

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFRİYAT İŞLERİ İÇİN EN UYGUN İŞ MAKİNESİ
KOMBİNASYONUNUN OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper ÇIRAK

İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR

Mayıs 2023

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAFRİYAT İŞLERİ İÇİN EN UYGUN İŞ MAKİNESİ
KOMBİNASYONUNUN OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alper ÇIRAK
(36193621045)**

İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR

Mayıs 2023

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve yardımlarıyla beni her konuda yönlendiren ve desteklerini esirgemeyen, hem tez çalışmam hem de akademik hayatımda yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR'e,

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca bana ders veren, bilgilerini benimle paylaşan ve bugünlere gelmeme vesile olan İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümündeki tüm hocalarıma, idari personele ve karşılaştığım tüm zorluklarda yanımda olan ve yardımcı olan tüm yüksek lisans arkadaşlarıma,

Bugünlere gelmemdeki en büyük etken olan, tüm hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen, beni büyütüp bugünlere getiren değerli ailemin tüm fertlerine saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Hafriyat İşleri İçin En Uygun İş Makinesi Kombinasyonunun Oluşturulması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Alper ÇIRAK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1.GİRİŞ	1
1.1 Bilgi Teknolojileri Uygulamaları.....	1
1.2. Hafriyat ve İş Makineleri	11
1.3. Konum Belirleme Sistemleri	24
1.4. İnşaat Simülasyonu	26
1.5. Akıllı Ev Sistemleri.....	35
2.YÖNTEM	41
2.1. GPS Ölçüm Cihazı ve Hafriyat Güzergâhı Ölçümü	42
2.2. İş Makineleri Teknik Verilerinin Tanımlanması	46
2.3. Ölçüm Verilerinin Açık ve Kesitlere Çevrilmesi	48
2.4. Hafriyat Güzergâhının Analizi ile Maksimum Hız Limitlerinin Belirlenmesi.....	51
2.5. Kamyon Kuvvet Analizi ve Geometrik Model ile Hızın Belirlenmesi	53
2.6. Saatlik Kazı Miktarı ve Süresini Belirleme	59
2.7. Ekskavatör ve Kamyonların Maliyet Hesaplaması.....	62
2.8. Kamyon Damper hacmine bağımlı maliyet, süre ve yakıt analizi	66
2.9. En Düşük Maliyet Analizi ve İş makinelerinin kombinasyonunun gerçekleştirilmesi	69
3.VAKA ANALİZLERİ.....	73
4.TARTIŞMA VE SONUÇ	87
KAYNAKÇA.....	90
ÖZGEÇMİŞ	96

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Konum ölçümlerinin bir kesiti.....	45
Tablo 2. Hafriyat güzergâhı ölçüm noktalarının mesafe kesiti	46
Tablo 3. Ekskavatör Modelleri ve Bilgileri.....	47
Tablo 4. Kamyon Modelleri ve Bilgileri.....	48
Tablo 5. Hidrolik backhoe kazıcılar için saatlik standart çevrim sayısı tablosu	60
Tablo 6. Hidrolik kazıcılar için salınım-derinlik faktör tablosu.....	60
Tablo 7. Kazıcı ve Yükleyiciler için Kova Dolum Faktörleri	60
Tablo 8. Makine kullanımının iş verim faktörleri tablosu	60
Tablo 9. Birim Fiyat Listesi	65
Tablo 10. 330GC ve Arocs 2032 K İş Makinesi Kombinasyonu Verileri.....	74
Tablo 11. 349 ve Arocs 4851 K İş Makinesi Kombinasyonu Verileri	74
Tablo 12. İş makinesi kombinasyonlarının minimum toplam birim maliyet değerleri	76
Tablo 13. İş makinesi kombinasyonlarının maksimum toplam birim maliyet değerleri ...	77
Tablo 14. İş makinesi kombinasyonlarının minimum harcanan birim yakıt değerleri	78
Tablo 15. İş makinesi kombinasyonlarının maksimum harcanan birim yakıt değerleri....	79
Tablo 16. İş makinesi kombinasyonlarının saatlik maksimum taşınan kapasite değerleri .	80
Tablo 17. İş makinesi kombinasyonlarının saatlik minimum taşınan kapasite değerleri ...	82
Tablo 18. İş makinesi kombinasyonlarının ortalama değerleri	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.a. GPS Ölçüm Sistemi	Şekil 1.b. GPS Ölçüm Sistemi	Şekil 1.c. GPS Ölçüm Sistemi	43
Şekil 2. WGS84 Geometrisi (Coordinate Transformations, Dr. John Stryjewski)			44
Şekil 3. Hafriyat güzergâhının yatay grafiği			50
Şekil 4. Hafriyat güzergâhının düşey grafiği			50
Şekil 5. Her noktaya ait mesafe ve hız kontrolü akış şeması			52
Şekil 6. İvme Hesabı Akış Şeması			56
Şekil 7. Bekleme süresi ve İş makinesi kombinasyonu Akış Şeması			70
Şekil 8. Hafriyat güzergahı			73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

KA	:	Kamyon Ağırlığı
KU	:	Kasa Uzunluğu
KY	:	Kasa Yüksekliği
KH	:	Kasa Hacmi
KBA	:	Kamyon Boş Ağırlığı
KDA	:	Kamyon Dolu Ağırlığı
MRF	:	Mazot Rayiç Fiyatı
DYYS	:	Dizel Yakıt Yağ Sabiti
YGS	:	Yağ Gideri Sabiti
FRF	:	Formen Rayiç Fiyatı
ORF	:	Operatör Rayiç Fiyatı
YRF	:	Yağcı Rayiç Fiyatı
Tsk	:	Tekerlek Sürtünme Katsayısı
KG	:	Kasa Genişliği
TMH	:	Taşımlabilecek Maksimum Hafriyat Miktarı
KSM	:	Kamyon Saatlik Maliyet
KTS	:	Kamyon Tur Sayısı
HY	:	Tek turda Harcanan Yakıt
SHY	:	Saatlik Harcanan Yakıt
TSM	:	Toplam Sabit Maliyet
TİM	:	Toplam İşletme Maliyeti
KSTK	:	Kamyon Saatlik Taşıma Kapasitesi
GTS	:	Güncel Tur Süresi
GBS	:	Güncel Bekleme Süresi
TBM	:	Toplam Birim Maliyet
BKM	:	Birim Kazı Maliyeti
BTM	:	Birim Taşıma Maliyeti
GKS	:	Gereken Kamyon Sayısı
İTS	:	İşin Tamamlanma Süresi
GÇS	:	Günlük Çalışma Süresi
KM	:	Kritik Mesafe
V_m	:	Mevcut Hız
V_e	:	Emniyetli Hız
F_d	:	Direnç Kuvveti
F_i	:	İvme Kuvveti
F_n	:	Net Kuvvet
DK	:	Direnç Katsayısı
ESKM	:	Ekskavatör Saatlik Kazı Miktarı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAFRİYAT İŞLERİ İÇİN EN UYGUN İŞ MAKİNESİ KOMBİNASYONUNUN OLUŞTURULMASI

Alper ÇIRAK

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı

96+viii sayfa

2023

Danışman: Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR

Hafriyat ve toprak işleri özellikle yol ve baraj inşaatları ile açık madenler gibi işletmelerde uygulanan çok büyük hacimli işlerden biridir. Hafriyat ve toprak işlerinde kullanılan iş makineleri yükleniciler için yüksek maliyetli harcama kalemlerinden biridir. İş planlaması sürecinde hedeflenen proje maliyeti ve süresini gerçekleştirmek için kullanılacak ekipman ve kamyon filosu seçimi büyük önem arz etmektedir. Seçim kriterleri olarak iş makinelerinin birim işi en düşük maliyetle yapması ve sözleşmede taahhüt edilen sürede işin tamamlanması yer almaktadır. Fakat işin başlamasından önce yoğun tasarım ve metraj hesaplamalarına ağırlık verilmesi nedeniyle toprak işleri genellikle en uygun iş makinesi yerine en kolay temin edilebilen iş makineleri ile gerçekleştirilmektedir.

Tez çalışmasında gerçek bir hafriyat güzergâhının gerçek zamanlı gözlemi ve ölçümü gerçekleştirilmiş olup hafriyat güzergâhı üzerinde çeşitli ekskavatör ve kamyon modellerinin kapasite, motor gücü ile diğer teknik ve mekanik özellikleri modellenerek iş makinelerinin birim süredeki üretim miktarları ile maliyetlerini hesaplayıp en uygun iş makinesi kombinasyonunu belirleyen bir hafriyat çerçeve sistemi geliştirilmiştir. Ölçümü gerçekleştirilen hafriyat güzergâhı üzerinde sistemde bulunan her kamyon modeli simüle edilerek yol yapısı ve koşullarına göre her ölçüm noktasında kamyonların oluşturduğu hız ve emniyetli geçişi sağlayacak olan kritik mesafe değerleri hesaplanıp analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen hesaplamalar ile birlikte kamyonların her ölçüm noktasına göre motor gücü kontrolü, toplam gidiş - dönüş süreleri ve tur başına harcadığı yakıt miktarı belirlenmiştir. Taşıma işlemini gerçekleştiren kamyonların damper uzunluklarına göre optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve bu sayede en düşük maliyet ile en çok iş verimini sağlayacak olan kamyon modeli ve damper uzunluğu olasılığı belirlenmiştir. Ayrıca iş makineleri kombinasyonlarının oluşturduğu boşta kalma süre olasılıkları belirlenerek gerçekleştirilen hafriyat çerçeve sistemi ile birlikte en yüksek iş verimini en kısa süre ve en düşük maliyette sağlayan iş makinesi kombinasyonları bekleme süresi, saatlik taşınan kapasite, harcanan birim yakıt ve toplam birim maliyet parametreleri analiz edilerek belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında oluşturulan algoritma sistematik biçimde Excel Makro aracılığıyla kodlanarak toprak işi yapan yüklenicilerin kullanabileceği ve kolaylıkla anlayabileceği şekilde geliştirilmiştir. Bu sayede tez çalışmasının teorik katkısının yanı sıra uygulamaya yönelik katkısı da olacaktır.

Anahtar Kelimeler: İnşaat Makineleri, Toprak İşleri, Optimizasyon

ABSTRACT

Master Thesis

CONSTITUTION OF OPTIMUM CONSTRUCTION MACHINE COMBINATION FOR EARTHWORKS

Alper ırak

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences Department of Civil Engineering

96+viii page

2023

Supervisor: Do. Dr. nder Halis Bettemir

Excavation and earthworks are very large-volume works applied in enterprises such as road and dam constructions and open mines. Construction machinery used in excavation and earthworks is one of the high-cost expenditure items for contractors. The selection of equipment and truck fleet to be used to realize the targeted project cost and duration in the business planning process is of great importance. The selection criteria include the construction equipment to perform the unit work at the lowest cost and the completion of the work within the time promised in the contract. However, due to the heavy design and quantity calculations before the start of the work, earthworks are generally carried out with the most easily available machines instead of the most suitable ones.

In the thesis study, real-time observation and measurement of a real excavation route have been carried out, and an excavation frame system has been developed that calculates the production quantities and costs of construction machines per unit of time by modeling the capacity, engine power, and other technical and mechanical properties of various excavator and truck models on the excavation route. By simulating each truck model in the system on the excavation route, which was measured, the speed of the trucks at each measurement point and the critical distance values that will ensure safe passage was calculated and analyzed according to the road structure and conditions. With the calculations carried out, the engine power control of the trucks according to each measurement point, the total round-trip time, and the amount of fuel consumed per tour was determined. In addition, together with the excavation frame system realized by determining the idle time probabilities created by the combinations of construction equipment, the combinations of construction equipment that provide the highest work efficiency in the shortest time and at the lowest cost were determined by analyzing the parameters of waiting time, hourly transported capacity, spent unit fuel and total unit cost.

The algorithm created within the scope of the thesis study was systematically coded through Excel Macro and developed in a way that earth workers can use and easily understand. In this way, besides the theoretical contribution of the thesis study, it will also contribute to the practical application.

Keywords: Construction Machine, Earthwork, Optimization

1.GİRİŞ

İnşaat sektörü son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanların artan yoğun taleplerine daha etkin biçimde cevap verebilmek için yeniliklere daha açık hale gelmiştir. İnsanların konfor, güvenlik, estetik, hız ve üretkenlik beklentilerini karşılamak için teknoloji ile inşaat alanları işbirliği içerisinde çalışmaktadır. Dünya çapında inşaat sektöründe yaşanan ekonomik ve teknolojik atılımlar sonrası artan rekabet, ihtiyaçlar ve maliyetler sonrası inşaat firmalarının kendisi için en doğru stratejiyi, ekipmanları, personeli ve çalışma ortamını belirlemesi elzemdir.

Son yıllarda inşaat sektöründe yapılan işlerin verimini arttırmak için işlerin gerçek zamanlı takibini ve analizini gerçekleştiren böylece projenin toplam süresini ve maliyetini azaltmayı sağlayan birçok teknolojik yenilik mevcuttur. İnşaat sektöründe en çok ismi duyulan ve gelişime açık şekilde tüm dünyada yayılmaya devam eden en önemli yeniliklerden bir tanesi bilgi teknolojileri uygulamalarıdır.

1.1 Bilgi Teknolojileri Uygulamaları

Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) (*Building Information Model (BIM)*), bir yapının tasarım, inşaat, işletme ve bakım sürecinin performansını ve üretkenliğini artırmak için kullanılabilen bir veri modelidir. YBM, üç boyutlu, gerçek zamanlı, dinamik bilgi modelleme yoluyla proje ekiplerinin işbirliği sayesinde yaşam döngüsü boyunca bina verilerini üretir ve yönetir. YBM, başlangıçtan itibaren yaşam döngüsü boyunca alınan kararlar için güvenilir bir temel oluşturur. YBM yazılımlarına ARCHICAD, Autodesk Revit, Nemetschek Allplan ve Tekla Structures örnek verilebilir. İngiltere başta olmak üzere pek çok ülkede kullanımı zorunlu olan YBM'nin Türkiye'de kullanım oranı her geçen gün artmaktadır.

YBM kullanımı projenin ilerleyen dönemlerinde oluşabilecek problemlerin henüz tasarım aşamasında inşaat başlamadan tespit edilebilmesini sağlar. Planlama aşamasında gerçekleştirilen hesaplamaların ve oluşturulan çizimlerin tekrarlanmasını engelleyerek zaman kaybından ve ilave masraftan kurtarır.

Projede çalışan tüm birimlerin uyumlu ve eşzamanlı bir şekilde çalışmasına ve proje sürecinin bir bütün şeklinde ilerlemesine imkân tanır. Projenin tüm detaylarını

mimari modelleme ve görselleştirme yoluyla görünür kılarak belirsizlikleri ortadan kaldırır. Oluşabilecek atıkların en aza indirilmesi konusunda destek olur ve böylece çevreye duyarlı projelerin artışını hızlandırır.

YBM bir yapının fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin dijital bir örneğidir. YBM, inşaat süresince farklı aşamalarda sürekli olarak verilerin toplanması ve bilgi geliştirilmesini içermektedir. Bu bilgi, tasarım kararı alma, yüksek kaliteli inşaat belgelerinin üretimi, performans ve maliyet tahmini, inşaat planlaması ve yönetimi, iş takvimi, yapım, bakım, enerji ve üç boyutlu modelleri içerebilmektedir. Mimaride YBM kullanımı son kullanıcılara kesit ve izometrik detayları kısa sürede ifade etme imkânı sağlar. Böylece sözleşme yapan tasarımcı-yapıcı arasındaki iletişim ve uyum artar. Autodesk Revit, bir merkezi proje veri tabanı olarak YBM'nin gerçeğe uygun yorumudur. Bentley Systems, Graphisoft, Nemetschek diğer alternatif YBM araçlarıdır.

