünemez işler kümesi

L_i = i işine paralel yapılabilir işler kümesi

D_i = i işinin süresi

P_{ik} = k personelinin i işindeki performansı

A = i işinin atanması gereken personel sayısı

M = büyük sayı

Karar Değişkenleri

x_i = i işinin tamamlanma zamanı

x_N = proje ağındaki son işin tamamlanma zamanı

y_{ik} = k personelinin i işine atanıp atanmadığını gösteren $\{0,1\}$ değişken

O_{ik} = k personelinin bölünebilir i işindeki çalışma oranı

a_{ij1}, a_{ij2} ve a_{ij} = yardımcı $\{0,1\}$ değişkenler

$$\text{Min } z = x_N$$

$$x_j \geq x_i + \sum_k (y_{jk} * \frac{D_j}{P_{jk}})$$

her i işi ve i 'nin BN kümesindeki her bitişik öncülü j için (1)

$$x_j \geq x_i + \frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}$$

her k pesoneli, i işi ve i 'nin B kümesindeki her bitişik öncülü j için (2)

$$x_j - \sum_k (y_{jk} * \frac{D_j}{P_{jk}}) \geq x_i - M * a_{ij1},$$

$$x_j \leq x_i - \sum_k (y_{ik} * \frac{D_i}{P_{ik}}) + M * a_{ij2},$$

$$\begin{aligned}
a_{ij1} + a_{ij2} &= a_{ij} + 1 \text{ ve} \\
y_{ik} + y_{jk} &\leq 2 - a_{ij} \\
i, j &\in BN, j \in L_i \text{ ve her } k \text{ için (3)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_j - \left(\frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}\right) &\geq x_i - M * a_{ij1}, \\
x_j &\leq x_i - \left(\frac{D_i}{P_{ik}} * O_{ik}\right) + M * a_{ij2}, \\
a_{ij1} + a_{ij2} &= a_{ij} + 1 \text{ ve} \\
y_{ik} + y_{jk} &\leq 2 - a_{ij} \\
i, j &\in B, j \in L_i \text{ ve her } k \text{ için (4)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_j - \left(\frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}\right) &\geq x_i - M * a_{ij1}, \\
x_j &\leq x_i - \sum_k \left(y_{ik} * \frac{D_i}{P_{ik}}\right) + M * a_{ij2}, \\
a_{ij1} + a_{ij2} &= a_{ij} + 1 \text{ ve} \\
y_{ik} + y_{jk} &\leq 2 - a_{ij} \\
i &\in BN, j \in B, j \in L_i \text{ ve her } k \text{ için (5)}
\end{aligned}$$

$$\sum_k y_{ik} = A, i \in B \text{ veya } BN \text{ (6)}$$

$$\sum_k O_{ik} = 1, i \in B \text{ (7)}$$

$$y_{ik} \geq O_{ik}, i \in B \text{ (8)}$$

$$0 \leq O_{ik} \leq 1, i \in B \text{ (9)}$$

$$x_i \geq 0, i \in B \text{ veya } BN \text{ (10)}$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \text{ her } i \text{ ve } k \text{ için (11)}$$

Senaryo 1 kapsamında oluşturulan matematiksel modelin amaç fonksiyonu projenin tamamlanma zamanını minimize edecek şekilde tanımlamıştır. Bu uygulamada senaryoda

15 iş bulunduğu için son iş olan 15. işin tamamlanma zamanının minimize edilmesi söz konusu senaryonun amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Amaç fonksiyonunun yerine getirilebilmesi için model projeyi en hızlı bitirecek personelleri işlere atamaktadır.

(1) numaralı kısıt ardıllık-öncüllük ilişkisini kullanarak j işinin i işinden sonra geldiğini ve iş süresinin atanan personelin performansına göre hesaplandığını ifade ederek bölünemez bir iş olan j iş adımının tamamlanma süresini hesaplamaktadır. Bölünebilir işlerin tamamlanma zamanının farklı olarak hesaplanması nedeniyle tamamlanma zamanı ayrı olarak modellenmiştir. (2) numaralı kısıt ardıllık-öncüllük ilişkisini kullanarak j işinin i işinden sonra geldiğini ve iş süresinin atanan personelin performansına göre hesaplandığını ifade ederek bölünebilir bir iş olan j iş adımının tamamlanma sürelerini hesaplamaktadır. Kısıt, bölünebilir işlere atanan personellerin söz konusu işe başlama ve bitiş zamanları aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. (3) bölünemez iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (4) bölünebilir iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (5) biri bölünemez biri bölünebilir iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (6) numaralı kısıt işlere kaç personel atanacağını tanımlamak amacıyla modele eklenmiştir. (7) numaralı kısıt ile bölünebilir i işi için çalışacak personellerin çalışma oranları toplamı 1'e eşitlenmiştir. (8) numaralı kısıt ile bir personelin bölünebilir işe atanmasıyla çalışma oranı arasında ilişki kurulmuştur. (9) numaralı kısıt bölünebilir iş adımlarına atanacak personellerin çalışma yüzdelerinin 0 ile 1 arasında olduğunu ifade etmektedir. (10) numaralı kısıt her bir iş adımının tamamlanma süresinin 0'a eşit ya da 0'dan büyük olduğunu belirtmektedir. (11) numaralı kısıt ile her i ve k için y_{ik} değerinin 0 ya da 1 olacağını belirtmektedir.

Bu kapsamda, dijital ikizin uygulaması olarak bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımda, tanımlanan matematiksel model Python programlama dili kullanılarak PyCharm geliştirme ortamı ile çözülmüştür. PyCharm, Python programlama dili için geliştirilmiş bir geliştirme ortamı olduğundan, Python kodlarının yazımı, hata ayıklama, test etme, versiyon kontrolü gibi süreçleri kolaylaştırmaktadır.

Projenin matematiksel modelinin çözümü için, PuLP adlı Python tabanlı ücretsiz açık kaynaklı kütüphane kullanılmıştır. Bu kütüphane, optimizasyon problemlerini matematiksel modeller olarak tanımlamak ve çözmek için kullanılmaktadır. PuLP, çeşitli

harici LP çözücileri (örneğin CBC, GLPK, CPLEX, Gurobi) arasından seçim yaparak matematiksel modeli çözmek ve sonuçları görüntülemek için Python komutlarını kullanmaktadır. Bu kütüphane sadece lineer optimizasyon problemlerini desteklemektedir. Bu nedenle proje için oluşturulan matematiksel model, lineer optimizasyon problemleri için gerekli olan kriterler dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Projenin sonuçlarının görselleştirilmesi için Matplotlib kütüphanesi kullanılmıştır. Matplotlib, Python için temel bir kütüphanedir ve veri görselleştirme amacıyla kullanılmaktadır. Bu kütüphane ile 2 ve 3 boyutlu çizimler yapılarak grafikler, histogramlar, scatter plotlar gibi farklı türlerde verilerin görselleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede projenin sonuçları daha anlaşılır olmakta ve görsel olarak sunulabilmektedir.