İnşaat öncesi hazırlanan iş programlarının gerçek koşullarla uyumluluğu, inşaat projelerinin planlanması ve yönetimi için çok önemlidir. Çeşitli araştırma çalışmaları, yanlış iş çizelgelerinin projelere önemli miktarda maliyet ve gecikme getirdiğini doğrulamaktadır. Anahtar nedenlerden biri, projelerin benzersiz fiziksel koşullarından bağımsız olarak ekiplerin sürekli üretken olduğu varsayılmasıdır. Bu nedenle inşaat faaliyetleri için proje bazlı ve tercihen dinamik verimlilik değerlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Modern inşaat projelerinde maliyet, süre ve kalite optimizasyonu en temel gereklilik olarak kabul edilmektedir. Gerçekçi metraj verilerinin elde edilebilmesi de özellikle yapım maliyeti ve proje süresinin doğru olarak planlanabilmesi açısından temel koşuldur. Doğruluğu yüksek metraj hesaplanması için Bettemir vd. (2019), Bettemir (2018) ile Bettemir ve Yücel (2018) yapısal elemanların boyutları üzerinden önceden tanımlı ilişkiler tanımlanarak metraj hesaplamıştır.

Mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) endüstrisinde, daha etkili bir inşaat süreci ve tasarım tekniklerine olan talep YBM'yi yaratmıştır. İyi bir yönetime sahip kurum ve kuruluşlar olası hataları önceden tespit edip önleyerek zaman ve maliyet açısından kazanç sağladığı için sektörde iyi bir yönetim anlayışı öncelik kazanmıştır. Bu bağlamda inşaat sektöründe YBM, disiplinler arası bilgi aktarımı sayesinde oluşabilecek sorunları önceden gösteren ve bina sınırı içerisinde çözüm geliştirmeye odaklı bir sistem olarak

oluşturulmuştur. CBS ise arazi yönetimi, kent planlaması, emlak yönetimi, çevre düzenlemesi, ulaşım planlaması gibi birçok alanda bina dışı mekânsal karar destek sistemi olarak hizmet etmektedir. Hızla büyüyen kentlerin artan karmaşıklığı, etkin kent ve tesis yönetimi açısından CBS'nin iç mekân modellerini de içermesi gerekmektedir.

Bununla birlikte, YBM teknolojisi hala yeni ve sürekli gelişmekte olduğundan, yüklenicilerin YBM'yi en iyi şekilde nasıl kullandıkları konusunda çok az fikir birliği vardır. YBM alanının, alan bilgilerini organize etmek için bilgi araştırma çerçevesinin gerekliliği mevcuttur. İnşaat projelerinde YBM kullanımının faydalarını ve sınırlamalarını test eden çok sayıda çalışma mevcuttur. YBM sistemlerinden maksimum verimi elde etmek için bu sistemlerin faydalarının, risklerinin, zorluklarının bilinmesi, zorluklara göre bir yol haritası çizilmesi, kullanım amaçları ve YBM'nin benimsenme durumunu incelemek gereklidir.

Türkiye'de son yıllarda YBM sistemlerinin kullanımı artmaktadır. Türkiye'de YBM sistemlerinin kullanımı üç kategoriye ayrılmaktadır. Bu kategoriler; akademik kullanımlar, ofis kullanımları ve sertifika temelli kullanımlardır. Türkiye'de İstanbul, Ankara, İzmir ve Trabzon şehirlerindeki üniversitelerde YBM sistemleri ile ilgili dersler verilmektedir. Türkiye'deki ofisler en çok REVIT ve Archicad YBM yazılımlarını tercih etmektedir. Birçok ofis, PROTA, CADYBM, INFOTRON gibi eğitim ve danışmanlık ofisleri aracılığıyla YBM sistemleri hakkında çalışanlarına eğitim imkânı veya katılım sertifikası programları sağlamaktadır (Kalfa, 2018). YBM, son yılların önde gelen teknolojisi olduğundan gelişime açıktır. YBM araçları, tasarım geliştirme safhasında herkes için standartlara uygun ortak bir kütüphane oluşturabilirse inşaatı tamamlamak için gereken zaman azalabilir ve maliyetten tasarruf edebilir. Ayrıca YBM uygulanması ile malzeme israfında azalma sağlanabilir (Bettemir ve Zafer, 2022).

Bir varlık sahibinin YBM uygulama kararı, stratejik iş sonuçları sağlayabilir. YBM'nin sağladığı faydalar, genellikle varlık sahipleri tarafından yapının teknik şartnameleri karşılayarak, bütçeyi aşmadan, zamanında bitirilmesi ile değerlendirilir. Ancak bu değerlendirme yöntemi ile YBM teknolojisini kullanan kurumun teknolojiyi verimli bir şekilde kullanıp kullanmadığı ve beklenen iş faydalarını sağlayıp sağlamadığı çoğunlukla bilinemez. Love vd. (2014) varlık sahiplerinin YBM'ye yatırım yaparak değer ve rekabet avantajı elde edebilmesi için bir çerçeve olarak kullanabilecekleri fayda

gerçekleştirme yaklaşımını sunmaktadır. Bu yaklaşımda değişime yatırımdan kaynaklanan potansiyel faydaların fiilen elde edilebilmesi için organize etme ve yönetme süreci olarak tanımlanır. Özellikle İnşaat Operasyonları Bina Bilgi Değişiminin (COBie), kaynak noktasında önemli proje verilerini yakalaması, tek dosya halinde kaydetmesi ve proje ekibi arasında paylaşması ile yardımcı olabileceği düşünülmektedir. YBM'nin faydalarının farkına varmak için, varlık sahiplerine faydalarını gerçekleştirme yeteneği sağlamak için firmanın kaynak temelli yaklaşımı kullanması önerilmektedir. Kaynak temelli yaklaşıma göre, firma eğer rakiplerine karşı avantaj sağlamak istiyorsa kaynaklarının kolayca taklit edilemeyen özelliklere sahip olması gerekir. Ayrıca firma, YBM kullanımıyla değer yaratmak için gereken yeteneğe sadece BT departmanı, ekipman ve stoklar sayesinde ulaşamaz. En önemli kriter, insan kaynaklarının işbirliği içerisinde yeteneklerini ve yetkinliklerini kullanarak kaynakları kullanma becerisidir. Önerilen çerçevenin temel taşları; paydaş yönetimi, değişiklik yönetimi, kurumsal yönetim ve performans ölçümüdür. YBM için faydaları gerçekleştirme sürecinde, varlık sahibi doğru soruları sormalı ve bunları defalarca sorup gözden geçirmesi gerekir.

Farnsworth vd. (2015) inşaat sektöründe önde gelen müteahhitlik firmalarına danışarak, YBM kullanmanın avantajlarını ve etkilerini, YBM uygulamasının kullanım sıklığını ve ticari inşaat sürecinde YBM modellerini geliştirme ve kullanma ile ilgili çeşitli yöntemleri keşfetmek için anket çalışması yapmıştır. Kuzey Amerika'da faaliyet gösteren 18 ticari müteahhitlik firmasının yönetici, orta düzey yönetim ve YBM uygulayıcı seviyesindeki çalışanları, şirketlerinin YBM'yi nasıl kullandığını belirlemek için ankete tabi tutulmuştur. Nihai anket havuzu 12 yönetici, 13 orta düzey yönetim, 12 YBM kullanıcı düzeyinde katılımcı içermektedir. İlk olarak, ticari inşaatlarda YBM kullanımına yönelik 32 farklı uygulama belirlendi. Sonrasında ankete katılan YBM ticari müteahhitleri, YBM'yi inşaat uygulamalarında kullanmanın 29 farklı avantajını içeren bir liste geliştirmiştir.

YBM'nin ilk beş uygulaması, toplam şirket projelerinde %70 ila %85 oranında yararlanılan çakışma tespiti, 3D modelleme, ekip işbirliği, tasarımların inşa edilebilirlik sorunları ve satışları içermektedir. YBM kullanımının ilk beş avantajı, planlama, iletişim, görselleştirme, koordinasyon ve çakışma tespitidir. Çoğu proje için, proje türüne ve avantaja bağlı olarak LOD300 veya LOD400 modeller oluşturulmuştur. YBM projelerinin %76 ila %100'ü için modeller üretilmiştir. Büyük yüklenicilerinin üçte ikisi projelerinin en

az %70'inde YBM kullanılmaktadır. Yapılan araştırmada, şirketlerin yaklaşık yarısında YBM üzerindeki QA/QC kontrollerine ilişkin resmi bir yapı eksikliği olduğu görülmüştür. YBM'nin kendine ait kalite kontrol prosedürüne sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Farnsworth vd. (2015) tarafından ulaşılan sonuçlar, YBM'nin proje yaşam döngüsüne entegrasyonunu geliştirmek açısından bir fırsat sunmuştur.

Ancak YBM kullanımı ile beklenen katma değeri elde edebilmek için daha fazla araştırma çalışmasına ihtiyaç vardır. Leite vd. (2011) farklı ayrıntı düzeylerinde (LoD) YBM oluşturmayla ilgili modelleme çabasını ve mekanik, elektrik ve sıhhi tesisat (MEP) tasarım koordinasyonunu destekleyen bir projede LoD'nin etkisini değerlendirmiştir. Modelleme çabasını ve LoD'nin etkisini değerlendirmek için farklı LoD'lerin modellenmesinin gerekli olduğu iki proje seçilmiştir. LoD, bileşenlere dayalı olarak tanımlanır ve bir bileşenin, en düşük yaklaşım seviyesinden en yüksek temsil seviyesine ilerlemesi olarak tanımlanır. YBM uygulamaları 2 vaka analizi üzerinde denenmiştir. İlk proje, 189.000 metrekarelik ofis alanlarına sahip beş katlı ticari bir binadan oluşmaktadır. Proje 1'de bir çekirdek ve kabuk modeli ve Proje 2'nin dış kaplamasının bir kısmı için model geliştirilmiştir. Proje 2, iki bina ve 150 açıklıklı bir yeraltı garajından oluşan akademik bir binadır. Proje 2, diğer projeden farklı olarak MEP tasarım koordinasyonu için bir YBM'de ihtiyaç duyulan LoD'yi de araştırmaktadır. Proje 2'nin bu analizde kullanılan MEP nesnelerini içeren ve üçüncü bir taraf tarafından modellenen hassas geometri modeli kullanılmıştır. Proje 2, YBM'yi kullanarak otomatik çakışma tespit sürecinde tanımlanan çakışma türlerini karşılaştırmıştır. İncelenen 2 proje sonucunda, modeldeki parçaların ayrıntılı bir temsiline sahip olmak için modelleme süresinde 2 ila 11 kat arası bir artış oranı gözlemlenmiştir. Proje 2'deki MEP koordinasyonu sorunu için YBM tabanlı yaklaşımın, manuel sürece göre çakışma tespiti düşük hassasiyetli olsa da, yüksek geri çağırma oranları ile sahada tespit edilebilecek sorunları önceden azaltmada daha yüksek bir etkiye sahip olabileceği belirtilmiştir.

Kalfa (2018) dünyadaki ve Türkiye'deki YBM sistemlerinin AEC endüstrisi üzerindeki faydaları, riskleri ve zorluklarını incelemiş ve tartışmıştır. YBM sistemleri tutarlılık, görselleştirme ve simülasyon, koordinasyon ve işbirliği, çakışma tespiti ve risk azaltma, genel proje maliyeti ve sürelerinin azaltılması, inşaat planlama ve yönetimi alanlarında fayda sağlamaktadır. Diğer yandan YBM yazılımındaki teknik sorunlar ve YBM kullanımındaki uzmanlık, bilgi ve deneyim eksikliği YBM kullanımını

sınırlandırmaktadır. YBM yazılımları üzerinde yapılan araştırmalara göre REVIT ve Archicad dünya çapında en çok kullanılan yazılımlardır. Bryde vd.(2013) YBM kullanımı inşaat projelerine fayda sağladı mı? sorusunu cevaplamak adına YBM kullanan 35 inşaat projesinden alınan ikincil verileri analiz etmişlerdir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda, projelerde YBM kullanımı ile en çok olumlu etkiyi Maliyet Kriteri sağlamıştır. Vaka çalışmalarının 21'ini (%60) kapsayan maliyet düşürme veya kontrol faydaları oluşturmuştur. YBM kullanımı sayesinde projelerde Zaman Kriteri %34, İletişim Kriteri %37, Koordinasyon Kriteri %34, Kalite Kriteri %34, Risk Yönetimi Kriteri %17 oranında olumlu etkiye sahiptir. Organizasyon kriteri, projede eşit sayıda pozitif ve negatif etki gösteren tek kriterdir. Projelerin %20'si yazılım sorunları ile ilgili olumsuz sonuçlar bildirmiştir. Farklı YBM yazılım paketleri arasında birlikte çalışabilirlik sorunları ve inşaat sektöründe YBM uygulamaları hakkında bilgisizlik mevcuttur. BT şirketleri YBM teknik sorunlarına, üst düzey yöneticiler ise YBM ve personel eğitimine yatırım yaparsa belirtilen sorunların çözülebileceği belirtilmiştir.

Malezya inşaat endüstrisi, dünya pazarındaki rekabete ortak olmak için Bilgi Teknolojilerine (BT) ilgi göstermeye başlamış ve YBM alımında artış gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte insan, süreç, teknoloji etkileşimi Malezya'da etkili bir YBM penetrasyon oranını engellemektedir. Enegbuma vd. (2013) YBM penetrasyonu üzerinde baskın etkiye sahip değişkenleri tanımlayarak oluşturulan teorik model sayesinde Malezya'da YBM uygulamasının gelecekteki politikasını belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırma modeli, Malezya inşaat endüstrisinde YBM kabulünü daha da geliştirmek için insan, süreç, teknoloji, stratejik BT planlaması ve işbirliğine dayalı inşaat değişkenlerini ve değişkenler arasındaki bağlantıları varsayımsal şekilde oluşturup analiz etmiştir. Araştırma modeli, YBM Algısı, İnşaat Stratejik BT, İşbirliğine Dayalı İnşaat ve YBM Penetrasyonu olarak 4 temel değişkene ayrılmaktadır. YBM Algısı, kendi içerisinde İnsanlar, Süreç ve Teknoloji değişkenlerini barındırmaktadır. İnşaat Stratejik BT, İş Süreçlerinin Yeniden Yapılandırılması ve Bilgisayarla Bütünleşik Yapı değişkenlerini içerisinde barındırmaktadır. Enegbuma vd. (2013) tarafından oluşturulan model, veri ve istatistikten bağımsız teorik bir modeldir. Hipotez, Yapısal Eşitlik Modellemesinden (YEM) geçip, veriler toplandıktan sonra model istatistiksel olarak analiz edilebilir.

Yapı projelerinin, inşaat izinleri için ilgili yönetmeliklere göre uygunluklarının denetimi karmaşık, hata olasılığı yüksek ve yoğun kaynak ihtiyacı barındıran bir süreçtir.

Yapı projelerinin ilgili yönetmeliklere göre zaman ve maliyeti etkin kullanarak hatasız bir şekilde denetiminin yapılması için denetleme sürecinin modellenmesine ve otomatik sistemlerin geliştirilmesine gerek duyulmuştur. Otomatik denetleme sistemleri, hem yapım projesinin hem de ilgili yönetmeliklerin uygun sayısal temsillerini gerektirmektedir. YBM araçlarındaki gelişmeler ile günümüzde yapı projeleri için standart bir sayısal temsil sağlanabilmektedir. Yönetmeliklerin sürekli güncellenmesi, bilginin sisteme sabit kodlama yoluyla aktarılması standart bir model oluşturmaya engel oluşturmıştır. Macit vd. (2015) sayısal yönetmelik temsillerinin oluşturulması için yeni bir temsil modeli geliştirmiştir.