Proje iş planlamasının gösterilmesi için Gantt Şeması oluşturulmuştur. Gantt Şeması, projede hangi işlerin ne zaman tamamlanacağını gösteren bir zaman çizelgesidir. Bu tez kapsamında, Matplotlib kütüphanesi kullanılarak bu şema oluşturulmuş ve proje işlerinin zaman çizelgesi atanan personel bilgisi ile görsel olarak sunulmuştur.

Tez kapsamında son kullanılan kütüphane olan Tkinter ile kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüz sayesinde kullanıcılar projenin sonuçlarını görebilmekte ve ayrıca proje için güncel veri girişlerini yaparak yeni sonuçlar elde edebilmektedir. Bu sayede projenin sonuçlarının anlaşılır bir şekilde sunulmasının yanı sıra, kullanıcının gereksinimlerine göre güncel sonuçlar elde edilebilmesi de sağlanarak dijital ikiz yaklaşımı uygulamaya geçirilmiştir. Böylelikle, projenin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve yönetilmesi mümkün hale gelmiştir.

Veri girişi yapılmış ve matematiksel modeli oluşturulmuş yazılım çalıştırıldığında, ilk olarak Şekil 4.2'de bulunan kullanıcı giriş ekranı açılmaktadır. Burada, proje kapsamındaki işler, her bir işin süresi, her bir işe atanabilecek personel ve ilgili personelin performansı gösterilmekte, varsayımlar kapsamlı bir şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4.2. Senaryo 1 Kullanıcı Giriş Ekranı

Örneğin, bu ekranda bir çalışanın aynı anda birden fazla iş adımına atanmasının önüne geçildiği, sadece 14. iş adımının bölünebildiği ve bunun için 3 personelin yetkin olduğu bilgisi performansla birlikte yer almaktadır. Kullanıcı bu ekranda "Çalıştır" butonuna basarak atamanın nasıl olacağı ve projenin kaç günde tamamlanacağı bilgisini almaktadır.

Kullanıcının "Çalıştır" butonuna basmasıyla birlikte, proje için geliştirilen matematiksel model Python tarafından otomatik olarak çalıştırılmaktadır. Şekil 4.3'te görüldüğü şekilde ekrana sonuçlar yansıdığı anda kullanıcı her bir işe atanan personeli ve projenin tamamlanacağı toplam süreyi görmektedir. Bunun yanı sıra, elde edilen sonuçları görselleştirmek için ekranın sağ alt köşesinde yer alan "Gantt Şeması" butonu da aktif hale gelir.

Programın çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tanımlanan personel kaynağının işlere en uygun şekilde atanmasıyla projenin en erken 132 günde tamamlanacağı bilgisi elde edilmiştir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

İşler	Süre (Gün)	Personel -> Performans	Personel Ataması
1	5	P1 -> 0.85, P2 -> 0.85	P2
2	15	P1 -> 0.85	P1
3	20	P1 -> 0.85, P2 -> 0.85, P3 -> 0.80, P5 -> 0.85	P1
4	25	P3 -> 0.90, P4 -> 0.95, P5 -> 0.85	P4
5	15	P5 -> 0.85	P5
6	20	P1 -> 0.85, P2 -> 0.85, P3 -> 0.80, P4 -> 0.80	P1
7	15	P3 -> 0.90, P4 -> 0.95	P4
8	15	P3 -> 0.90, P4 -> 0.95, P5 -> 0.85	P3
9	25	P4 -> 0.80	P4
10	10	P3 -> 0.90, P4 -> 0.95	P3
11	5	P5 -> 0.85	P5
12	15	P3 -> 0.90, P4 -> 0.95	P3
13	10	P4 -> 0.80, P5 -> 0.85	P5
14	20	P1 -> 0.85, P2 -> 0.85, P3 -> 0.80	P1, P2, P3
15	15	P1 -> 0.85	P1
Projenin Tamamlanacağı Toplam Süre			132

Varsayımlar

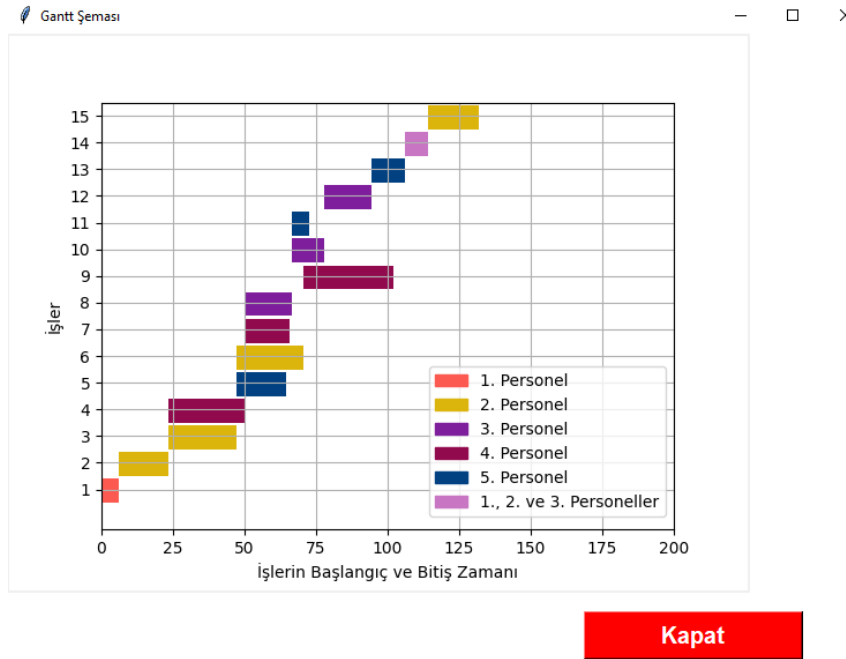
- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. iş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. işe 3 personel atanmaktadır.

Çalıştır Gantt Şeması

Çıkış

Şekil 4.3. Senaryo 1 Kullanıcı Sonuç Ekranı

Gantt Şeması ile personel atamaları ve iş adımlarının daha detaylı incelenmesi mümkündür. Kullanıcı, "Gantt Şeması" butonuna basarak sonuçların grafiksel olarak gösterildiği Şekil 4.4'te verilen ekranda, işlerin başlangıç ve bitiş zamanlarına, her bir işe atanan personele, işlerin öncüllük-ardıllık ilişkilerine ulaşmaktadır. Gantt Şeması incelendikten sonra aynı ekranda bulunan "Kapat" butonuna basılarak görselin olduğu ekrandan çıkılmakta ve Şekil 4.3'te yer alan ekrana tekrar ulaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Senaryo 1 Kullanıcı Ekranı Gantt Şeması

4.2. Senaryo 2

Senaryo 1 kapsamında, projenin belirlenen süre içerisinde tamamlanması için gerekli olan personel atamalarının optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Senaryo 2’de ise ilk olarak projenin beklenen tamamlanma süresi kullanıcıdan alınarak işlere personel atamaları yapılmaktadır. İkinci aşama olarak proje başladıktan sonra herhangi bir zamanda işlerin kalan süreleri verildiğinde işlere aynı personelin atanacağı varsayımıyla projenin kaç günde tamamlanacağı hesaplanmaktadır.

Senaryo 2 kapsamında iş adımları Senaryo 1’de olduğu gibi Çizelge 4.1’de tanımlandığı şekliyle kullanılmıştır. Senaryo 2 için, Çizelge 4.5’te 4 mevcut, 11 işe alım olacak şekilde toplam 15 personel tanımlanmıştır. Şirkette halihazırda çalışan %75 performansta 2 personel (P1, P2) ve %85 performansta 2 personel (P3, P4) bulunmaktadır. Projenin ihtiyaçlarına binaen %75 performans ile 5 kişi (P5, P6, P7, P8, P9), %85 performans ile 3 kişi (P10, P11, P12), %95 performans ile 2 kişi (P13, P14) ve %105 performansla 1 kişi (P15) olmak üzere toplamda 11 personel alınabilecektir. Personel performansları kişinin konuyla ilgili yetkinliğini belirtmekte olup, %105 performansta çalışan bir personelin beklenenden, diğer bir ifadeyle ortalamadan daha deneyimli olduğu varsayılmaktadır. İş paketlerine atanan personeller arasında iş dağılımı eşitliği olması açısından her bir personelin en fazla 5 iş adımına atanacağı ve bir personelin bir projede en fazla 50 gün çalışacağı modellenmiştir. 14. iş Senaryo 1’de olduğu gibi 3 kişi arasında bölünebilecektir.

Çizelge 4.5. Personeller, Performansları ve Durumları

Personel	Performans	Mevcut/Yeni
P1	%75	Mevcut
P2	%75	Mevcut
P3	%85	Mevcut
P4	%85	Mevcut
P5	%75	Yeni
P6	%75	Yeni
P7	%75	Yeni
P8	%75	Yeni
P9	%75	Yeni
P10	%85	Yeni
P11	%85	Yeni
P12	%85	Yeni
P13	%95	Yeni
P14	%95	Yeni
P15	%105	Yeni

Senaryo 2 kapsamında, projenin kullanıcı tarafından tanımlanan zamanda tamamlanması çözümüne yönelik olarak geliştirilen matematiksel model aşağıda sunulmaktadır. Bu model, projenin tanımlanan zamanda tamamlanması için en uygun personel atamalarının optimizasyonunu gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmıştır:

Parametreler

$m_l = l$ performansına sahip personel alımının oluşturacağı maliyet katsayısı

$C =$ her bir personelin projede çalışabileceği maksimum süre

$D =$ projenin tamamlanması gereken gün sayısı

$E =$ her bir personelin atanabileceği maksimum iş sayısı

$l =$ yeni personellerin sahip olması beklenen performans yüzdesi

Karar Değişkenleri

$y_k = k$ personelinin bir işe atanıp atanmadığını gösteren $\{0,1\}$ değişken

$y_n = n$ personelinin işe alınıp alınmadığını gösteren $\{0, 1\}$ değişken

$Y_l = l$ performansına sahip işe alınacak personel sayısı

$n_l = l$ performansına sahip işe alınabilecek maksimum personel sayısı

$$\text{Min } z = \sum_k (P_{ik} * 100) * y_k + \sum_l (l * 100) * Y_l * m_l$$

$$x_j \geq x_i + \sum_k (y_{jk} * \frac{D_j}{P_{jk}})$$

her i işi ve i 'nin BN kümesindeki her bitişik öncülü j için (1)

$$x_j \geq x_i + \frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}$$

her k personeli, i işi ve i 'nin B kümesindeki her bitişik öncülü j için (2)

$$x_j - \sum_k (y_{jk} * \frac{D_j}{P_{jk}}) \geq x_i - M * a_{ij1},$$

$$x_j \leq x_i - \sum_k (y_{ik} * \frac{D_i}{P_{ik}}) + M * a_{ij2},$$

$$a_{ij1} + a_{ij2} = a_{ij} + 1 \text{ ve}$$

$$y_{ik} + y_{jk} \leq 2 - a_{ij}$$

$i, j \in BN, j \in L_i$ ve her k için (3)

$$x_j - (\frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}) \geq x_i - M * a_{ij1},$$

$$x_j \leq x_i - (\frac{D_i}{P_{ik}} * O_{ik}) + M * a_{ij2},$$

$$a_{ij1} + a_{ij2} = a_{ij} + 1 \text{ ve}$$

$$y_{ik} + y_{jk} \leq 2 - a_{ij}$$

$i, j \in B, j \in L_i$ ve her k için (4)

$$x_j - (\frac{D_j}{P_{jk}} * O_{jk}) \geq x_i - M * a_{ij1},$$

$$x_j \leq x_i - \sum_k (y_{ik} * \frac{D_i}{P_{ik}}) + M * a_{ij2},$$

$$a_{ij1} + a_{ij2} = a_{ij} + 1 \text{ ve}$$

$$y_{ik} + y_{jk} \leq 2 - a_{ij}$$

$i \in BN, j \in B, j \in L_i$ ve her k için (5)

$$\sum_k y_{ik} = A, i \in B \text{ veya } BN \text{ (6)}$$

$$\sum_i y_{ik} \leq y_k * E, i \in B \text{ veya } BN \text{ ve her } k \text{ için (7)}$$

$$\sum_i y_{ik} * \frac{D_i}{P_{ik}} + \sum_j \frac{D_j}{P_{jk}} * K_{jk} + \leq C, i \in BN, j \in B \text{ ve her } k \text{ için (8)}$$

$$\sum_n y_n = Y_l, \text{ her } l \text{ için (9)}$$

$$\sum_k O_{ik} = 1, i \in B \text{ (10)}$$

$$y_{ik} \geq O_{ik}, i \in B \text{ ve her } k \text{ için (11)}$$

$$Y_l \leq n_l, \text{ her } l \text{ için (12)}$$

$$x_N \leq D \text{ (13)}$$

$$0 \leq O_{ik} \leq 1, i \in B \text{ ve her } k \text{ için (14)}$$

$$x_i \geq 0, i \in B \text{ veya } BN \text{ (15)}$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \text{ her } i \text{ ve } k \text{ için (16)}$$

Modelde amaç fonksiyonu projenin tamamlanma zamanı verildiğinde söz konusu zaman içerisinde projenin tamamlanabilmesi için personel maliyetlerinin minimize edilmesini amaçlamaktadır. Maliyet katsayısı olarak projeye atanma ihtimali olan 15 personelin her birinin çalışma performansı 100 ile çarpılarak maliyet katsayısı olarak kullanılmıştır. Örneğin 0.75 performans ile çalışan bir personelin maliyet katsayısı 75 iken 0.95 performans ile çalışan bir personelin maliyet katsayısı 95'tir. Belirtilen şekilde tanımlanmasının nedeni yüksek performansta çalışan, diğer bir ifadeyle deneyimi daha fazla olan kişinin çalıştığı kuruma maliyetinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, dışarıdan alınabilecek personelin ekstra maliyet

katsayıları da bulunmaktadır. Yeni personelin oluşturacağı ekstra maliyet katsayıları da deneyim/performans ile artmaktadır. Ekstra maliyet katsayıları personel alımı yapılacağı durumda harcanacak ekstra eforları içerdiği gibi aynı zamanda modelde mevcut personelin ilk olarak işlere atanmasını sağlayarak gereksiz personel alımının önüne geçmektedir.