Geliştirilen yeni temsil modeli, sayısal yönetmelik temsillerinin oluşması için semantik modelleme yöntemi ile geliştirilen RASE (Resources, Activity, Support and Evaluation) modelinin, kuramsal temelleri Nyman ve Fenves'in çalışmasına dayanan dört katmanlı modelleme yöntemi ile hibrit bir yapı oluşturmaya dayanmaktadır. Katmanlar şu şekilde sıralanmaktadır;

- Tanım Katmanı (Domain Layer): Yönetmelik metninde geçen terimler (nesneler vb.), özellikleri ve ilişkileri ile birlikte tanımlanarak nesne tabanlı temsil edilmektedir.
- Kural Katmanı (Rule Layer): Yönetmelik metninde yer alan kural cümleleri, tanım katmanında modellenen sınıflar kullanılarak, uyarlanmış RASE yapısında kural nesneleri şeklinde temsil edilmektedir.
- Kural-seti Katmanı (Rule-set Layer): Kural katmanında modellenen kural nesneleri arasındaki ilişkiler tanımlanarak kural setleri oluşturulmaktadır.
- Yönetim Katmanı (Management Layer): Kural setlerinin sınıflandırması ile birlikte yönetmeliğin genel organizasyonunun temsili yapılmaktadır.

Yeni temsil modelinin uygulanabilirliği İzmir Büyükşehir Belediyesi İmar Yönetmeliği örneğinde değerlendirilmiştir. Yönetmelik analiz edilerek 258 kural cümlesi tespit edilmiş. Yapılan çalışma sonucunda 204 adet kural cümlesinin geliştirilen model ile sayısal temsili oluşturulmuştur. Diğer modellerin aksine çok sayıda tekrardan kaynaklanan kavram karmaşası ve kurallar arasındaki mantıksal ilişkilerin eksikliği giderilmiştir. Temsil modelinde bulanık ve soyut kurallar olarak ifade edilen sayısal temsili oluşturulamayan kurallar vardır. Oluşturulan temsil modelinin daha iyi bir sonuç vermesi için yönetmeliklerin yeniden ölçülebilir ifadelerle düzenlenmesi gerekir. Sonuç olarak,

yönetmeliklerin hiyerarşik, katmanlı ve sistemden bağımsız yapısı ile etkili bir modelleme sistemi ortaya çıkmıştır.

Akkaya vd. (2012) iç mekân modellemesi için YBM'nin CBS ile entegrasyonunu incelemiştir. Bina içi mekânsal veri modelinde (BISDM), IFC ve CityGML veri modellerinin entegrasyonu amaçlanmıştır. CityGML, 3B kent modellerinde nesnelerin görselleştirilmesini sağlayan farklı ayrıntı düzeylerini (LoD) kapsamaktadır. CityGML 5 ayrıntı düzeyi (LoD0-LoD4) içermektedir ve her düzey bir öncekinden daha fazla detay içermektedir. IFC, YBM ile birlikte nesneleri geometrik ve semantik olarak tanımlama olanağı sağlamaktadır. CityGML ve IFC birçok açıdan oldukça farklıdır. Akkaya vd. (2012) temel farklılıkların CBS, YBM ve bilgisayar destekli mimari tasarım (CAD) arasındaki 3B modellerin üretiminde kullanılan modelleme yaklaşımlarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Wu ve Hsieh (2007), IFC'den CityGML'e otomatik çevirme için bir algoritma sunmuştur. Isikdağ ve Zlatanova (2009) IFC veri modeli ile CityGML arasında semantik eşleştirme tanımlamak için ön bilgi vermektedirler. Ancak çalışmalar iki model arasındaki otomatik çevirimi sağlayamamıştır. IFC ve CityGML gibi modelleme dillerinin elverişliliğini denemek gelecekte tam CBS entegrasyonunu sağlayabilecektir.

Çetiner (2010) YBM'yi uygulama örnekleri ile birlikte açıklamıştır. Çetiner (2010) YBM kullanan firmalardan örnekler almış ve olumlu/olumsuz etkiler aktarmıştır. Sonuç olarak Çetiner (2010), YBM araçlarının projelerin tasarım bilgilerini bilgisayar ortamında mevcut sistemlerden daha iyi temsil edebildiği açıklamıştır. Bundan dolayı gelecekte mimari tasarıma yön verecek ve tasarım süreçlerini dönüştürecekler. Succar (2009) halka açık bazı uluslararası yönergeleri araştırmış ve endüstri paydaşları için araştırma ve uygulama temeli olan bir YBM çerçevesini önermiştir. Önerilen YBM çerçevesi çok boyutludur ve üç eksenli bir bilgi modeli ile temsil edilir; Bunlar YBM faaliyet alanları, YBM Aşamaları ve YBM Odaklarıdır. YBM Alanları, birbirine bağlı olan Teknoloji, Süreç ve Politika faaliyet alanlarını tanımlar. Teknoloji Alanı, YBM yazılım çözümleri ve ekipmanları üreten kuruluşları içerir. Süreç Alanı, AECO sektörü çalışanlarını içerir. YBM Politika Alanı ise düzenleyici ve sözleşme üzerine rol oynayan uzman kuruluşları içinde barındırır.

YBM Alanları belirlendikten sonra çerçevenin ikinci boyutu olan YBM Olgunluk Aşamalarına geçiş yapılır. YBM Aşamaları, nesne tabanlı modelleme, model tabanlı

işbirliği ve ağ tabanlı entegrasyon olarak 3 aşamada tanımlanır. Tüm bu teknolojik süreçlerin sonucunda Entegre Proje Teslimatı gerçekleşecektir. YBM aşamaları, sabit bir başlangıç noktasından (YBM öncesi durum) başlayarak gerekli koşullar sağlandıktan sonra 4 adımda Entegre Proje Teslimi (IPD) noktasında sonuçlanır. Çerçevenin üçüncü boyutunu YBM Odakları temsil eder. YBM Odakları, YBM alanını soyutlar ve gereksiz ayrıntıları kaldırarak karmaşıklığını kontrol ederler. YBM çerçevesinin karmaşıklığını azaltmak, bilgi edinimini ve doğrulanmasını sağlamak için özel bir YBM ontolojisi geliştirilmiştir. YBM ontolojisi, Genel Teknolojik Ontoloji ve Genel Süreç Ontolojisi baz alınarak geliştirilmiştir. Succar (2009), bilgi görselleştirmesi için en uygun formatı VENN olarak belirlemiştir.

Khataei vd. (2020), verimlilik analizi için 4D YBM ve görsel bir programlama dili kullanılan yeni bir konsept önermiştir. Önerilen yöntemde, eleman yakınlık hesabı kullanılarak proje faaliyetlerinin verimlilik değerlerinin revize edilmesi amaçlanmıştır. Hesaplama Python ile yazılmış bir kod paketi ve Dynamo adlı görsel bir programlama dili aracı ile yapılmaktadır. İlk üretkenlik değerlerine ve elemanların miktar, malzeme, ağırlık, konum vb. gibi verilerine dayalı olarak saat bazlı bir çalışma programı oluşturulmuştur. Bir sonraki adımda, oluşturulan iş programı bilgisi YBM elemanlarına entegre edilir ve hem çizelgede hem de Dynamo'da kodlanmış YBM modelinde bulunan eleman ID'leri eşleştirilerek bir listeye kaydedilmiştir. Her çizelge günü ve saati için, öğeler arasında bir öğe yakınlık algılama yöntemi uygulanmıştır. Yakınlık algılama sistemi, her bir çalışma saati için öğeler arasındaki mesafeyi hesaplar. Yakınlık tanımlanan eşik değerlerini aşarsa, ilgili eşzamanlı elemanların üretkenlikleri revize edilir. Revize edilen değerler excel sayfasına aktarılır ve ilk üretkenliklerle değiştirilir. Son olarak, plan yeniden planlanır ve daha gerçekçi yeni bir aktivite süresi elde edilebilir. Önerilen model yaklaşık 360 metrekare brüt alana sahip, iki katlı çelik yapı projesi olan bir vaka projesinde uygulanmıştır. Yakınlık tespiti için kullanılan faaliyetler, kolon ve kiriş yerleştirme görevleriyle ilgilidir. İşlerin başlangıç programı, toplam 87,1 adam-saat harcanan 8 faaliyetten oluşmaktadır. Yakınlık tespiti, kolonlar ve kirişler için sırasıyla 3 ve 2 metre olarak varsayılan eşiklerle çalıştırılmıştır. Ayrıca, eşiklerin aşılması durumunda verimlilik azalmasının %50 olduğu varsayılmıştır. Yeniden çizelgelenen plan, ilk tahminle karşılaştırıldığında yaklaşık %12'lik bir değişim göstererek faaliyetleri tamamlamak için gerekli olan toplam 97,96 adam-saatlik 9 faaliyeti içermektedir. Revize edilmiş verimlilik değerleri ve ardından yeniden programlanmış bir plan, önerilen yöntemin sonuçlarıdır.

Proje planlayıcıları bu yöntemi uygulayarak, süre analizleri ve ilk tahminlerin doğruluğunu artırmak için yeni teknolojilerden yararlanabileceklerdir.

Bayram (2020), taban alanı 853,49 m², yapı inşaat alanı 4.407,48 m² olan B+Z+3N katlı bir konut projesini, Yapı Bilgi Modeli (YBM) temelinde yaygın olarak kullanılmakta olan iki yazılım ile modelleyerek, elde edilen kaba ve ince imalat metraj verilerini, geleneksel yöntemle hesaplanan metraj verileri ile kıyaslamıştır. Örnek bir proje için Autodesk Revit (AR) ve Nemetschek Allplan (NA) olmak üzere iki yazılımdan elde edilen metraj değerleri, geleneksel metraj yönteminden elde edilen değerlerle kıyaslanarak yazılımlardan elde edilen metrajların geçerlilikleri sorgulanmıştır. İş kalemlerinin metrajında $\pm\%5$ aralığında elde edilen sapma oranları tespit edilmiş ve sadece C16/20 grobeton imalatı metrajında her iki yazılım tam doğru sonuç vermiştir. AR için maksimum negatif sapma oranı 25'lik tuğla duvar imalatında $\%-1,89$ olarak elde edilirken, maksimum pozitif sapma ise 10'luk tuğla duvar imalatında $\%3,76$ olarak elde edilmiştir. NA için maksimum negatif sapma oranı C25/30 beton imalatında $\%-0,87$ olarak elde edilirken, maksimum pozitif sapma ise 20'lik tuğla duvar imalatında $\%4,14$ olarak elde edilmiştir.

Moradi vd. (2021) Finlandiya ve Norveç'te devam eden veya yakın zamanda tamamlanan iş ortaklığı veya konsorsiyum inşaat projelerinde görev yapan 33 proje yöneticisine anket uygulamıştır. Her iki katılımcı grubun yaratıcı gerilim açısından ortak üç yetkinliği üretim verimliliği, karar kalitesi ve diğerlerini anlamaktır. Proje yöneticisinin bireysel performansına katkıda bulunan yetkinlikler güvenilirlik, stres toleransı, inisiyatif, iyimserlik, öz değerlendirme ve üretim verimliliğidir. Ekip performansına katkıda bulunan yetkinlikler arasında çatışma yönetimi, grup yetenekleri, başkalarını anlama ve karar kalitesidir. Moradi vd.(2021) gerçekleştirilen ortaklı işbirlikçi inşaat projelerinde başarılı bir proje yöneticisi olmak için gerekli yetkinlik yelpazesini anlamayı amaçlamıştır. Gelişmiş yeterlilik profilinin başka bağlamlarda da doğrulanması gerekir. Bu nedenle, çeşitli bölgelerde ve iş koşullarında tamamlayıcı çalışmalar, daha fazla araştırma için potansiyel bir alandır.

Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde, iş makinelerinin gerçek zamanlı ölçümü gerçekleştirilen hafriyat güzergâhı üzerinde oluşturduğu performans, üretkenlik, maliyet ve süre veri parametreleri hesaplanarak analiz edilmiş ve elde edilen veriler optimize edilerek yükleniciye tasarım aşamasında gerçekleştireceği proje için en

uygun iş makineleri kombinasyonunu belirleme imkânı sunmuştur. Bilgi Teknolojileri Uygulamalarında bulunan tasarım aşamasında gerçekleştirdiği gerçek zamanlı, dinamik bilgi modelleme ve elde edilen veri modelinin çevrimiçi bir şekilde iş paydaşlarına aktarılması işlemi tez çalışmasında bulunmaktadır. Bilgi Teknolojileri Uygulamalarının projenin tasarım aşamasında ortaya koyduğu veri ve görüntü modellemeleri sayesinde projede çalışan paydaşlar proje başlamadan önce güvenli bir yol haritası oluşturma avantajına sahip olmaktadır. Proje aşamasında oluşacak hataların ve ek maliyet ve süre kayıplarının önüne geçilmektedir. Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde de kullanıcıya gerçekleştireceği toprak işleri öncesinde sunulan gerçek zamanlı veri ve görüntü modellemesi sayesinde proje aşamasında oluşacak hatalar ve ek maliyet ve süre kayıplarını önleme imkânı sunulmaktadır.

1.2. Hafriyat ve İş Makineleri

İnşa edilecek yapı türüne göre birçok iş kalemi bulunmaktadır. Tek bir iş kaleminin oluşturduğu etki tüm proje çıktılarına etki edebilmektedir. İnşaat sektöründe toplumun ihtiyaçlarına göre konut, köprü, baraj, karayolu gibi yapı türleri inşa edilmektedir. Her yapı türünün kendine özgü oluşum aşamaları bulunmaktadır. Ancak her yapı türünde ayırım fark etmeksizin hafriyat ve saha iyileştirme hizmetleri bulunmaktadır. Toprak işleri, kendi içerisinde bulunan aşamaları ve kullanılan iş ekipmanları birlikte gerçekleştirilecek projenin toplam maliyet, süre ve iş verimi analizlerinde büyük öneme sahiptir.

Hafriyat ve saha iyileştirme hizmetleri, inşaat sahalarını ve inşaat alanlarını hazırlamak için kazı, taşıma, sıkıştırma, tesviye, yıkım ve diğer görevleri gerçekleştirir. Hafriyat ve saha iyileştirme hizmetleri sağlayıcısını seçmek, tedarikçi yeteneklerinin analizini gerektirir. Çoğu hafriyat hizmet sağlayıcısı, birçok farklı türde alet, ekipman, makine ve araca sahip olur veya kiralar. İnşaat ekipmanları, ev yapımından büyük ölçekli ticari ve sivil projelere kadar hemen hemen her büyüklükteki inşaat işleri için gereklidir. Birçok türde ağır inşaat ekipmanı, birden fazla işlev için tasarlanmıştır ve bu özellik ağır inşaat ekipmanlarını şantiyelerde vazgeçilmez kılmaktadır. Hafriyat sürecinde ekskavatör, damperli kamyon, kazıcı yükleyici, mini yükleyici, buldozer, skreyper ve greyder vb. gibi ağır inşaat makineleri kullanılmaktadır.

Şantiyelerde inşaat ekipmanları ve makineleri kullanımı çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle büyük ölçekli projelerde genel inşaat maliyetlerini azaltmaktadır. En etkili ve verimli yöntemlerle iş ilerlemesi yoluyla üretim oranını yükseltmeye yardımcı olurlar. İnsanların kendi başına yapamayacağı kadar ağır ve hassas olan işleri bir makine veya ekipman kolaylıkla yapabilir. Manuel olarak yapılamayacak işleri daha ekonomik ve hızlı bir şekilde gerçekleştirir. Çoğu endüstride kullanılan makineler benzerdir. Bu şekilde işgücü hareketliliği olabilir. Kullanım ömrü süren her ekipmanın satış veya ticari değeri vardır.

Uzun yıllar Avrupa inşaat sektörü, küreselleşme, yasal değişiklikler ve teknik ilerleme gibi farklı etkiler nedeniyle bir değişim süreci içerisinde. İnşaat sektörü, çok dar zaman ve bütçe kısıtları ile zorlu bir ortamla karşı karşıyadır. Aynı zamanda, gerçek zamanlı bilgi eksikliği, projeleri etkin bir şekilde kontrol etmeyi imkânsız hale getirir. İnşaat projelerinin ihale öncesinde yapım sürelerinin ve maliyetlerinin doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Eksik verilerle hazırlanacak olan ihale dosyaları önemli riskler içermektedir. İhale teklifi hazırlanmasında kullanılan verilerdeki belirsizliklerin inşaat süresine ve maliyetine etkisi belirlenirse ihale dosyasında belirtilen teklif bedelinin ve inşaat süresinin içerdiği risk daha doğru bir şekilde belirlenebilecektir.