(1) numaralı kısıt ardıllık-öncüllük ilişkisini kullanarak j işinin i işinden sonra geldiğini ve iş süresinin atanan personelin performansına göre hesaplandığını ifade ederek bölünemez bir iş olan j iş adımının tamamlanma süresini hesaplamaktadır. Bölünebilir işlerin tamamlanma zamanının farklı olarak hesaplanması nedeniyle tamamlanma zamanı ayrı olarak modellenmiştir. (2) numaralı kısıt ardıllık-öncüllük ilişkisini kullanarak j işinin i işinden sonra geldiğini ve iş süresinin atanan personelin performansına göre hesaplandığını ifade ederek bölünebilir bir iş olan j iş adımının tamamlanma süresini hesaplamaktadır. Kısıt, bölünebilir işlere atanan personellerin söz konusu işe başlama ve bitiş zamanları aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. (3) bölünemez iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (4) bölünebilir iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (5) biri bölünemez biri bölünebilir iki paralel işe aynı personelin atanmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. (6) numaralı kısıt işlere kaç personel atanacağını tanımlamak amacıyla modele eklenmiştir. (7) numaralı kısıt bir personelin en fazla E işe atanacağını tanımlamaktadır. Bu şekilde yüksek performansa sahip personelin daha fazla işe atanmasının önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. (8) ile bir personelin yapacağı iş C gün ile sınırlandırılmıştır. (9) ile her bir performansa yeni alınacak personel sayıları kısıtlanmıştır. Yeni personel seçimlerinin yapılmasının ardından personeller proje personel havuzuna dahil edilmektedir. Örneğin k , yeni personel olmadan 5 ise 2 yeni personel alınmasıyla 7 olacaktır. (10) numaralı kısıt ile bölünebilir i işi için çalışacak personellerin çalışma oranları toplamı 1'e eşitlenmiştir. (11) numaralı kısıt ile bir personelin bölünebilir işe atanmasıyla çalışma oranı arasında ilişki kurulmuştur. (12) ile performansları kapsamında yeni alınacak maksimum personel sayısı kısıtlanmıştır. Örneğin 0.75 performans ile en fazla 5 personel alınabilirken, 0.85 performans ile en fazla 3 personel alınabilir şeklinde kısıt eklenmiştir. (13) numaralı kısıt, projenin D günde tamamlanması gerektiği bilgisini modele eklemiştir. (14) numaralı kısıt bölünebilir iş adımlarına atanacak personellerin çalışma yüzdelerinin 0 ile 1 arasında olduğunu ifade etmektedir. (15) numaralı kısıt her

bir iş adımının tamamlanma süresinin 0'a eşit ya da 0'dan büyük olduğunu belirtmektedir. (16) numaralı kısıt ile her i ve k için y_{ik} değerinin 0 ya da 1 olacağını belirtmektedir.

Senaryo 2, projenin beklenen tamamlanma süresi kullanıcıdan alınarak yapılan personel atamaları için oluşturulan bir model olarak tanımlanmıştır. Bu senaryonun ikinci aşaması, projelerde sıkça karşılaşılan plan değişikliklerini göz önünde bulundurmaktadır. Bu nedenle, projenin gerçekleşeceği süre içerisinde iş paketlerine atanan sürelerin planlandığı gibi gitmemesi durumunda, güncel planın modele entegrasyonu gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, kullanıcıdan alınacak güncel/kalan iş adımı süreleri kullanılarak işlere aynı personelin atanacağı varsayımıyla projenin kaç günde tamamlanacağı yeniden hesaplanmaktadır. Bu şekilde, proje süresi içerisinde gerçekleşen değişiklikler modele dahil edilerek projenin kaç günde tamamlanacağı bilgisi elde edilmektedir.

Senaryo 2'nin çözümü için Senaryo 1 kapsamında detayları belirtilen aynı Python kütüphaneleri kullanılmıştır. Program çalıştırıldığında, kullanıcı Şekil 4.5'te gösterilen ekranda sunulan proje iş adımları, iş adımlarının süresi, varsayımlar ve personelle ilgili temel bilgileri görmektedir. Kullanıcı tarafından, projenin kaç günde tamamlanmasının beklendiği bilgisi girdi olarak bu ekranda girilmektedir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

Varsayımlar

- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. iş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. işe 3 personel atanmaktadır.

İşler	Süre (Gün)	Personeller	Mevcut/Yeni	Performans(%)
1	5	P1		
2	15	P2		
3	20	P3		
4	25	P4		
5	15	P5		
6	20	P6		
7	15	P7		
8	15	P8		
9	25	P9		
10	10	P10		
11	5	P11		
12	15	P12		
13	10	P13		
14	20	P14		
15	15	P15		

Proje kaç günde bitmeli?

Çalıştır

Çıkış

Şekil 4.5. Senaryo 2 Kullanıcı Bilgi Ekranı

Şekil 4.5'te yer alan ekranda görülebileceği üzere, varsayımlar olarak aynı personele aynı anda birden fazla iş atanmamakta ve 14. iş adımına 3 personel diğer iş adımlarına ise 1 personel atanmaktadır. Aynı ekran üzerinde işler ve süreleri ile ilgili bilgiler de kullanıcıya sunulmaktadır. Bunun yanında, personel performansı, mevcut veya yeni personel bilgileri ve projenin tamamlanması için gereken süre kullanıcıdan talep edilmektedir. Kavramsal model kapsamında tanımlanmış olan personel performanslarının değişebilir olma durumu uygulama da kullanıcının girdileri ile sağlanmıştır.

Proje kapsamında en fazla 15 personel çalışabilecektir. Çizelge 4.5'te tanımlandığı şekilde, mevcut %75 ve %85 performans ile 2'şer olmak üzere (sırasıyla P1, P2 ve P3, P4) toplamda 4 personel bulunmaktadır. Projede çalışması için %75 performans ile 5 kişi (P5, P6, P7, P8, P9), %85 performans ile 3 kişi (P10, P11, P12), %95 performans ile 2 kişi (P13, P14) ve %105 performansla 1 kişi (P15) olmak üzere toplamda 11 yeni personel alınabilecektir.

Projenin beklenen tamamlanma süresi göz önünde bulundurularak işe alım yapılması durumunda Senaryo 2'nin matematiksel modelinde de belirtildiği şekilde ekstra bir maliyet oluşmaktadır. Bu nedenle model ilk önce projede çalışabilecek mevcut personeli işlere atarken, gerekmesi durumunda yeni personel işe alınması konusunda da kullanıcıyı yönlendirecektir. Bu tez kapsamında, yeni personelin ekstra maliyet katsayıları %75 performans için 1.5, %85 için 2, %95 için 3 ve %105 için 4 olarak belirlenmiştir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

Varsayımlar

- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. iş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. işe 3 personel atanmaktadır.