Bir hafriyat operasyonunda işleme birimini (bir kaya-toprak hacmini) başlatan kazı, hidrolik ağır hizmet ekskavatörlerine gerek duymaktadır. Bir yükleyici ve kamyonlarla gerçekleştirilen büyük bir hafriyat operasyonunda, dikkatli bir ekipman boyutu seçimi hem zaman hem de maliyet açısından önemli tasarruflar sağlayabilir. Yeni bir sözleşme için ekipman seçme görevi verilen bir proje müdürünün sunulan birçok alternatifin teknik ve ekonomik değerlerini dikkatli bir şekilde değerlendirmesi gerekir. Standart, hazır ekipman söz konusu olduğunda, marka ve model seçimi genellikle kolay değildir. Güvenilir bir karara varılmadan önce birçok ayrı yargıyı içeren tüm önemli ve karmaşık faktörlerin dikkate alınması gerekir. Nihai seçim, yöneticinin ne istediği ile gerçekte ne elde edilebileceği arasındaki bir uzlaşmaya bağlıdır.

İş makinelerinden yüksek verim elde etmek birçok faktöre bağlıdır. Kullanılacak yükleyici ve kazıcının kova hacmi, ağırlığı, motor gücü, iş makinelerinin yüksekliği gibi iş makinesinin teknik özellikleri ile yapılan toprak işine özgü salınım açısı, kazınacak ve taşınacak toprak hacmi, yükleyicinin taşıma mesafesi, arazi yapısı, operatörün çalışma

verimi ve deneyimi, çevre ve hava koşulları, hafriyat güzergahı vb. gibi faktörler iş makinelerinin üretim verimliliğini ve bununla birlikte proje maliyetini etkilemektedir.

Açık maden ocaklarının işletilmesi ile baraj, karayolu inşaatları gibi toprak, kazı ve saha iyileştirme hizmetlerinin yoğun olduğu çalışma alanlarında hedeflenen işi gerçekleştirmek için iş makineleri kullanılmaktadır. Toprak işlerinde kullanılan ekskavatör, damperli kamyon, kazıcı yükleyici, mini yükleyici, buldozer, skreyper ve motorlu greyder vb. gibi ağır iş makineleri yüksek ilk yatırım maliyetine sahiptir. Bu nedenle hedeflenen toprak işini yüksek verimde gerçekleştirecek uygun boyuta sahip iş makinelerinin seçimi zorunludur. Aksi takdirde iş makineleri düşük verimde kullanılacağı için düşük kâr marjı ile yapılan toprak işlerinde işletmelerin zarar etmesi kaçınılmaz olabilir. İş makinelerinin gerçekleştirebileceği birim zamandaki üretim miktarı, agrega üretiminin birim maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle iş makinelerinin birim zamanda gerçekleştirebileceği üretimi yüksek doğrulukta belirlemek önemlidir. Caterpillar (1979), Nunnally (2001) ve Peurifoy ve Schexnayder (2002) çevre ve iş koşullarına göre yükleyicilerin ve ekskavatörlerin bir saat içinde kaç çevrim yapabildiğini ve zemin koşullarına göre kovanın hangi oranda doldurulabildiğini belirleyen tablolar yayınlamıştır. Ayrıca literatürde regresyon modellerine dayalı tahmin yazılımları da bulunmaktadır. Edwards ve Holt (2000), 35 adet hidrolik ekskavatörün çevrim süresini kullanarak iş makinesi parametrelerine dayalı biçimde çevrim süresini tahmin eden ESTIVATE adında bir regresyon modeli kurmuştur. Edwards ve Griffiths (2000) 43 iş makinesi verileri ile kurmuş oldukları yapay sinir ağını beslemiş ve iş makinelerinin teknik özelliklerine göre bir tahmin modeli kurmuşlardır. Edwards vd. (2001), gerçekleştirilen tahmin modeline doğrusal programlama algoritmasını ekleyerek iş koşulları ve tanımlı üretim senaryoları için optimum ekskavatör tipini seçmeye yönelik bir karar aracı sunmuştur. Tam vd. (2002) kurulan modele başka iş makinelerini de ekleyerek modelin doğruluğunu arttırmayı hedeflemişlerdir. Yang vd. (2003) bulanık mantıkla iş makinelerinin üretim miktarlarını tahmin etmiştir. Vahdatikhaki ve Hammad (2014) toprak işi projelerinde yakın gerçek zamanlı simülasyon yapabilmek için konum izleme teknikleri kullanmıştır. Simülasyon tahmini ve gerçekleşen durum arasındaki farklılıkları ölçüp simülasyon model parametrelerini iyileştirmiştir.

Drygin vd. (2017) Kuzbas açık maden ocaklarındaki iş makinelerinin birim zamandaki performanslarını arttırmak için çalışma yapmış ve ana etkenin iş makinelerinin boşa kalma sürelerinin azaltılarak verim faktörünün yükseltilmesi olduğunu

belirlemişlerdir. Holt ve Edwards (2015), Manyele (2017) ile Balaraaman ve Chandrasekaran (2021) açık maden ocaklarındaki iş makinelerinin verimlerini incelemiş ve ekskavatörlerin manevra boşluğunun bulunması, yükleme konumu, ekskavatörün boyutu, kamyon ile ekskavatör boyutunun uyumunun verimlilik üzerinde büyük etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Yoon vd. (2014) ekskavatörlerin kazı hızını etkileyen faktörleri araştırmış ve kamyon yüksekliğinin çok etkili olmadığını, ekskavatör ile kamyon arasındaki mesafenin ve çevrim açısının etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Bettemir (2009), Hava durumu, zemin koşulları ve operatör verimliliği ile ilgili belirsizlikleri ve riskleri Monte Carlo analizi ile modellemiş ve bu etkenlerin iş bitirme süresine ve ekipman ihtiyacına olan etkilerini incelemiştir. Sağlam ve Bettemir (2018) farklı zemin ve çevre koşullarını göz önünde bulundurarak hafriyat süresini ve gerekli kamyon sayısını tahmin eden bir yazılım geliştirmiştir. Bettemir (2020) PERT ve Monte Carlo ile hesaplanan inşaat sürelerinin belirsizlik değerlerini karşılaştırmıştır. Chan vd. (1989) hızlı ve kolay erişilebilirlik için düzenlenmiş bir kayıt veritabanında kolayca tanımlanabilen, kapsamlı özelliklere sahip olan yükleyici-ekskavatörlerin teknik değerlerine göre proje için en uygun seçime odaklanan süreci açıklamaktadır.

Mevcut projeler için sorunsuz inşaat aşamaları ve ilerleme hakkında gerçek zamanlı bilgiler çok önemlidir. Rausch (2010), şantiyelerden alınan veriler ile performans ve maliyet analizi gerçekleştiren EPOS (hafriyat ve yol inşaatı endüstrisinde uydu destekli yazılım ile verimli süreç tasarımı) araştırma projesini gerçekleştirmiştir. Proje kontrolü için çok katmanlı bir kapalı döngü sistemi geliştirilmiştir. İlk adımda bir ekskavatör, Sayısal Arazi Modeli (SAM) ve GPS tabanlı bir makine yönlendirme sistemi ile donatılmıştır. Sistem GPS alıcısından elde edilen konumu, zamanı, bir ekskavatörün kepçesinin koordinatlarını, yön ve açılardan oluşan veri setlerini kaydetmektedir. SAM Navigator yazılımı, bir ekskavatörün yerleşik ünitesine kurulmuştur. Ekskavatörün performansını hesaplamak için yazılım iki dijital arazi modelini karşılaştırır. İnşaat makinesinin günlük çalışma hareketleri kaydedilir ve otomatik olarak saklanır. Bir sonraki adımda, veriler kablosuz ağ bağlantısı aracılığıyla merkezi bir üretim etkinliği kontrol sunucusuna (PAC) aktarılır. PAC, web tabanlı bir uygulamadır ve tüm şantiyelerden uzaktan erişilebilir ve inşaat denetçilerini desteklemektedir. İş zekâsı (BI) ile toplanan veriler bir veri ambarında saklanır. Böylece analiz yeniden üretilebilir. Son adımda, iş analizini desteklemek için ekskavatörlerin yerel olarak toplanan maliyet ve performans verileri bir Kurumsal Kaynak Planlaması (*Enterprise Resource Planning (ERP)*) sistemine aktarılmaktadır. ERP sistemi

tarafından makine operatörlerinin ücretleri, yakıt maliyeti, işletim ve aşınma maliyetleri gibi ek veriler kaydedilebilir ve işlenebilir.

Ekskavatörlerin kullanım düzeyini hesaplamak için ekskavatörlerin çalışma süresi bilgileri kullanılmıştır. İnşaat makinelerinin üretken kullanım oranı (PUR_i), üretken kullanım süresi pti'nin toplam kullanılabilir süreye, yani pti ve boşa kalma süresi iti'nin toplamına bölünmesinin sonucudur. Eşitlik 1' de üretken kullanım oranı (PUR_i) formülü verilmiştir.

$$PUR_i = \frac{pti}{(pti+it)} \quad (1)$$

Bir inşaat makinesinin PUR_i'si uzun bir süre için belirli bir eşiğin altında kaldığında, performansa dayalı bir bakımın gerekli olduğuna veya makinenin değiştirilmesi gerektiğine dair bir ipucu olabilmektedir. Rausch (2010) tarafından gerçekleştirilen proje hafriyat ve yol inşaatı endüstrisi için yeni nesil kontrol sistemleri sunmaktadır. EPOS araştırma projesinin hedefi ekskavatörlerin yerel olarak toplanan maliyet ve performans verilerinin bir bilgi sistemine tam otomatik olarak aktarılmasını sağlamak ve verileri inşaat denetçileri, kontrolörler veya yöneticiler gibi çeşitli paydaşlar için hazırlamaktır. Akıllı performans ve maliyet analizi sunarak stratejik ve operasyonel seviyeler arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Gelecekte buldozer, kamyon vb. diğer ekipmanların entegrasyonu ve farklı düzeyde analiz bileşenleri ile çalışma genişletilebilir.

Her inşaat projesi, depolama alanlarının, geçici yolların, sosyal konteynırların, makine parklarının vb. gösterildiği bir şantiye planı gerektirir. Bir şantiyede makine parkının yeri çok önemlidir. Günlük inşaat makinelerinin parktan çalışma pozisyonlarına taşınması zaman ve maliyet alıcıdır. Bir müteahhidin bu koşullarda başarısı, esas olarak teknoloji ve organizasyon becerilerinin optimizasyonu ile elde edilebilir. Anysz vd.(2018) gerekli geçici yolların konumuna ilişkin dört olası çözüm üzerinde sezgisel algoritmalarla geliştirilmiş iki boyutlu problem simülasyonu uygulamışlardır. İnşaat halindeki yol güzergâhının bir çokgen tarafından tahmin edilebileceği varsayılmıştır. Çokgenin her bölümünün merkezi, geçici yol ile iş makineleri parklarına bağlanmıştır. Maliyet fonksiyonunu en aza indirmek için makine parkının (x, y) koordinatları aranır. Monte Carlo simülasyonu çalıştırılarak sonuçlar kaydedilmiş ve işlem birkaç bin kez tekrarlanmıştır. Analiz edilen durumda maliyet tasarrufu, toplam maliyetin %10'undan

fazladır. İncelenen inşaat makineleri parkının optimum lokasyonunun bulunması maliyet tasarrufu sağlamıştır. Anysz vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma toprak işleri maliyetinin azaltılmasını ve daha kolay kontrol edilmesini sağlayan bilgisayar destekli karar destek sisteminin başarılı bir örneğidir.

Karshenas (1989), hafriyatta yaygın olarak kullanılan yükleyici ve kamyonların özellikleri ve maliyetlerini dikkate alarak en uygun yükleyici kapasitesini araştırmıştır. Yükleyici-kamyon sisteminin maliyeti ve kazı hızı genel formüllerle hesaplanmakta ve elde edilen değerler karşılaştırılarak incelenen bir proje için en düşük maliyetli yükleyici-kamyon filosu bulunmaktadır.

Bir yükleme ünitesi ve birkaç kamyonadan oluşan bir hafriyat sisteminin saat başına kararlı durumda beklenen üretimi Eşitlik 2’deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_k = P_t \times Q_l \quad (2)$$

P_t yükleme alanında bir veya birden fazla kamyon bulunma olasılığı, Q_l kamyonun ortalama yükleme birim üretkenliğidir.

Hacim kapasitesi q 'ya eşit olan bir kamyon için ortalama yükleme süresi Eşitlik 3’teki formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_l = \frac{qt \times t_c}{(q_l + b_f)} \quad (3)$$

t_c çevrim süresi, q_l kepçe kapasitesi, b_f kepçe doldurma faktörüdür. Yükleme ve bekleme süreleri hariç ortalama kamyon seyahat süresi, taşıma, boşaltma ve dönüş sürelerinin toplamı olarak Eşitlik 4’ teki formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_t = \frac{L}{v_h} + \frac{L}{v_r} + t_d \quad (4)$$

L mesafe ve dönüş yollarının uzunluğu, V_h ortalama taşıma hızı, V_r ortalama dönüş hızı ve t_d boşaltma süresidir. Bir kamyon için motor beygir gücü açısından gereken güç Eşitlik 5’ teki formül ile hesaplanmaktadır.

$$HP \times a \times k = F \times v \quad (5)$$

HP motor beygir gücü, a bir kamyonun mekanik verimliliği, k birim dönüştürme faktörü, F kuvvet ve V hızdır. Bir ekipmanın yol üzerindeki hareketine karşı toplam direnci, yuvarlanma ve eğim dirençlerinden oluşur. $F = F_r + F_s$ denkleminde göre toplam yol direnci kuvveti Eşitlik 6’ da formül ile hesaplanmaktadır.

$$F = (W_t + W_w) \times (R + S) \quad (6)$$

Maksimum taşıma ve dönüş hızları $R+S>0$ için Eşitlik 7'deki formül ile hesaplanmaktadır. W , ekipman ağırlığını temsil etmektedir.

$$V_h = \frac{H_p \times \alpha \times k}{(W_t + W_w) \times (R + S)} \leq VI, \quad V_r = \frac{H_p \times \alpha \times k}{W_t \times (R + S)} \leq VI \quad (7)$$

V_h maksimum taşıma hızı, V_r maksimum dönüş hızı, VI hız sınırıdır. Ortalama kamyon seyahat süresi Eşitlik 8'deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_t = \frac{L \times (W_t + W_w) \times (R + S)}{H_p \times \alpha \times k \times \beta} + \frac{L \times W_t \times (R + S)}{H_p \times \alpha \times k \times \beta'} + t_d \quad (8)$$

β ve β' maksimum taşıma ve dönüş hızlarını ortalama hızlara dönüştüren hız faktörleridir. β ve β' tahminleri General Motors tarafından verilmektedir. Üretim başına maliyet Eşitlik 9'daki formül ile hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{(N_t \times C_t) + C_l}{Q_k} \quad (9)$$

C_t ve C_l sırasıyla kamyon ve yükleyici saat başına sabit ve işletme maliyetleri, N kamyon sayısıdır. Denklemdaki değişkenlerin sayısını azaltmak için Caterpillar Ekipman Maliyet Rehberinden (1986) ekipmanın sabit ve işletme maliyetleri elde edilmiştir.

Belirli bir proje için en uygun yükleyici-kamyon filosu iki gereksinimi karşılamalıdır. İlki, Tam kaldırmada yükleyici boşaltma yüksekliği, seçilen kamyon boyutu yükleme yüksekliğinden daha büyük olmalıdır. İkinci olarak optimizasyon modelinin değişkenlerinden hiçbiri süresiz olarak artamayacağından çeşitli proje koşulları için optimal yükleyici-kamyon filo kombinasyonlarını araştırmak için bilgisayarlı bir doğrudan arama yöntemi kullanılabilir.

Örnek çalışmada 10 ila 30 dakika arasında değişen proje faktörleri için optimum ekipman kombinasyonları araştırılmıştır. Bir bilgisayar programıyla elde edilen grafiklerle çeşitli yükleyici kapasiteleri için üretim maliyetini en aza indiren kamyon kapasitesi-sayı kombinasyonları aranmıştır.