İşler	Süre (Gün)	Personeller	Mevcut/Yeni	Performans(%)
1	5	P1	Mevcut	75
2	15	P2	Mevcut	75
3	20	P3	Mevcut	85
4	25	P4	Mevcut	85
5	15	P5	Yeni	75
6	20	P6	Yeni	75
7	15	P7	Yeni	75
8	15	P8	Yeni	75
9	25	P9	Yeni	75
10	10	P10	Yeni	85
11	5	P11	Yeni	85
12	15	P12	Yeni	85
13	10	P13	Yeni	95
14	20	P14	Yeni	95
15	15	P15	Yeni	105

Proje kaç günde bitmeli?

Çalıştır
Çıkış

Şekil 4.6. Senaryo 2 Kullanıcı Veri Girişi

Şekil 4.6'da bulunan uygulama görselinde görüldüğü şekilde projenin kaç günde bitmesi gerektiği bilgisi kullanıcı tarafından 180 gün olarak uygulamaya girilmiştir. Personelle ilgili bilgiler de kullanıcı tarafından modele tanımlanmıştır. Bilgilerin uygulamaya tanımlanmasının ardından sağ alt köşede bulunan Çalıştır butonuna basıldığında uygulama arka planda Python ile kodlanan matematiksel modeli çalıştırmaktadır. Uygulama, modelin çalıştırılmasını tamamladıktan sonra Şekil 4.7'de görüldüğü şekilde iş paketlerine atanacak personel bilgisini kullanıcıya sunmaktadır. Projenin 180 günde tamamlanması gerektiği durumda P1, P2, P3, P4, P6 ve P11 personelleri projeye atanmıştır. P1 ve P2 personelleri %75 performans ile çalışan mevcut personel, P3 ve P4 %85 performans ile çalışan mevcut personel, P6 %75 ve P11 %85 performansla çalışan yeni personeldir. %75 ve %85 performans ile yeni işe alım yapılabilecek aynı özelliklere sahip diğer personellerin de bulunmasına rağmen model P6 ve P11'i seçmiştir. Bu uygulama kapsamında performans ve yeni/mevcut personel kriterleri dışında ek seçim kriterine ihtiyaç duyulmadığı için model aynı kriterlere sahip personeller arasında rastgele seçim yapmaktadır. Ekstra kriterlere ihtiyaç olması durumunda modele eklenebilmektedir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

Varsayımlar

- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. İş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. İşe 3 personel atanmaktadır.

İşler	Süre (Gün)	Personel Ataması
1	5	P3
2	15	P1
3	20	P3
4	25	P2
5	15	P3
6	20	P4
7	15	P4
8	15	P11
9	25	P11
10	10	P1
11	5	P6
12	15	P6
13	10	P1
14	20	P2, P3, P4
15	15	P6

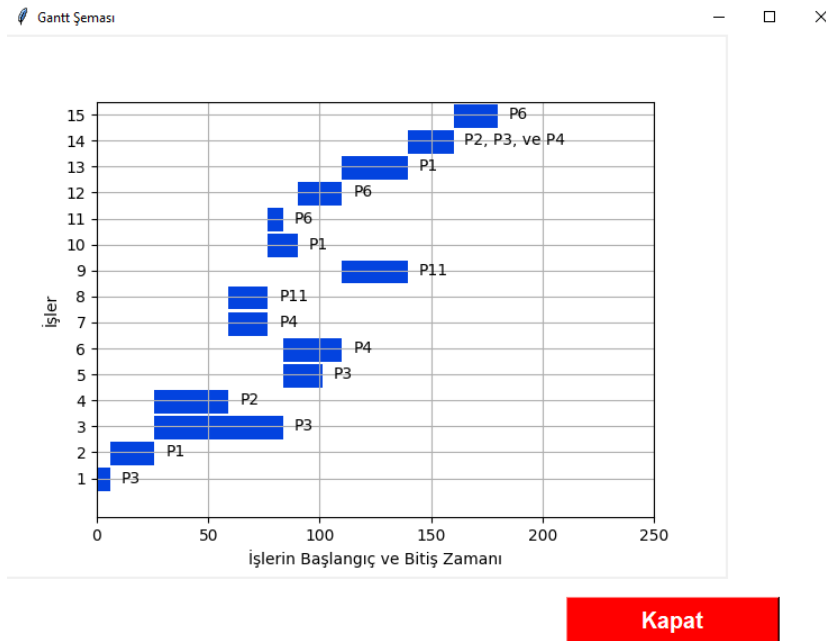
Personeller	Mevcut/Yeni	Performans(%)
P1	Mevcut	75
P2	Mevcut	75
P3	Mevcut	85
P4	Mevcut	85
P5	Yeni	75
P6	Yeni	75
P7	Yeni	75
P8	Yeni	75
P9	Yeni	75
P10	Yeni	85
P11	Yeni	85
P12	Yeni	85
P13	Yeni	95
P14	Yeni	95
P15	Yeni	105

Proje kaç günde bitmeli?

Çalıştır **Güncelle**
Gantt Şeması **Çıkış**

Şekil 4.7. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Personel Ataması

Personel atamaları, kullanıcıdan alınan bilgilerin analizi sonrasında model tarafından hesaplanmakta ve sonuçlar, Gantt Şeması üzerinde gösterilmektedir. Şekil 4.7’de de görüldüğü şekilde program çalıştırıldıktan sonra diyagramı açabilmek için ekranın alt kısmına Çalıştır Butonunun altına Gantt Şeması Butonu gelmiştir. Butona basılarak Şekil 4.8’de yer alan görselde de görüldüğü üzere Gantt Şeması açılmaktadır.



Şekil 4.8. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Gantt Şeması

Gantt Şeması üzerinde adımlarının başlangıç bitiş zamanları ve her bir iş adımına atanan personel bilgileri bulunmaktadır. Bu sayede işlerin paralellik ve çakışma durumları da kullanıcı tarafından daha detaylı incelenebilmektedir. Gantt Şeması incelendikten sonra Kapat butonuna basılarak diyagram kapatılarak ana ekrana geri dönülmektedir.

Ana ekranda görüldüğü gibi Çalıştır Butonunun sağ tarafına Güncelle Butonu gelmiştir. Güncelle Butonu planlanan iş adımı sürelerinin proje başladıktan sonra planlandığı gibi gitmeyeceği durumlar dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bu nedenle projenin herhangi bir anında güncelleme yapılarak model tekrar çalıştırılabilmektedir. Güncelle Butonuna basıldığında Şekil 4.9'da yer alan uygulama görselinde de görüldüğü gibi Güncel Süreler sütunu eklenerek kullanıcının güncel iş adımı sürelerini sisteme girmesi beklenir. Uygulama ekranı üzerinde Şekil 4.9'da görüldüğü şekilde mavi yazı ve butonlar projenin başlangıç aşamasındaki girdileri ve o girdiler üzerinde yapılacak işlemleri tanımlarken yeşil yazı ve butonlar proje başladıktan sonra yapılacak güncellemeleri ifade etmektedir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

Varsayımlar

- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. iş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. işe 3 personel atanmaktadır.