Çalışma sonucunda belirli bir yükleyici için en uygun kamyon kapasitesinin yükleyici kapasitesinin yaklaşık 5 ila 7 katı olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda hafriyat maliyetini azaltmak için en büyük yükleyici kapasitesi ve o yükleyici için optimum kamyon kombinasyonu kullanılmalıdır. Karshenas (1989) tarafından sunulan grafiksel çözümler, pozitif toplam yol direncine sahip projelere en uygun filo kombinasyonlarını seçmek için basit ve hızlı bir yöntem sağlamıştır. Sunulan sonuçlar, kuyruk teorisi kullanılarak doğru ve güvenilir filo üretiminin elde edilebileceği varsayımına dayanmaktadır. Birim maliyet eğrileri ekipmanın sabit ve işletme maliyetlerinin değişimine göre periyodik olarak güncellenmelidir.

Bettemir (2009), Hava durumu, zemin koşulları ve operatör verimliliği ile ilgili belirsizlikleri ve riskleri Monte Carlo analizi ile modellemiş ve bu etkenlerin iş bitirme süresine ve ekipman ihtiyacına olan etkilerini incelemiştir. Proje planlamasında iş makinelerinin saatlik kapasitelerinin tahmini için Nunnally (2001) ve Caterpillar (1979) tarafından hazırlanmış tablolardan yararlanılmıştır. Çalışma, sadece ekskavatör ve damperli kamyonlar üzerine yapılmıştır. Elde edilen değerlerin belirsizliğinin hangi aralıkta olduğu ise Monte Carlo analizi ile tahmin edilmiştir. Monte Carlo analizi beş adımdan oluşmaktadır (Helton,1993).

Örnek çalışma, 50.000 m³ kazı hacmi içeren yol inşaatının küçük bir bölümünde uygulanmıştır. Mevcut veriler arasında hava tahmin raporları, zemin koşulları, yol durumu ve iş makineleri ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Meteorolojiden alınan hipotetik hava tahmin raporu 49 günlük yağış tahmin oranlarını içermektedir. Kazı çalışmalarının 1,5 m³ kova kapasitesine sahip bir ekskavatör ile yapılması planlanmıştır. Hafriyat için kullanılacak yollarda dolu ve boş kamyonların ortalama hızları için zeminin su muhtevası ve ortalama hız bağıntısından yararlanılmıştır. Bu çalışmada belirsizlik tahmini için 1000 kere tekrar yapılmıştır. Elde edilen belirsizlik verilerinde kazı işinin en olası 39 günde bitirilebileceği öngörülebilmektedir. Parametrelerin standart sapmalarının ortalama değerleri ile oranlarına bakıldığında kazı yapılamayan günler ile kazı bitiş süresi değerlerinin yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sebeple ihale öncesinde kazı bitiş süresini doğru tahmin edebilmenin en güç kısım olduğu öngörülmüştür. İncelenen değerlerin histogramları oluşturulmuş ve belirsizliğin boyutu tahmin edilmiştir. Kamyonların gidiş-dönüş yollarındaki zemin koşullarının belirsizliğinin giderilmesi veri doğruluğunu

arttıracaktır. Yapılan 269 analizde hava muhalefeti nedeni ile hiç iş duraksamasının olmadığı gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda ortaya çıkan inşaat süresi ve makine-saat histogramları belirsizliğin dağılımı ve aralığı hakkında önemli bilgiler sunmakta ve proje planlamacılarına önemli ipuçları vermektedir.

Lim vd.(2018), ağır hizmet tipi bir ekskavatörün hafriyat paketine ve iş koşullarına göre en uygun konfigürasyonu seçen Ekonomik Ekskavatör Konfigürasyon Sistemini geliştirmiştir. Yöntem, eko-ekonomik ekskavatör işletme uygulamasında hesaplama yönteminin kullanılabilirliğini geliştirmek için MATLAB ile kodlanmıştır. Maksimum kazı derinliği, motor kapasitesi, kepçe boyutu ve yakıt tasarrufu modunun başlaması gereken zamanlamanın en uygun kombinasyonunu tanımlar. Sistem, hafriyat paketinin kontrol hesabı bilgileri olan birim maliyet (BM), hedef süre (HS), günlük çalışma saatleri (GS), ortalama kazı derinliği (OD), toprak sınıfı (TM) ve toplam iş hacmini (VT) bir matristen okur. TM ile ilişkilendirilen Kova doldurma faktörü (Ff) değeri başka bir matristen elde edilir.

Ekskavatör adı (E), maksimum kazma derinliği (MD) ve maksimum yükleme yüksekliği (MH) göz önüne alındığında, sistem bir yapılandırılmış sorgu dili (SQL) oluşturur, ekipman veritabanını sorgular ve mevcut ekskavatörlerin özelliklerini alır. Kepçe boyutunun saatlik doğal üretim miktarı eşitlik 10 ile hesaplanır.

$$P_{ij} = \frac{3600 \times 0,76 \times Q_g \times f \times F_f \times f_1 \times f_2 \times t}{C_m} \quad (10)$$

Q_g saatlik gevşek üretim, f toprak hacmi dönüştürme, F_f kova dolum, f_1 ekskavatörün dönüş derinliği, f_2 verimlilik, t çalışma süresi faktörleri ve C_m saniye cinsinden çevrim süresidir. Yöntem, maksimum saatlik üretimi gerçekleştiren maksimum kesme derinliği (i), kepçe boyutu (j) ve motor kapasitesinin (HP) en uygun kombinasyonunu $[i,j,HP]=\max(P_{ij})-1$ formülü ile tanımlar. Toplam iş tamamlama süresi $TT=VT/P_{ij}$ formülü ile hesaplanmaktadır. Sistem toplam iş tamamlama maliyeti denklemleri olan $CT_{ij}(1)$ ve $CT_{ij}(2)$ 'yi karşılaştırarak, beklenen toplam kârı maksimize etmek için hangi seçeneğin daha uygun olduğunu Eşitlik 11 ile kontrol eder.

$$CT_{ij}(1)=\text{floor}(TT_{ij}/GS) \times (CH_{ij} \times GS + CI) + CE; OT=1$$

$$CT_{ij}(2)=\text{ceil}(TT_{ij}/GS)\times(CH_{ij}\times GS+CI); OT=2 \quad (11)$$

CH saatlik sabit ve işletme maliyetini, CI bir iş günü maliyetini, CE ise beklenmedik ekstra maliyeti ifade etmektedir. Bir ekskavatörün beklenen toplam karı $PT_{ij}=BM\times VT-CT_{ij}$ formülü ile hesaplanmaktadır. Kullanıcı tarafından sorgulanan bir son tarih (TU) ve kullanıcı tarafından sorgulanan bir kâr marjı (PU) ile işi tamamlama olasılığı $Pr(TT\leq TU)=\Phi(TU-\mu/\sigma)$, $Pr(PT\leq PU)=\Phi(PU-\mu/\sigma)$ formülleri ile ortalama (μ) ve standart sapma (σ) kullanılarak analiz edilir. Sistem, TT, CT ve PT'si ile maksimum kazı derinliği, kepçe boyutu ve HP'nin optimum konfigürasyonuna sahip bir ekskavatörü önerir.

Alanı, ortalama kazı derinliği, toprak türü, işin tanımı ve işin birim fiyat verileri girilen örnek bir çalışmada, Farklı maksimum kazı derinliği, motor gücü ve kova boyutu numaralandırmasına sahip tüm ekskavatörler için saatlik üretim miktarlarını hesapladıktan sonra, deterministik moddaki yöntem, maksimum kazma derinliği, HP ve kova boyutunun optimal kombinasyonunun sırasıyla 19.4 ft, 168 HP, 2.5 yd olduğunu doğrular. Ayrıca yöntem, en uygun konfigürasyona sahip ekskavatör kullanıldığında saatte 310.533 m³ doğal kazı üretim miktarının (P_{ij}) elde edildiğini hesaplar. Toplam iş tamamlama saatleri (TT_{ij}), son iş gününde kalan çalışma saatleri (HL_{ij}) ve son iş günü kazı yapılacak toprak hacmi (VL) sırasıyla 50,54 saat, 2,54 saat ve 788,75 m³ olarak hesaplanmıştır. Stokastik modda, maksimum beklenen toplam kâr 7.610 \$ olarak hesaplanmıştır.

Lim vd. (2018) maksimum kazı derinliği, motor boyutu (HP) ve eko-ekonomik kazı için kepçe boyutunun en uygun kombinasyonunu tanımlayan, kullanımı kolay bilgisayarlı bir sistem sunmaktadır. Sistemle ilgili kapsamlı matematiksel formüller, çok amaçlı hedeflerin yerine geçerek kazı sürecini hızlandırmaya katkıda bulunur. Sistem, tüm çözüm uzayını ayrıntılı bir şekilde aradıktan sonra bulunan kesin global çözümler ile hafriyat yöneticilerinin daha bilinçli kararlar vermelerini sağlar.

Güvenlik ve performans nedenleriyle, yol planlama gibi operatör yardım işlevleri, son zamanlarda araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Lastik tekerlekli yükleyiciler, çalışma alanlarında malzeme taşımak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şantiyelerin doğası değiştiği için tekerlekli yükleyicilerin kamyonları yükleme şekli de buna göre değişmektedir. Alshaer vd. (2013), bir yükleme döngüsünün hareket kısmı sırasında

mafsallı büyük bir tekerlekli yükleyici için yol planlaması ve takibi sunan bir metodoloji önermektedir.

İki boyutlu düzlemde herhangi iki nokta arasındaki en uygun yolu oluşturmak için bir algoritma geliştirilmiştir. Yolu oluşturmak için gerekli bilgiler, ilk olarak başlangıç noktasını gösteren global koordinata göre yığının konumu, kepçe yönü, hedef noktayı temsil eden kamyon pozu, maksimum yol eğriliği veya makinenin minimum dönüş yarıçapıdır. Yol, Reeds ve Shepp tarafından tanıtılan yol optimizasyonu için 68 ana kategori kullanılarak değerlendirilir. Hesaplama sayısını en aza indirmek için makine ve şantiye kısıtlamalarını kullanarak yollar, yalnızca tekerlekli yükleyicilere uygun olanlara indirgenmiştir. Ardından, şantiye kısıtlamaları uygulandıktan sonra kalan olası yollar arasında minimum toplam uzunluğa göre en uygun yol atanır. Optimal yol ve bölümleri hesaplandığında her bölüm için başlangıç ve bitiş noktalarının global koordinatları bulunur ve son olarak yol çizilir.

Bir kamyon yükleme döngüsü yürüten bir tekerlekli yükleyici için gerçekçi bir yol güzergâhına sahip olmak için tekerlekli yükleyicinin boyutu dikkate alınmalıdır. Tekerlekli yükleyici bir bağlantı noktası ile birbirine bağlanan iki ana bölümden oluşur. İki noktalı yol planlama yaklaşımı ile makine önce arka dingilin orta noktası baz alınarak geriye doğru gider ve sürüş yönüne göre yol planlanır. Makine geriye eğik gidişatını tamamladığında arka kısımdan ön bölüme geçişi kolaylaştırmak için yola ek düz kısa bölüm eklenmiştir. Düz kısım, optimum yolun ileri kısmının başlangıcına ön dingil orta noktasını koymaya yardımcı olur. Kontrolörün aracı planlanan yol üzerinde yönlendirmesini sağlamak için yer değiştirme hatası (DH), yön hatası (YH) ve eğrilik hatası (EH) verileri sayesinde makinenin varsayılan yolu ile karşılaştırıldığında makinenin gerçek konumu hakkında geri bildirim alınır. Örnek bir çalışmada tipik bir kamyon yükleme çevrimi için makul bir başlangıç (kazi yeri) ve bitiş (kamyon yeri) noktaları seçilir. Yer değiştirme hatası, makinenin başlangıç noktası dışında istenen yoldan yarım metre uzakta kaldığını göstermektedir.

Sağlam ve Bettemir (2018) farklı zemin ve çevre koşullarını göz önünde bulundurarak hafriyat süresini ve gerekli kamyon sayısını tahmin eden bir yazılım geliştirmiştir. Ayrıca yazılım, taşıma mesafelerini ve iş koşullarını dikkate almaktadır. Şantiyelerde yaygın olarak kullanılan bazı ekskavatör ve kamyon modelleri,

geliştirilen yazılımda teknik özellikleri ile tanımlanmıştır. Kullanıcı tanımlı modeller arasından seçim yaptığıında kova hacmi, salınım süresi ve salınım-derinlik düzeltme faktörü seçilen ekskavatöre göre yazılım tarafından belirlenir. Saatlik kazı miktarı Eşitlik 12 ile hesaplanır.

$$Q_e = \frac{(qh \times kd \times 3600)}{C_s \times k_{ad} \times k_e} \quad (12)$$

Q_e gevşek hacim cinsinden saatlik kazı miktarını, qh m³ biriminde kova hacmini, kd kova dolum faktörünü, C_s çevrim süresini, k_{ad} salınım derinliği faktörünü ve k_e iş verimliliğini temsil eder. Kazının tamamlanma süresi, Kazı Alanı*Kazı Derinliği/ Kazılan Doğal Zemin Miktarı formülü ile hesaplanır. İhtiyaç duyulan kamyon sayısı Eşitlik 13 ile hesaplanır.

$$KS = \frac{(t_l + t_d + t_h + t_s)}{t_l} \quad (13)$$

Denklemden t_l yükleme süresi, t_d boşaltma süresi, t_h taşıma süresi ve t_s durma süresini temsil eder. Denklemden kamyon yükleme süresi ve taşıma süresi kullanıcı tarafından belirlenir. Boşaltma süresi ve durma süresi sırasıyla 1 ve 2 dakika olarak alınmıştır. Kamyon yükleme süresi Eşitlik 14 ile hesaplanır.

$$t_l = \frac{K \times GCS}{GKH} \quad (14)$$

Denklemden K kapasite, GCS gerçek çevrim süresi, GKH gerçek kova hacmini temsil etmektedir.

Girdi parametrelerinin belirsizliği dikkate alınarak oluşturulan rastgele sayılarla Monte Carlo Simülasyonunda 1000 farklı senaryo için işin tamamlanma süresi hesaplanmıştır. Elde edilen iş tamamlanma sürelerine göre hesaplanan ortalama ve standart sapma değerlerinden bir olasılık dağılım fonksiyonu kurulur. Elde edilen olasılık dağılım fonksiyonundan hedef iş tamamlanma süresine ulaşma olasılığı Z-tablosu kullanılarak tahmin edilir. Yapılan analiz sonucunda, kova dolum faktörü ve kazı süresinin korelasyon katsayısı -0,35 hesaplanmıştır. Kova Dolum Faktörü arttıkça kazı süresi azalır. Hafriyat süresinin yanı sıra, gerekli kamyon sayısının hassasiyeti de araştırılmıştır. Kamyon sayısı

ile kova doldurma faktörü arasındaki korelasyon 0,39'dur ve bu iki parametre arasında güçlü bir korelasyonu temsil eder.

Kova dolum faktörü arttıkça gerekli kamyon sayısı artmaktadır. Çevrim Süresi ile İş Bitirme Süresi arasındaki korelasyon katsayısı 0,49 olarak hesaplanmıştır. Çevrim süresi arttıkça İş Tamamlama Süresinin arttığını ve döngü süresinin İş Tamamlama Süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çevrim süresi ile Kamyon Sayısı arasındaki korelasyon katsayısı -0,45 olarak hesaplanmıştır. Çevrim süresi arttıkça gerekli kamyon sayısı azalmaktadır. Salınım derinliği faktörü ile kazı süresinin korelasyon katsayısı -0,21 olarak hesaplanmıştır. Salınım Derinliği Faktörü arttığında İş tamamlama süresi azalır. Salınım Derinliği Faktörü ile Kamyon Sayısı arasındaki korelasyon katsayısı 0,26 olarak hesaplanmıştır. Salınım Derinliği Faktörü arttıkça gerekli kamyon sayısı da artmaktadır.

Chan vd. (1989) hızlı ve kolay erişilebilirlik için düzenlenmiş bir kayıt veritabanında kolayca tanımlanabilen, kapsamlı özelliklere sahip olan yükleyici-ekskavatörlerin teknik değerlerine göre proje için en uygun seçime odaklanan süreci açıklamaktadır. Seçim prosedürünü geliştirmeye yardımcı olması açısından Kepner ve Tregoe (1965) prosedürü uygulanmıştır. Proje ihtiyaçları göz önünde bulundurularak gereksinimler listesi İstek kriterleri ismi ile oluşturulmuştur. Bir sonraki adım olarak İstek kriterleri projedeki önem derecesine göre sıralanmış ve proje hedeflerini karşılayan makineler belirlenmiştir. Analiz prosedürü Symphony yazılım paketi aracılığıyla Ekipman Seçim Sistemi olarak bilgisayar ortamına entegre edilmiştir. Farklı kategorileri veya makine markalarını temsil eden 45 kayıttan oluşan bir veri tabanı, bir araya getirilen her bir kayıt için 32 alan ile birleştirilmiştir.

Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde, gerçekleştirilen toprak işinin kazı, taşıma, boşaltma vb. aşamalarında ekskavatör ve kamyon iş makineleri kullanılmıştır. Ekskavatör ve kamyon iş makinelerinin birden fazla modeli sisteme tanımlanarak, kova hacmi, motor gücü vb. gibi iş makinelerinin teknik özelliklerine göre oluşan projenin maliyet, süre ve iş verimi parametreleri analiz edilmiştir. İş makinelerinin çeşitli modelleri ve teknik özellikleri sayesinde yükleniciye birden fazla olasılığı analiz etme ve projesi için en uygun iş makinesi kombinasyonunu belirleme imkanı sunulmuştur. Hafriyat ve İş makineleri literatür çalışmalarında iş makineleri için kullanılan hesaplama denklemleri ve değer tabloları, Hafriyat Çerçeve Sistemi içerisinde kullanılmaktadır.

1.3. Konum Belirleme Sistemleri

Hafriyat güzergâhı, toprak işlerinin üretim verimliliğini ve maliyetini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Güzergâhın zemin türü, yol yapısı, eğimi ve toplam mesafesi üretim hızını etkilemektedir. Hafriyat güzergâhlarının gerçek zamanlı denetimi ve ölçümünü gerçekleştirmek toprak işlerinde kullanılacak doğru iş makinesi kombinasyonunun önceden belirlenmesine yardımcı olacaktır. Ancak toprak işlerinin yoğun olduğu dağlık bölgelerde merkezi yerleşimlerden uzakta olan inşaat sahalarının konum, yükseklik, mesafe ve görsel bilgilerini uydu görüntüleri aracılığı ile sunan Google Earth gibi uygulamalar yüksek çözünürlüğe ve doğruluğa sahip değildir. Bu yüzden iş makinelerinin geçtiği güzergâhları yüksek doğrulukta tespit etmek, projede kullanılacak en uygun iş makinesini belirleme, inşaat süresini ve maliyetini düşürme amacıyla proje çalışanlarının gerçekleştireceği iş planlaması ve analizlerine yardımcı olacaktır.

Toprak işi gerçekleştiren iş makinelerinin denetimi ve üretim hızlarının takibi üzerine literatürde önemli çalışmalar bulunmaktadır. GPS sistemlerinin yaygınlaşması ve konum belirleme hassasiyetlerinin iyileşmesi üzerine iş makinelerine hassas GPS'lerin yerleştirilip iş makinelerinin hareketlerinin izlenmesi ve inşaat kalitesi ve hızının denetlenmesi üzerine çok sayıda sistem geliştirilmiştir.

Baertlein vd. (2000) lazer destekli çift frekanslı gerçek zamanlı kinematik konumlama yöntemi ile santimetre altı hassasiyet elde ederek iş makinelerini izleyen ve özellikle yol inşaatlarında iş makinelerini yönlendiren makine kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Jonasson vd. (2002) ile Lee ve Han (2003) hassas GPS alıcıları kullanılarak oluşturulan makine kontrol sistemlerinin iş makineleri verimlerini önemli ölçüde arttırdığını ve hatalı kotta geçiş yapan dozer ve greyderlerin tekrar geçişlerini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Han vd. (2005) Web CYCLONE yazılımını kullanarak toprak işlerinin GPS tabanlı makine kontrol sistemi kullanılarak ve kullanılmayarak yapılması durumlarının simülasyonlarını yapmıştır. Simülasyon sonucunda GPS tabanlı sistemin geleneksel sisteme göre %32,48 daha verimli olduğu gösterilmiştir. Birim toprak işi maliyetlere ilişkin olarak, GPS tabanlı sistem %22,88 daha düşük maliyetlidir. Shengxiang vd. (2005) dolgu baraj inşaatında çalışan silindirlere hassas GPS alıcıları yerleştirerek iş takibini ve kalite kontrolünü artırmıştır.

Rausch (2010), iş makinelerine yerleştirilen GPS alıcılarından elde edilen veriler ile performans ve maliyet analizi gerçekleştiren hafriyat ve yol inşaatı endüstrisi için verim artışı sağlayan bir sistem geliştirmiştir. Sistem GPS alıcısından elde edilen konumu, zamanı, bir ekskavatörün kepçesinin koordinatlarını, yön ve açılardan oluşan veri setlerini kaydetmektedir. Belirtilen GPS tabanlı sistemler iş makinelerinin saatlik çevrim sayısını hassas ölçmekte fakat çok hassas konum belirleme cihazlarının kullanılması ve gelişmiş yapay zekâ yazılımı nedeniyle çok yüksek fiyatlara satılmaktadır. Pahalı olmaları nedeniyle CORS GPS tabanlı sistemler küçük ve orta ölçekli açık maden ocaklarında fazla talep görmemektedir.

Düşük maliyetli GPS sistemlerinin kullanımı üzerine literatürde önemli çalışmalar mevcuttur. Mathur vd. (2015) cep telefonunda bulunan GPS, ivmeölçer ve jiroskoptan faydalanarak bir ekskavatörün çevrim sayısını %74,7 doğruluk oranında tespit etmiştir. Pradhananga ve Teizer (2013) düşük maliyetli GPS kullanarak şantiyede git-gel yapan iş makinelerinin hareketlerini izlemişler ve kaç tur yaptıklarını tespit etmişlerdir. Kim vd. (2018) farklı amaçla kullanılan iş makinelerinin bir arada incelendiği durumda iş makinelerinin her birinin tur sürelerini tespit etmek için dinamik süre eğriliği (dynamic time warping) uygulamıştır. İş makinelerinin hareketlerini akıllı telefon üzerinde bulunan GPS alıcısı, jiroskop ve ivmeölçer ile ölçüp dinamik süre eğilmesi algoritması ile %91,83 doğrulukta tur süresi hesaplamıştır.

Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde, toprak işlerinin analizini gerçek koşullara bağlı şekilde gerçekleştirmek adına seçilen bir hafriyat güzergahının konum verileri, kullanılan bir araç üzerine yerleştirilen GPS konum belirleme sistemi sayesinde gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukta ölçülmüştür. Bu sayede hafriyat güzergahının gerçek zamanlı denetimi ve gözlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçümü gerçekleştirilen hafriyat güzergahının enlem, boylam ve yükseklik konum verileri sayesinde yolun yapısı, eğimi ve toplam mesafesi belirlenmiş ve iş makinelerinin yol güzergahının her ölçüm noktasında oluşturduğu hız ve süre değerleri incelenmiştir. Bu sayede yüklenici, en yüksek iş verimine en düşük maliyet değeri ile ulaşan en uygun iş makinesi kombinasyonunu belirleme imkanına sahip olmaktadır.

1.4. İnşaat Simülasyonu

Teknolojinin her geçen gün gelişmesi ile birlikte inşaat projelerinin yerinde gerçekleştirilmeden önce sanal ortamda bir kopyasını tasarlamak mümkün hale gelmiştir. Sanal ortamda yaratılan inşaat projesi sayesinde proje çalışanları iş gerçekleşmeden önce yaşanabilecek olumsuz durumları, zaman ve maliyet kayıplarını ve tekrarlanabilecek işleri önceden analiz etme imkânı bulmaktadır. Ayrıca birden fazla senaryo üzerinde durarak proje için en uygun ve verimli seçeneği belirleme imkânı bulmaktadır.

Simülasyon, gerçek sistem modelinin tasarlanması ve bu model ile sistemin davranışını anlayabilmek veya değişik stratejileri değerlendirmek için deneyler yürütülmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. Birçok endüstri, ürünlerini pazara sunmadan önce sanal ortamda ya da fiziksel prototipini oluşturarak kapsamlı bir şekilde test eder. İnşaat endüstrisinde ise bu durum farklıdır. Yapıların üzerinde yapılan neredeyse hiçbir test geri alınamaz ve genellikle testler çok maliyetlidir. İnşaat projelerinde farklı süreçlerin, sistem yaklaşımı çerçevesinde tanımlanarak modellenmesi mümkün olup, modellenmiş sistem üzerinde farklı senaryoların incelenmesi ve simülasyon uygulamalarının yapılması mümkündür.

Simülasyon yaklaşımının, inşaat sektöründe özellikle planlama aşamasında ve inşaat öncesi süreçlerde kullanılması ile büyük ve kapsamlı inşaat projelerinde verimli sonuçların elde edileceği açıktır. Kullanımında kolaylık sağlaması ve kısa sürede sistem performansının, farklı senaryolar altında değerlendirilerek, yönetici mühendislerle farklı bakış açılarını ve denemeleri uygulama fırsatının verilmesi, bu yaklaşımın en avantajlı özelliğidir. Bütün bunların yanında eğitim sisteminde, gerek lisans gerekse yüksek lisans programlarında bu yaklaşım kullanılarak öğrencilerin gerçek hayata hazırlanması da mümkün olabilmektedir.

İnşaat sahaları, inşaat ekipmanları, işçiler ve malzemeler arasındaki çok sayıdaki etkileşim nedeniyle dinamik bir ortamdır. Bu dinamik ortam, inşaat işçilerinin ve ekipman operatörlerinin birbirlerini görememelerine sebep olan kör noktalar oluşturur. İnşaat sektöründe ölüm ve yaralanmaların başlıca sebebi, saha çalışanlarının ve ağır inşaat ekipmanlarının kör noktalar sebebiyle birbirlerine tehlikeli yakınlaşmalarından kaynaklanır. İnşaat uygulamalarında geleneksel güvenlik planlaması, iki boyutlu çizimler

veya saha gözlemleri ile oluşturulur. Ortaya çıkan güvenlik planları, geçmiş çalışma alanı bilgilerini ve çalışmanın gerçekleştirildiği koşulu tasvir eden bağlamsal bilgileri depolamamaktadır. Bu durum, bir inşaat projesinde işçi güvenliğini ve üretkenliğini büyük ölçüde engelleyebilecek çalışma alanı tıkanıklığına yol açabilir. Bununla birlikte, inşaat işçilerine atanmış görevler zamanında tamamlanmadığında, çalışma alanının doluluğu ve görevlerin mekânsal-zamansal karşılıklı bağımlılığı nedeniyle tüm proje gecikmeye meyilli hale gelir. İnşaat sektörünün önemli çalışma konularından biri, inşaat işçilerine uygun görevlerin atanmasını sağlayan destek sistemlerinin geliştirilmesidir.

Bazjanac (2006) Sanal Bina Ortamı (SBO) oluşturarak yapıların sanal ortamda deneylerini ve testlerini verimli şekilde gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. SBO, bir grup endüstri yazılımının, bu yazılımın kullanımında uzman olan endüstri çalışanları tarafından çalıştırıldığı ortamdır. Birden çok kaynak tarafından üretilen verilerin eşzamanlı simülasyonunu ve görüntülenmesini içerir. Bir SBO, endüstri projeleri için yazılım dağıtım merkezi, bir eğitim merkezi ve bir bilgi ve teknoloji geliştirme merkezi işlevleri görür. SBO, yerleşik ve yeni endüstri yazılımlarının kullanımında anında uzman desteği sağlar. SBO uzmanları, proje için doğru yazılımın seçilmesine yardımcı olur ve çalışanların yazılımı kullanmasına kolaylık sağlar. SBO inşaat sektöründe, inşa etmeden önce daha kapsamlı test fırsatı, projelerin daha iyi tasarlanması, binayı çok daha az maliyetle ve daha az sorunla işletme, binanın erken teslimi, işlerin ve ürünlerin değerinin artması gibi faydalar sağlar.

Haziran 2004'te Tampere Teknoloji Üniversitesinde Laitinen ve Hietanen tarafından gerçekleştirilen Aurora II VBE projesi kapsamında, proje geliştirme aşamasındaki iki tasarım alternatifini karşılaştırmıştır. İki alternatif için sanal binalar oluşturularak ve i-Room'da proje müşterisiyle eşzamanlı tartışarak, geleneksel analizler sonucunda oluşan erken inşaat maliyeti tahmini yanlışlığını $\pm\%20$ 'den $\pm\%3$ 'e, yaşam döngüsü maliyeti tahmini yanlışlığını $\pm\%25$ 'den $\pm\%5$ 'e düşürmüştür. Bilgi modelleme ve sanal binaların, YBM yazım sorunları, yazılım erişiminin kalitesizliği, veri sıralaması sorunları ve kullanıcılar için yol gösterecek yardımların eksikliği nedeniyle ilerleme süreci yavaşlamaktadır. VBE kullanabilen uzmanların sayısı artar ve SBO için yeterli seviyede kılavuz, vaka çalışması yayınlanırsa bu sorunlar ortadan kalkabilir.

Proje yöneticilerinin çalışma alanı doluluğunu ve şantiyelerdeki dinamik işgücü değişimlerini uygun bir şekilde izlemek ve temsil etmek için etkili bir araçları bulunmadığı için Yang vd. (2017) inşaat görevlerinin mekânsal-zamansal karşılıklı bağımlılığını açık bir şekilde izlemek ve ölçmek için yeni bir karşılıklı bağımlılık ağı yaklaşımı sunmuştur.

Önerilen yöntem 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, gerçek zamanlı konum izleme sistemleri tarafından ölçülen konum izlerinden bir ısı haritası oluşturulmuştur. Isı haritasında şantiyenin tamamı satranç tahtası benzeri 2D ızgaralara bölünmüştür. Bu çalışmada işçiler için ızgaralar 2mx2m olarak tanımlanmıştır. Belirli bir hücredeki yoğunluk, işçilerin o hücredeki aktiviteye daha fazla çaba ve zaman harcadığını göstermektedir. Bu aşama, bireysel çalışanın yörüngesinin belirli bir görevle ilişkili birim zamanda dağılımına dayalı iki değişkenli bir histogram çıkarmaktadır. İkinci aşamada, karşılıklı bağımlılık düzeyi hesaplanmaktadır. Çalışma alanları arasındaki bağımlılığın bir göstergesi olarak İkili Jaccard Mesafesi (İJM) (*Binary Jaccard Distance (BJD)*) kullanılmaktadır.

İJM, Eşitlik 15 ile belirlenir.

$$\frac{|X \cup Y| - |X \cap Y|}{|X \cup Y|} \quad (15)$$

Burada X ve Y, sırasıyla iki işçinin iki değişkenli histogramlarını düzleştirmekten türetilen vektörleri temsil eder. Karşılıklı bağımlılık endeksi bir birimden mesafeyi çıkararak hesaplanabilmektedir. Son aşamada karşılıklı bağımlılık ağı, birbirine çizgilerle bağlanan bir dizi köşe noktasını kapsayan bir grafikte görselleştirilir. Karşılıklı bağımlılık ağının geçerliliğini incelemek için, Shenzhen'deki çok katlı bir bina projesi kullanılmıştır. Mekânsal-zamansal verileri toplamak için 7 tesisatçı, 4 kaynakçı, 8 duvarcı, 6 çelik tamirci ve 6 marangozdan oluşan bir ekip seçilmiştir. Projeye göre, inşaat ekipleri arasında örtüşme olmamıştır. Görsel karşılıklı bağımlılık ağı aracılığıyla, yöneticiler mantıksız süreci belirlemiş ve işçilerin geri bildirimlerine dayanarak programı revize etmeye karar vermişlerdir. Karşılıklı bağımlılık ağı, görev atamalarının, çalışma alanı tahsisinin ve çalışma organizasyonunun yönetimine olumlu katkı sağlamıştır.