İşler	Süre (Gün)	Personel Ataması	Güncel Süreler
1	5	P3	5
2	15	P1	10
3	20	P3	10
4	25	P2	25
5	15	P3	15
6	20	P4	0
7	15	P4	15
8	15	P11	15
9	25	P11	25
10	10	P1	10
11	5	P6	5
12	15	P6	15
13	10	P1	10
14	20	P2, P3, P4	20
15	15	P6	15

Personeller	Mevcut/Yeni	Performans(%)
P1	Mevcut	75
P2	Mevcut	75
P3	Mevcut	85
P4	Mevcut	85
P5	Yeni	75
P6	Yeni	75
P7	Yeni	75
P8	Yeni	75
P9	Yeni	75
P10	Yeni	85
P11	Yeni	85
P12	Yeni	85
P13	Yeni	95
P14	Yeni	95
P15	Yeni	105

Proje kaç günde bitmeli?

Çalıştır Güncelle
Gantt Şeması Çıkış

Şekil 4.9. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Süre Güncelleme

Projede güncelleme yapılırken personelin en baştan atanmaması ve proje bütünlüğünün bozulmaması için proje planlama aşamasında her bir iş adımına atanan personel sabit tutularak güncel iş adımı tamamlanma süreleri dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda Şekil

4.9’da da görüldüğü üzere açılan ekranda Güncel Süreler alanı doldurularak Güncelle Butonuna basılmaktadır. Bu şekilde güncel proje tamamlanma süresi hesaplanmaktadır.

Güncelle Butonuna basılmasıyla birlikte program arka tarafta matematiksel modeli çalıştırarak kullanıcıya güncel süreler dahilinde projenin kaç günde tamamlanacağı bilgisini vermektedir. Bu kapsamda, yeni bilgiler ışığında projenin kaç günde tamamlanacağı bilgisi hesaplanacağı için kullanılan matematiksel model Senaryo 1’de tanımlanan matematiksel model ile aynıdır. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında yeni bir model tanımlaması yapılmamıştır. Model, güncel tamamlanma süresini hesapladığında Gantt Şemasını da güncelleyerek Gantt Şeması Butonunu yeşil renge dönüştürmektedir.

Proje Planlama ve Güncelleme

Projedeki işler, işlerin standart süreleri, her bir işe atanabilecek personel ve personellerin performans bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Projenin en kısa zamanda tamamlanması için işlere atanabilecek personellerin belirlenmesi için 'ÇALIŞTIR' butonuna basınız.

Varsayımlar

- * Aynı personel aynı anda birden fazla işe atanamaz.
- * 14. iş hariç her işe 1 personel atanmaktadır.
- * 14. işe 3 personel atanmaktadır.

İşler	Süre (Gün)	Personel Ataması	Güncel Süreler	Personel Ataması
1	5	P3	5	P3
2	15	P1	10	P1
3	20	P3	10	P3
4	25	P2	25	P2
5	15	P3	15	P3
6	20	P4	0	P4
7	15	P4	15	P4
8	15	P11	15	P11
9	25	P11	25	P11
10	10	P1	10	P1
11	5	P6	5	P6
12	15	P6	15	P6
13	10	P1	10	P1
14	20	P2, P3, P4	20	P2, P3, P4
15	15	P6	15	P6

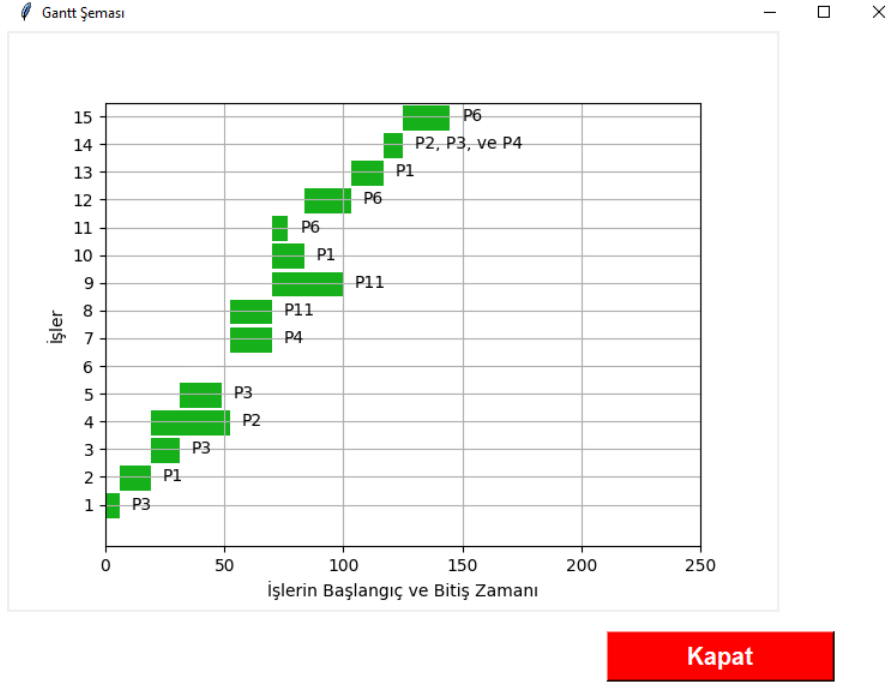
Personeller	Mevcut/Yeni	Performans(%)
P1	Mevcut	75
P2	Mevcut	75
P3	Mevcut	85
P4	Mevcut	85
P5	Yeni	75
P6	Yeni	75
P7	Yeni	75
P8	Yeni	75
P9	Yeni	75
P10	Yeni	85
P11	Yeni	85
P12	Yeni	85
P13	Yeni	95
P14	Yeni	95
P15	Yeni	105

Proje kaç günde bitmeli? 180 Toplam Süre 145

Çalıştır Güncelle
Gantt Şeması Çıkış

Şekil 4.10. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Güncel Personel Ataması

Projenin planlama aşamasında 180 günde tamamlanması gerektiği sisteme tanımlanmış; model de bu kapsamda maliyeti minimize ederek her bir işe atanması gereken personeli belirlemiştir. Personeller sabit tutularak iş adımı 2, 15 günken 10 gün; iş adımı 3, 20 günken 10 gün; iş adımı 6, 20 günken 0 gün olarak güncellenerek model çalıştırılmıştır. Şekil 4.10’da da görüldüğü üzere ekran üzerinde kullanıcıya yeni süreler ve mevcut personellerle projenin 145 günde tamamlanacağı bilgisi verilmektedir.



Şekil 4.11. Senaryo 2 Kullanıcı Ekranı Güncel Gantt Şeması

Şekil 4.10’da görülen yeşil Gantt Şeması Butonuna basılarak Şekil 4.11’de bulunan güncel proje diyagramı görüntülenmektedir. Projenin 141 günde tamamlanacağı, her bir adımının ne zaman başlayıp biteceği, güncellenen iş adımlarının projeyi nasıl etkileyeceği ve iş adımlarına atanan personeller Gantt Şeması üzerinde incelenebilmektedir.

İncelemenin tamamlanmasının ardından Şekil 4.11’de sağ alt köşede yer alan Kapat Butonuna basılarak Gantt Şeması kapatılır ve ana ekrana dönlür. Kullanıcı ana ekran üzerinde sağ alt köşede yer alan ve kırmızı renkte bulunan Çıkış Butonuna basarak programdan çıkış yapar. Kullanıcının birden fazla kez güncelleme çalışması yapmak istemesi durumunda ana ekran üzerinde yer alan Güncel Süreler başlıklı sütundaki değerleri değiştirmesi ve programı yeniden çalıştırması yeterlidir. Aynı şekilde personelle ilgili bilgilerde de güncelleme ihtiyacı oluşması durumunda ekran üzerinde söz konusu güncellemelerin yapılmasının ardından programın yeniden çalıştırması yeterlidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçek zamanlı veri akışı sonucunda yapılan analizlerle elde edilen sonuçların kullanılması ve iki yönlü kurulan geri bildirim mekanizması ile oluşturulan dijital ikiz yaklaşımları, bu tez çalışması ile bir proje planlama süreci üzerinde uygulanmıştır. Dijital ikiz teknolojisinin genellikle fiziksel nesnelere üzerinde uygulanıyor olması ve literatürde tez kapsamında önerilen modellere benzer bir uygulamaya rastlanmaması, bu çalışmayı önemli kılan nedenler arasında bulunmaktadır ve çalışmanın bundan sonraki uygulamalara öncülük etmesi beklenmektedir.

Tez kapsamında bir kavramsal model önerilmiştir. Model, dijital ikizler için önemli olan verilerin hazırlanması sürecinden başlayarak, proje planının projenin yaşam döngüsü içerisinde güncelliğini koruması da dahil olmak üzere, tüm süreci kapsamaktadır. Kavramsal model kapsamında geliştirilen matematiksel model ile personelin iş adımlarına atanması gerçekleştirilmektedir. İş adımlarında çalışıldıkça ortaya çıkan gerçek zamanlı performans değerleri ile proje planının güncellenmesi sağlanmaktadır. Bununla birlikte, projenin tamamlanması beklenen süre kısıtı matematiksel modele tanımlandığında, iş adımlarına uygun personeller atanarak, gerekmesi durumunda yeni personel alımı önerilmektedir. Dijital ikiz yaklaşımıyla önerilen kavramsal modelin proje planlamalarında kullanılmasıyla proje planlama süreçlerinde verimliliğin artabileceği, personel kullanımının optimize edilebileceği ve proje teslim süresi ile ilgili oluşabilecek problemlerin önceden tespit edilip önlenilebileceği öngörülmektedir.

Önerilen kavramsal model kullanılarak, tanımlanan iki senaryo için matematiksel model tabanlı çözümler üretilmiştir. Senaryo 1'de proje tamamlanma süresinin minimize edilmesi amacıyla işlerin tanımlı personele atamaları yapılmıştır. Senaryo 2'de, proje tamamlanma süresi kullanıcı tarafından verildiğinde personel atamalarının gerçekleştirilmesi ve iş adımları için tanımlanan sürenin değişmesi durumunda modelin güncellenerek yeniden çalıştırılması üzerinde durulmuştur.

Tez çalışmasında incelenen senaryolar kapsamında; gerçek zamanlı bir veri akışının olmaması, verilerin kullanıcı tarafından sisteme tanımlanması ve güncelleme yapılmak istendiğinde kullanıcının verileri manuel olarak güncellemesi gibi nedenlerden dolayı oluşturulan sistemin daha ileri seviyelere taşınmasına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, dijital

ikiz yaklaşımı ile proje planlama uygulamalarının verimliliğini arttırmak ve gerçek zamanlı veri analizlerine dayalı kararlar almak için otomatik veri akışının sağlanması gerekmektedir. Ayrıca, veri yönetimi araçları ile verilerin sistemde doğru, güncel ve çalışmaya uygun şekilde saklanması ve işlenmesi sağlanmalıdır.

Bu tez çalışması yürütülürken uygun bir veri kümesinin olmaması nedeniyle, veri kısıtlı olarak seçilerek kavramsal modelin sadece küçük bir kısmı incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, daha büyük ve gerçek zamanlı veri kümeleri üzerinde kavramsal modelin detaylı bir şekilde incelenmesi ve uygulanması, proje planlama süreçlerinde dijital ikiz teknolojisi kullanımının gerçek etkilerini ortaya koyacaktır. Verilerin elde edilmesi amacıyla gerçek zamanlı personel çalışmalarını ve proje zamanını takip eden Jira gibi çevrimiçi araçların kullanılması faydalı olacaktır.

Tez çalışmasında önerilen kavramsal model kapsamında sadece personel ve iş adımı verileri kullanılmıştır. Ancak, proje planlamasının daha gerçekçi ve kapsamlı sonuçlar vermesi yönünde ilerideki çalışmalarda aşağıdaki süreçlerin de dikkate alınması ve model içerisine dahil edilmesi önerilmektedir:

- Alt yüklenici seçimi, planlaması ve takibinin yapılması
- Projelerde kullanılacak malzeme ve donanım planlamasının yapılması ve kritik stoklarda gerekli satın alım faaliyetlerinin otomatik olarak gerçekleştirilmesi
- Planlama ile ilgili raporlamaların oluşturulması ve üst yönetim ile otomatik olarak paylaşılması

Sonuç olarak, bu tez çalışması ve ileride geliştirilmesi planlanan ek proje planlama süreçleri çerçevesinde insan müdahalesinin minimuma indirilmesi ile hataların azaltılması, maliyetlerin minimize edilmesi, zaman tasarrufu sağlanması ve verimliliğin artırılması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. C. Testik ve O. Sarikulak, “Change points of real GDP per capita time series corresponding to the periods of industrial revolutions”, *Technol. Forecast. Soc. Change*, c. 170, 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120911.
- [2] M. Atalay, U. Murat, B. Oksuz, A. M. Parlaktuna, E. Pisirir, ve M. C. Testik, “Digital Twins in Manufacturing: Systematic Literature Review For Physical-Digital Layer Categorization and Future Research Directions”, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, ss. 1–27, 2022.
- [3] M. Glatt, C. Sinnwell, L. Yi, S. Donohoe, B. Ravani, ve J. C. Aurich, “Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation”, *J. Manuf. Syst.*, c. 58, sayı April 2020, ss. 231–245, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.015.
- [4] Y. Pan ve L. Zhang, “A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management”, *Autom. Constr.*, c. 124, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103564.
- [5] P. P. Oliveira, “Digital twin development for airport management”, *J. Airpt. Manag.*, c. 14, sayı 3, 2020.
- [6] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, ve M. Dassisti, *Digital twin paradigm: A systematic literature review*, c. 130. 2021. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [7] J. Autiosalo, R. Ala-Laurinaho, J. Mattila, M. Valtonen, V. Peltoranta, ve K. Tammi, “Towards integrated digital twins for industrial products: Case study on an overhead crane”, *Appl. Sci.*, c. 11, sayı 2, 2021, doi: 10.3390/app11020683.
- [8] R. L. Dillon, M. E. Paté-Cornell, ve S. D. Guikema, “Programmatic risk analysis for critical engineering systems under tight resource constraints”, *Oper. Res.*, c. 51, sayı 3, 2003, doi: 10.1287/opre.51.3.354.14961.
- [9] S. Yükçü ve Ö. Aydın, “Maliyet Düşürme Yöntemi Olarak Dijital İkiz”, *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*. 2020. doi: 10.31460/mbdd.694571.
- [10] R. Pellerin ve N. Perrier, “A Review of Methods, Techniques and Tools for Project Planning and Control”, *International Journal of Production Research*, c. 57, sayı 7. ss. 2160–2178, 2019. doi: 10.1080/00207543.2018.1524168.
- [11] A. Aksoy, M. Akansel, C. Atalay, A. M. Çamlıbel, D. Yaşar, D. Keseroğlu, ve S. Vanlioğlu, “Proje Yönetiminde Zaman ve Maliyet Odaklı Bütünleşik Planlama