Endüstri Temel Sınıfları (*Industry Foundation Classes (IFC)*), YBM uygulamalarının birlikte çalışabilirliğini sağlamak adına tasarlanan açık ve tarafsız bir veri formatıdır. IFC standardı her türlü inşaat projesini temsil edebilecek şekilde tasarlanmıştır. YBM teknolojisi araştırmalarında ve gelişiminde neredeyse tüm IFC verilerinin özü olan geometrik gösterimi anlamak kritik bir öneme sahiptir. Ancak IFC şartnamelerindeki açıklamaları anlamak, belirli bir bilgi ve arka plan gerektirmektedir. Zhang vd. (2019) IFC verilerinin daha kolay anlaşılmasını kolaylaştırmak için seçilen bir AEC nesnesinin temel 3B temsillerinin etkileşimli bir görselleştirmesi, oyun simülasyonunda oluşturmuştur.

IFC’de geometrik bilgiyi temsil etmenin çeşitli yollarına rağmen, hepsi sonunda Kartezyen noktaları ile ilişkilidir. Bu nedenle Kartezyen noktalarının anlaşılması, IFC’deki geometrik bilgilerin anlaşılmasının anahtarıdır. Oyun simülasyonuna dayalı görselleştirme yöntemi, bir kartezyen noktayı temsil etmek için bir temel küp ve bir kartezyen noktası ile diğeri arasındaki bir ilişkiyi temsil etmek için renkli bir çizgi kullanır. Bir IFC veri örneği dosyasındaki kartezyen noktalarının sırası takip edilerek alınan veriler, oyun motoruna aktararak kartezyen noktaları ve bunların bağlantılı ilişkilerini birer birer görselleştirmiştir.

Yapılan deneyde, seçilen kesik koni şeklindeki köprü ayağı nesnesinin geometrik bilgilerini temsil eden kartezyen noktalar, kaynak IFC dosyasından Unity3D oyun motoruna aktararak görselleştirilmiştir. Sonrasında uygulanan görselleştirme 14 yüksek lisans öğrencisi tarafından test edilmiştir. Öğrencilerin yarısından önce açıklama materyalini okumaları sonra oyun simülasyonuna geçmeleri istenmiştir. Diğer yarısından ise tam tersini uygulamaları istenmiştir. Deney sonuçlarında, yazılı açıklama materyalini anlamak için geçen süre sırasıyla 225 s, 545.89 s, 1680 s minimum, ortalama ve maksimum değerlere sahiptir. Oyun simülasyon tabanlı görselleştirmeyi anlamak için geçen süre sırasıyla 80 s, 130.37 s, 480 s minimum, ortalama ve maksimum değerler ölçülmüştür. Bu değer yazılı açıklama materyalini anlama süresine göre çok daha kısadır.

İnşaat kazalarının %80’inden fazlası işçilerin güvenli olmayan davranışlarından ötürü yaşanmaktadır. Psikolojik faktörler, işçilerin davranışlarını doğrudan etkileyebilirler. Güvenli olmayan davranışların analizi, inşaat ortamında gereğinden fazla personel israfına, karmaşıklığa ve daha fazla güvenlik riskine yol açabilir. Yu vd. (2017) işçilerin psikolojik durumları ve güvensiz davranışları arasındaki ilişkiyi keşfetmek için sanal gerçeklik

(*Virtual Reality (VR)*) teknolojisinden yararlanarak sanal ortama dayalı deneysel bir yöntemi incelemektedir. İşçilerin psikolojik durumunu ölçmek için Pozitif ve Negatif Duygulanım Ölçeği (*Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)*) uygulanmıştır. Sanal inşaat ortamını yaratmak için başa takılan Oculus Rift tabanlı bir VR sistemi kullanılmıştır. Sanal ortamda kullanılan model ilk olarak Revit'te oluşturulmuştur. Sonrasında FBX dosyası olarak dışa aktarılmış ve Unity3D'ye aktarılmıştır. Oculus Rift ile uyumlu olan Unity3D'de modele fiziksel özellikler ve animasyonlar eklenmiştir. Psikolojik veriler, her inşaat operasyonundan önce ve sonra anketlerle toplanmıştır. Son olarak toplanan veriler psikolojik durumlar ve güvensiz davranışlar arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için analiz edilmektedir.

Sanal ortam modeli, beş katlı bir binanın, üç tarafı güvenlik korumaları ile çevrelenmiş çatı katıdır. Çatı katının köşe noktaları A, B, C, D şeklinde isimlendirilmiştir. Deney, işçilerden HMD VR sistemini takmalarını ve oluşturulan sanal ortamda üç tane tuğlayı B noktasından D noktasına kadar taşımalarını istemiştir. İşçilerin psikolojik ve davranış verilerini elde etmek için, B-A-D rotasında 1 PANAS testi, B-C-D rotasında 2 tane PANAS testi uygulanmıştır. Oluşturulan sanal ortam modeli yeterince gerçekçi değildir ve deney sırasında çalışanın psikolojik verileri elde edilememiştir. Daha gerçekçi bir VR modeli ve çalışanın fiziksel verilerini toplayıp gerçek zamanlı olarak psikolojik verilerle eşleştirebilen giyilebilir cihazlarla deney geliştirilebilir.

ABD' de son zamanlarda oluşan inşaat iş gücü sıkıntısı ve zaman verimliliği açısından çubuk yapıya kıyasla avantajları nedeniyle modüler yapının kullanımı artmıştır. Bununla birlikte, otomasyon teknolojilerinin geniş çapta benimsenmemesi nedeniyle konut birimlerindeki modüler yapının imalat ve montaj işlemleri hala çoğunlukla manuel olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, insan hatalarına, güvenlik sorunlarına ve işçilik kısıtlamalarına neden olabilir. Wong Chong vd. (2019) modüler yapıda otomasyonu analiz etmeye yardımcı olmak için YBM, oyun teknolojisi ve robotik teknolojisini kullanan bir modüler yapı simülasyonu önermektedir.

Geleneksel modüler yapı ve robotik teknolojili modüler yapı arasındaki verimlilik farkını analiz etmek için YBM üzerine inşa edilen oyun simülasyonu kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, Purdue Üniversitesi inşaat laboratuvarındaki gerçek inşaat işlemleri gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Unity oyun motoruna YBM entegre edilmiş ve

3Ds max ve Revit kullanılarak tek katlı bir ahşap bina, tasarım çizimlerine göre modellenmiştir. Robotik sistem olarak tekerlekli Fetch araştırma robotu seçilmiştir. Bileşenlerin modellenmesine ek olarak, inşaat laboratuvarında 3 DOF ağır hizmet vincinin hızını belirlemek için bir kova, önceden tanımlanmış olan bir a noktasından b noktasına taşınarak vinç simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında 100 saniyede, gerçek zamanlı olarak 109 saniyede bu işlem gerçekleşmiştir. Önerilen yöntemdeki tüm aşamalar uygulanmamıştır. Tüm aşamaların uygulanması ile simülasyon yönteminin modüler yapı üzerindeki etkisi tamamen analiz edilebilir. Tahmini zaman farkının %10'un altında olması, önerilen simülasyon yönteminin modüler yapı otomasyonu için umut verici olduğunu göstermiştir.

Teizer vd. (2015) saha işçileri ve ağır inşaat ekipmanları arasındaki etkileşimli tehlikeli yakınlık durumlarını kaydetmek, tanımlamak ve analiz etmek için bir algoritma sunmaktadır. Saha çalışanlarının ve inşaat ekipmanlarının konumu, GPS konum ölçerleri kullanılarak toplanır. Potansiyel etkileşimli mekânsal ilişkileri hesaba katmak için bir varlık ilişkisi modeliyle veritabanı oluşturulmuştur. Bu çalışmada, kullanılan ekipmanların etrafına uyarı bölgeleri belirlemek için iki tane yarıçap mesafesi atanmıştır. Birinci yarıçap mesafesi 12 m, ikinci yarıçap mesafesi 6 m olarak belirlenmiştir. Birinci yarıçap mesafesi yalnızca saha çalışanlarını, ikinci yarıçap mesafesi ise ekipman operatörünü uyarır. Saha işçisi ve inşaat ekipmanı arasındaki mesafenin önceden tanımlanan tehlikeli yarıçaptan daha az veya ona eşit olduğu süre, yakınlık tehlikesinin toplam süresi olarak sayılacaktır.

Georgia Teknolojisi Enstitüsü kampüsündeki bir şantiyede 2 mini yükleyici ve 2 inşaat işçisi veri toplama ve analiz için kullanılmıştır. GPS veri kaydedicileri inşaat ekipmanlarına ve işçilerin kasklarına etiketlenerek 1,5 saat süreyle konum verileri kaydedilmiştir. Deney raporunda tehlikeli yakınlık bölgeleri ve ayrıntılı bilgiler listelenerek kör nokta bölgesinde hangi işçilerin ne zaman ve ne kadar süreyle bulunduğu tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2015) inşaat güvenliğini ve inşaat planlamasını proaktif olarak iyileştirebilecek yeni bir YBM destekli yaklaşımı araştırmış ve prototip oluşturmuştur. İnşaat çalışma alanındaki işçilerin konum verileri, GPS veri kaydedicileri ile toplanmış ve çalışma alanına göre çalışma alanı parametrelerinin oluşturulması için algoritmalar geliştirilmiştir.

Çalışanların farklı aktivite seviyelerini görselleştirmek için bir doluluk ızgara modeli uygulanmıştır. Doluluk ızgarasını belirleyen algoritmalar ve TESLA Structures’da bulunan YBM görselleştirmesi sayesinde çalışma alanı geometrisi ve parametrelerin modellenmesi sağlanmıştır. Küçük boyutlu bir laboratuvar binası şantiyesinde geliştirilen sistemin denemesi yapılmıştır. Kaydedilen faaliyetler, binanın ikinci katındaki 9 beton kalıbının sökülmesi ile ilgilidir. Deneye katılan iki gönüllü işçinin kasklarına iki GPS alıcısı takılmıştır. GPS cihazının saha boyutları ve doğruluğuna bağlı olarak, doluluk ızgara modeli ile inşaat alanı 0,5x0,5 m² boyutlarda sanal karelere bölünmüştür. Beton kolonların kalıplarının sökülmesi için ortalama çalışma alanı parametreleri, çalışma bölgesinde çalışanların harcadığı tüm zamanın %50’si için 2 m, %75’i için 2,4 m ve %100’ü için 3,2 metredir. Sonuçlar, planlamacıların bir kolonun her bir tarafında yaklaşık 3.5 m’lik bir alanı engelsiz tutmaları gerektiğini göstermektedir. Yapılan çalışma tek iş grubunu gözlemleyerek oluşturulmuştur. İleride çeşitli iş faaliyetleri grupları arasındaki çalışma alanı çatışmasını gözlemleyerek yeni bir araştırma çerçevesi oluşturulabilir.

Hafriyat işlerinin simülasyonu, gelişim hedefine ulaşmak için desteklenmesi gereken işlerden biridir. Her tür inşaat için temel bir işlem olan toprak işleri, büyük ölçüde kullanılan ekipmana bağlıdır. Hafriyat alanındaki inşaat yönetimi rolü, hafriyat ekipmanının verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Ekipman kullanımı, büyük inşaat projeleri ve şirketleri için büyük bir masraf kalemi oluşturur. Ekipman yönetimi, projelerin zamanında ve bütçeye göre tamamlanmasını sağlamak için gereklidir. Ekipman yönetimi performansını değerlendirmek için ekipman kullanım oranları önemli bir ölçüt oluşturmasına rağmen kurumsal düzeyde ekipman yönetimi ile ilişkili lojistik çaba dikkate alınmamaktadır.

Endonezya’da kullarındaki ücretli yolların uzunluğu diğer ülkelere göre daha düşüktür. Ulaşım altyapısının gelişimi, ulusal ekonominin büyümesinde önemli bir role sahiptir. Rifai vd. (2018) ücretli yol inşaatı projesinin hafriyat işlerinde ekipman üretkenliğinin optimizasyonunu elde etmek için veri madenciliği yaklaşımına dayanan bir model sunmuştur.

Oluşturulacak model için hafriyat ekipmanı verimlilik verileri, ücretli yol işletmelerinden ve ücretli yol düzenleme kurumundan elde edilmiştir. Veri madenciliği

(Data Mining (DM)) algoritması, veriler üzerinde yorumlama ve diğer istatistiksel işlemler yoluyla çeşitli problemleri çözme becerisine dayalı olarak tahmin modeli oluşturur. Bu çalışmada, üç VM modeli olan çoklu regresyon (ÇR), yapay sinir ağı (YSA) ve karmaşık matematiksel ifadeler için vektör makinesi (VM) algoritmaları uygulanmıştır. Her model için MAD, MRSE ve R2 olmak üzere üç ölçüm yapılmıştır. Önerilen yöntemin ölçümleri sonucunda düşük MAD ve MRSE değerlerinin yanı sıra en yüksek R2 değerine sahip olan YSA algoritmasının kullanıldığı DM modeli, hafriyat ekipmanlarının verimliliği için en uygun tahmin modeli olarak seçilmiştir.

DM tabanlı optimizasyon, Pareto çözüm yaklaşımı ve çoklu üretim seçenekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, hazırlanan ekipmanların dağıtılmasının ardından verimliliğin arttığı ve her bir hafriyat ekipmanı grubundaki iş seviyesinin iyi yapılandırılmadığı ancak optimum dağıtımın oldukça iyi düzenlendiği gözlemlenmiştir. Hafriyat işinin tamamlanması, saha koşullarına, hava durumuna ve ekipmanın varlığına bağlıdır. Bu nedenle modelde bir miktar esnekliğe ihtiyaç vardır. Rifai vd.(2018), hafriyat işlerinin optimizasyonu için pratik bir alternatif sunmuştur.

Son yıllarda inşaat sektöründe hafriyat ekipmanları için yeni algılama ve bilgi sistemleri oluşumu ön plandadır. Özellikle ticari anlamda işletme maliyetlerini düşürmek, üretkenliği ve güvenliği arttırmak için birçok yeni sistem geliştirilmiştir. Azar vd. (2017) bu alanın sunduğu gelişmeleri, potansiyelleri ve sınırlamaları değerlendirmek için üç aşamalı bir literatür taraması araştırması yapmıştır. İlk olarak altı büyük sanayi kuruluşundaki gelişmeler tarafından sunulan son ürünler ve ekipman otomasyon çözümlerini araştırılmıştır. İkinci olarak inşaat mühendisliği ve otomasyon alanında yüksek etkiye sahip altı birinci sınıf akademik dergi seçilmiştir. Daha sonra, bu dergilerin her birinin arama motoru aracılığıyla, "hafriyat ekipmanı" için kapsamlı bir arama yapılmış ve araştırma makaleleri bulunmuştur. Son olarak, seçilen tüm makalelerin sonraki alıntıları Google Akademik'te aranmıştır. Toplamda incelenen 102 akademik makale, araştırmanın temelini oluşturmuştur.

Ekipman takibi ve filo yönetimi; güvenlik yönetimi; ekipman poz tahmini ve makine kontrol teknolojisi; ve uzaktan kumanda ve otonom operasyonu olmak üzere hafriyat ekipmanı otomasyonu dört ana alanda sınıflandırılabilir. Ekipman izleme ve filo yönetimi sistemleri, çoğunlukla ekipmanın yakıt tüketimini, çalışma ve boşa geçen

saatlerini ve konumunu izlemek için kullanılırlar. Bu sistemlerin çoğu geniş bir veri yelpazesi sağlamak için bir dizi yerleşik sensör ve küresel bir navigasyon sistemi (GPS) kullanır. Güvenlik Yönetimi, hafriyat şantiyelerinde ekipman, işçiler ve malzemeler arasındaki görünmez alan kazalarını önlemek adına GPS, radar, ultrasonik, manyetik alan, radyo frekansı ve görüntüleme sistemlerini kullanabilir. Ekipman poz tahmini ve makine kontrol teknolojisi, son efektör hakkında gerçek zamanlı, doğru poz bilgileri sağlamak için RTLS sistemlerini kullanır. Uzaktan kumanda ve otonom operasyonu, bir hafriyat ekipmanının kontrolsüz bir şantiye koşulunda hem uzaktan kumanda ile hem de otonom çalışması için navigasyon, 3B çevre modelleme, hareket planlama sistemlerini barındırır.