- Yaklaşımı ve Bir Uygulama”, c. 8, sayı 1, ss. 1–20, 2019.
- [12] S. Atin ve R. Lubis, “Implementation of Critical Path Method in Project Planning and Scheduling”, içinde *Materials Science and Engineering PAPER*, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/662/2/022031.
- [13] O. Bodunwa ve J. Olalekan, “Application of Critical Path Method (CPM) and Project Evaluation Review Techniques (PERT) in Project Planning and Scheduling”, *Journal of Mathematics and Statistical Science*, c. 6. ss. 1–8, 2020.
- [14] Z. T. Kosztyán, “Challenges of The Project Planning Methods in The 21st Century”, *J. Pediatr.*, c. 5, ss. 46–60, 2012, [Çevrimiçi]. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpeds.2014.03.008>
- [15] M. Hasan, M. Lu, ve C. Ritcey, “Simulation-Based Approach to Systematic Project Planning and Scheduling at A Bridge Girder Fabrication Shop”, içinde *2019 Winter Simulation Conference*, 2019, ss. 3019–3030.
- [16] O. Zwikael ve A. Gilchrist, “Planning to Fail: When Is Project Planning Counterproductive”, *IEEE Trans. Eng. Manag.*, c. 70, ss. 220–231, 2021, doi: 10.1109/TEM.2021.3053585.
- [17] G. M. Campbell ve M. Diaby, “Development and Evaluation of an Assignment Heuristic for Allocating Cross-Trained Workers”, *Eur. J. Oper. Res.*, c. 138, sayı 1, ss. 9–20, 2002, doi: 10.1016/S0377-2217(01)00107-2.
- [18] S.-Y. Lin, S.-J. Horng, T.-W. Kao, C.-S. Fahn, D.-K. Huang, R.-S. Run, Y.-R. Wang, ve I.-H. Kuo, “Solving the Bi-Objective Personnel Assignment Problem Using Particle Swarm Optimization”, *Appl. Soft Comput.*, ss. 2840–2845, 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2012.03.031.
- [19] C. Valouxis ve E. Housos, “Hybrid Optimization Techniques for the Workshift and Rest Assignment of Nursing Personnel”, ss. 155–175, 2000, doi: 10.1016/S0933-3657(00)00062-2.
- [20] V. Fernandez-Viagas ve J. M. Framinan, “Integrated Project Scheduling and Staff Assignment with Controllable Processing Times”, *Sci. World J.*, 2014.
- [21] M. C. Wu ve S. H. Sun, “A project scheduling and staff assignment model considering learning effect”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 28, sayı 11–12. ss. 1190–1195, 2006. doi: 10.1007/s00170-004-2465-0.
- [22] R. Chen, C. Liang, D. Gu, ve J. Y.-T. Leung, “A Multi-Objective Model for Multi-Project Scheduling and Multi-Skilled Staff Assignment for IT Product

- Development Considering Competency Evolution”, *Int. J. of Production Res.*, c. 55, sayı 21, ss. 6207–6234, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1326641.
- [23] W. J. Gutjahr ve P. Reiter, “Bi-objective Project Portfolio Selection and Staff Assignment Under Uncertainty”, *Optimization*, c. 59, sayı 3, ss. 417–445, 2010, doi: 10.1080/02331931003700699.
- [24] W. J. Gutjahr, S. Katzensteiner, P. Reiter, C. Stummer, ve M. Denk, “Competence-Driven Project Portfolio Selection, Scheduling and Staff Assignment”, *Competence-Driven Proj. Portf. Sel. Sched. Staff Assign.*, c. 16, ss. 281–306, 2008, doi: 10.1007/s10100-008-0057-z.
- [25] M. Grieves ve J. Vickers, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems”. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [26] E. H. Glaessgen ve D. S. Stargel, “The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles”. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, 2012. doi: 10.2514/6.2012-1818.
- [27] T. Deng, K. Zhang, ve Z. J. (Max) Shen, “A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities”, *J. Manag. Sci. Eng.*, c. 6, sayı 2, ss. 125–134, 2021, doi: 10.1016/j.jmse.2021.03.003.
- [28] S. Göçen, “Açık ve uzaktan öğrenmede dijital ikiz teknolojisinin kullanımına ilişkin bir değerlendirme”, *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*. ss. 155–173, 2020.
- [29] A. Özen ve F. N. Gürel, “Kamu Denetiminde Dijital Dönüşüm: Dijital İkiz Yöntemi”, *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, c. 2, sayı 1. ss. 16–23, 2020.
- [30] J. Lee, M. Azamfar, ve B. Bagheri, “A unified digital twin framework for shop floor design in industry 4.0 manufacturing systems”, *Manuf. Lett.*, c. 27, sayı February, ss. 87–91, 2021, doi: 10.1016/j.mfglet.2021.01.005.
- [31] M. Çalış Duman, “İşletmeler İçin Yeni Bir Verimlilik Teknolojisi: Dijital İkiz”. *Journal of Productivity*, 2021. doi: 10.51551/verimlilik.981349.
- [32] M. Mashaly, “Connecting the twins: A review on digital twin technology & its networking requirements”, *Procedia Comput. Sci.*, c. 184, ss. 299–305, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.03.039.
- [33] Y. Jiang, M. Li, M. Li, X. Liu, R. Y. Zhong, W. Pan, ve G. Q. Huang, “Digital twin-enabled real-time synchronization for planning, scheduling, and execution in

precast on-site assembly”. Elsevier B.V., 2022. doi:
10.1016/j.autcon.2022.104397.

- [34] Z. T. Taner ve Z. Ö. Parlak Biçer, “Industry 4.0 Impact on Project Management Factors”, içinde *6th International Project and Construction Management Conference*, 2020.