Mevcut filo yönetim sistemlerinin çoğu, genellikle zaman-mekân verilerinin derinlemesine analizinden yoksundur. Yapay zekâ yöntemlerinin geliştirilmesi bu problemin önüne geçebilir. Güvenlik yönetimi sistemleri, tehlikeli yakınlığı tespit etmek için sahadaki her işçinin navigasyon cihazları ile etiketlenmesine ihtiyaç duyar. Lazer tarama sistemi bu soruna katkıda bulunabilir. Ekipman poz tahmini ve makine kontrol teknolojisi, yaygın kullanımlarını sınırlayan pahalı RTLS'lere dayanmaktadır. Bu nedenle, akıllı telefonlar gibi uygun maliyetli çözümler geliştirilebilir. Uzaktan kontrol ve otonom operasyonu ise bugüne kadar tam olarak gerçekleştirilmemiştir.

Liu vd. (2019) sosyal ağ analizinin (SNA) nesneler arasındaki etkileşimleri ve ilişkileri inceleme yeteneğinden esinlenerek, proje sahaları ve ekipman atölyeleri arasındaki ekipman hareketini araştırmak için SNA tabanlı bir yöntem önermiştir. Ekipman dağıtımıyla ilişkili lojistik çabayı nicel ve güvenilir bir şekilde değerlendirebilen veriye dayalı bir performans ölçüm yöntemi önerilmiştir. İlk olarak ekipman izleme ve proje yönetim sistemlerinden toplanan veriler kaynaştırılır. Sonrasında veri bağdaştırıcısı, toplanan verileri düzenleyip sadece sosyal ağ modeli için gerekli olan verileri sağlayarak haritalanmış ekipman lojistik verilerini oluşturur. Veri bağdaştırıcısı için R Core Team istatistik yazılımı kullanılır. Haritalanan ekipman lojistiği verilerine dayanarak, sosyal ağ teorisi kullanılarak bir sosyal ağ modeli oluşturulur. Her bir ekipman atölyesinin yönetim kapsamını haritalamak için, Louvain yöntemi kullanılarak ağdaki topluluk yapıları tespit edilir. Atölyelerin önemini belirlemek için merkezîyet ölçümleri hesaplanır. Yeni DDI performans ölçütü daha sonra her bir atölyenin lojistik performansını değerlendirmek için kullanılır. DDI, 0 ile 1 arasında değişir ve daha büyük bir değer, geliştirilmiş gönderme verimliliğini gösterir.

2013 ile 2016 yılları arasında Kanada Alberta'daki bir inşaat müteahhidinden alınan verilerle bir vaka çalışması uygulanmıştır. Sosyal ağ modeli, yedi ekipman atölyesi ve 290 proje dâhil 297 düğümden oluşur. Louvain yöntemine göre dört yönetim alanı ve beş atölye tespit edilmiştir. Her atölyenin her yıl için ekipman yönetimi performansı DDI ve Ekipman kullanım oranı ile değerlendirilmiştir. Her iki ölçümün aynı anda incelenmesi, ekipman yönetimi uygulamaları hakkında daha fazla bilgi edinmeyi sağlamaktadır. Ayrıca israfı azaltmak ve genel proje sonuçlarını iyileştirmek gibi avantajlar sağlar.

Bettemir ve Yücel (2023) ile Bettemir ve Bulak (2022) inşaat süreci boyunca çalışma verimini tahmin ederek en düşük toplam maliyetli iş programını Genetik Algoritma ile optimize ederek elde etmiştir.

Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde, GPS modülü ile ölçülen hafriyat güzergahı konum verileri Microsoft Excel programında simüle edilerek hafriyat güzergahının yatay ve düşey grafikleri oluşturulmuştur. Bu sayede üzerinde çalışılan hafriyat güzergahının yol yapısı, viraj ve düz kısımları, yükseklik değerleri kullanıcı tarafından analiz edilebilmektedir. Ayrıca yüklenici Microsoft Excel ortamında yaratılan toprak işi projesi sayesinde iş makinesi modeli, iş makinesi teknik özellikleri, şantiye ve zemin koşulları, damper uzunluğu, damper hacmi vb. gibi birden fazla koşul üzerinde durarak proje için en uygun ve verimli iş makinesi kombinasyonunu test etme, analiz etme ve belirleme imkânı bulmaktadır.

1.5. Akıllı Ev Sistemleri

İnsanların güvenlik, konfor, iletişim, bilgi ve görüntü gibi çeşitli isteklerini sağlayacak olan sistemler üzerinde çalışılmış ve akıllı, elektronik sistemler geliştirilmiştir. Akıllı ev sistemleri, içerisindeki yerleşik elektronik sistemler sayesinde ev içerisinde bulunan cihazların, aydınlatma araçlarının, mutfak eşyalarının veya herhangi bir sistemin gerek akıllı telefon, gerekse tablet üzerinden otomatik olarak ev içerisinden veya uzaktan kontrolüne imkân tanıyan sistemlerdir. Bu sayede yaşam alanımızda bulunan her şeyin tek bir noktadan kontrolü sağlanabilmektedir. Akıllı ev teknolojisi, ev aletlerinin izlenmesini ve kontrolünü sağlayarak güvenilir ve konforlu bir yaşam sunmaktadır. Günümüzün akıllı evleri, daha iyi enerji verimliliği, daha fazla konfor ve daha düşük işletme maliyetleri gibi

daha iyi iş sonuçları için endüstriyel interneti kullanmaktadır. Sıcaklık, nem, doluluk, enerji kullanımı, yangın, duman, sel, güvenlik, asansörler ve hava kalitesi gibi çeşitli bina işletme parametrelerini ölçen binlerce sensör içerebilir.

Literatürde, metin, ses veya hareket komutlarını kullanan tek izleme ve kontrol moduna dayanan birçok sistem bildirilmiştir. Günümüzde çok sayıda ticari ev otomasyon sistemi bulunmaktadır. Birçok araştırmacı, GSM, Bluetooth ve Wifi tabanlı ev otomasyon sistemlerini tasarlamıştır. Ancak bu ev otomasyon sistemleri, sınırlı kullanım için tasarlanmıştır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte tamamen bağımsız ve kullanımı genişletilebilir bir ev sistemi yaratılabilir.

Nesnelerin İnterneti (IoT), akıllı telefonlar, kişisel bilgisayarlar ve tabletler gibi çeşitli nesne türlerini internete bağlamak olarak tanımlanabilir. IoT teknolojisinin ortaya çıkmasıyla birlikte ev otomasyonunun araştırma ve geliştirme çabaları popüler hale gelmiştir. Bu teknoloji ile birlikte ev aletlerinin çoğu, insanların yaşam standartlarını iyileştirmek adına kontrol edilebilir ve izlenebilir.

Akıllı ev sistemlerinin tercih edilmesinin başlıca sebepleri; güvenliğin artırılabilir olması, konfor koşullarını karşılayıp zaman tasarrufu ve kullanım kolaylığı oluşturması, enerji tasarrufunu sağlayabilen sistemler barındırması, ev aletlerinin uzaktan görüntülenebilir olması ve fiziksel engelli ve yaşlı bireylere yönelik donanımları içerisinde barındırmasıdır.

Lakshmi vd. (2019) belirtilen parametrelerin kabul edilebilir bir aralıkta kalmalarına yardımcı olmak için, IoT tabanlı bir akıllı güneş enerjili ev sisteminin tasarımını ve otomasyonunu sunmaktadır. Önerilen yöntemde sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu, yakınlık ve CO₂ seviyelerini ölçmek için tek bir merkezi kontrol cihazı seçilmiştir. Sıcaklık algılama için LM35 sensörü ve nem algılama için HIH4000 sensörü kullanılmıştır. Oda parlaklığı ölçümü için, Işığa Bağlı Direnç (LDR) kullanılmıştır. NodeMCU mikrodenetleyicisi, tüm sensörlerden toplanan verileri işler ve yönetir. Sensörlerden elde edilen verileri toplamak, görselleştirmek ve ev aletlerinin uzaktan kontrolü için EmonCMS bulut sunucusu kullanılmıştır. Evin güneş enerjisi panellerinin performansını etkileyen toz birikimi sorununu çözmek için kayar bir kapak ve fırça mekanizması kullanılarak otomatik güneş paneli temizleme sistemi oluşturulmuştur.

Toplanan verilere dayanarak, panellerin kapatılıp kapatılmayacağına karar verilebilir. Kullanıcılar, izlenen verileri cep telefonlarında veya tabletlerinde görüntülemek için Blynk uygulamasını kullanır. Blynk uygulaması kullanılarak cihazlar herhangi bir zamanda durdurulabilir veya çalıştırılabilir. Otomatik güneş paneli temizleme sistemi, ışık yoğunluğunu algılamak için bir LDR ile tasarlanmıştır. Kenarında fırça bulunan kapak, PV panelini temizlemek için her sabah “içeri” ve her akşam “dışarı” hareket eder ve onu uygun şekilde açar ve kapatır. Çalışma sayesinde yeşil, akıllı, taşınabilir ve uygun fiyatlı bir güneş enerjili ev sistemi oluşturulmuştur.

Kumar vd. (2016) farklı bileşenlerin kombinasyonu ile bir IoT tabanlı akıllı ev sistemi oluşturmuştur. Bu sistem, ev aletleri kontrol sistemi ve akıllı kapı izin sistemi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Raspberry Pi2 model B ve Arduino Mega2560 sistemin ana bileşenleridir. Cihazların izlenmesi ve kontrol edilmesi için GUI arayüz sistemi, IoT teknolojisi ve elektrik anahtarları yöntemleri kullanılmıştır. Pi kamera, hoparlör, mikrofon ve LCD ekran Raspberry Pi2 model B'ye, dokunmatik ekran, röle panosu ve Hall Effect sensörü Arduino mega2560'a bağlanır. Röle kartı, ev aletlerinin güç kaynağı ile bağlantısını yapmak ve kesmek için kullanılır. Hall Etkisi sensörü, cihazlardaki akım akışını algılar. 2,4 inç TFT dokunmatik ekran, basmalı buton ve Hall Effect sensöründen giriş alır ve röle kartı ve LCD ekrana çıkış sağlar. Raspberry Pi, benzer şekilde ziyaretçinin sesini ve görüntüsünü işleyerek Pi kamera, buton ve I-ball mikrofondan girdi alarak çıkışı hoparlörün yanı sıra LCD ekrana sağlar. Yöntemin test edildiği deneysel çalışmada, kullanıcı ev otomasyon sistemine, IP adresi kullanarak akıllı telefondan veya bilgisayardan erişilebilir. Cihazlar ayrıca 2,4 inç TFT dokunmatik ekranda grafik kullanıcı arayüzü kullanılarak da kontrol edilebilir. Ayrıca kamera seçeneği ile birlikte akıllı evden canlı video akışı sağlanmaktadır. Diğer akıllı ev sistemlerine göre cihazların entegrasyonu yüksektir ve düşük maliyetlidir.

Hamdan vd. (2019) ev aletlerini izlemek ve kontrol etmek için IoT tabanlı Çift modlu bir sistem sunmaktadır. Önerilen yöntemin donanım mimarisi, oda sensörleri, bir ev sunucusu, bir bulut veritabanı sunucusu ve ev sahiplerinin mobil uygulamaları ile oluşmaktadır. Tüm oda sensörleri ve ev sunucuları, ARM tek kartlı mikrobilgisayar kullanılarak uygulanır. Her ARM kartında 1.2GHz hızlı CPU, 1 GB RAM, 32GB SD bellek, 4 USB, 2 SCI, 2 SPI, I2C gibi dâhili kablolu iletişim arayüzü, Bluetooth, WiFi kablosuz erişim noktası ve bir Ethernet portu bulunmaktadır. Wifi, oda sensörlerini ev

sunucusuna daha sonra da internete bağlamak için kullanılır. Ev sunucusu, oda sensörleri ve bulut veritabanı sunucusu arasındaki bağlantı olarak kullanılmıştır. Ev sahipleri, bulut veritabanı sunucusu aracılığıyla mobil cihazlarını kullanarak ev aletlerine erişebilmektedir. Önerilen yöntemin yazılım mimarisi üç ana modüle ayrılmıştır. Bunlar Oda Kontrolörü, Ev Sunucusu ve Mobil Uygulamadır. Oda Kontrolörü, deviceManager() işlevi ile sunucu tarafından gönderilen bir dizeyi komut haline çevirir ve bu komutları fiziksel aygıtlarda çalıştırır. Ev sunucusu için Raspberry Pi 3 kullanılmıştır. Ev sunucusu, net.createServer() işlevi ile bir soket oluşturur ve oda sensörlerinden gelen bağlantıları dinler. Mobil uygulama modülü, kullanıcıların ev aletlerini uzaktan izlemesi ve kontrol etmesi amacıyla dokunmatik ekran arayüzü ve Doğal Dil İşleme (NLP) uygulaması sağlamaktadır.

Reddy vd.(2016) internet üzerinden android uygulaması kullanılarak ev aletlerinin kontrolünü Arduino Mega mikrodenetleyicisi kullanarak sağlamış ve bir ev otomasyon sistemi oluşturmuştur. Fan hızını, ışık yoğunluğunu ve yağış varlığını kontrol etmek için LM35 sıcaklık sensörü, LDR ve yağmur sensörü kullanılmış ve Arduino kartına entegre edilmiştir. Kullanıcı ve Ardunio kartı arasındaki veri aktarımı için HLK-RM04 Wifi modülü kullanılmıştır. Wi-Fi modülü ve Arduino kartı MAX232 ile birbirine bağlanır. Ampuller ve fanlar, anahtar görevi gören röle aracılığıyla Arduino kartına bağlanır. Tüm cihazlar, Arduino Mega aracılığıyla LCD ekranda ve wifi aracılığıyla android cep telefonu uygulamasında görüntülenerek kontrol edilir. Voltaj değişimleri ile evdeki ışık ve fan cihazları kontrol edilmiştir. Işık yoğunluğu ve fan hızı kontrolleri android mobil uygulama kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yağmur yağdığında sesli uyarı yağmurun durumu hakkında bilgi vermektedir. Önerilen sistemin satışta bulunan ev otomasyon sistemlerine göre daha düşük maliyetli olduğu ayrıca ölçeklenebilirlik ve esneklik açısından daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Pavithra vd. (2015) ev aletlerini internet üzerinden izlemek ve kontrol etmek için IoT tabanlı bir ev otomasyon sistemi tasarlamıştır. Tasarlanan yöntemde, Kızılötesi sensör (IR), Pasif kızılötesi sensör (PIR) ve yangın algılama sensörü sayesinde algılanan sinyaller ve görüntüler Raspberry Pi aygıt yöneticisine gönderilmektedir. Raspberry Pi aygıt yöneticisi ile ev sahibi arasındaki iletişim için Wifi teknolojisi kullanılır. Ev sahibi, kişisel bilgisayarında veya tabletinde oluşturulan web sayfası aracılığıyla ev aletlerini izleyebilir ve kontrol edebilir.

IR sensör, kızılötesi ışığı algılama ünitesidir. Işıkları açmak/kapatmak için kullanılır. PIR sensörü insanları veya hayvanları algılamak için kullanılmaktadır. Yangın algılama sensörü, yangın algılandığında harekete geçen Işığa Bağlı Direnç (LDR) devre elemanından oluşur. Yangın algılama sensöründe kazanın anlık görüntülerini elde etmek için bir kamera takılıdır. Raspberry Pi, düşük maliyetli, kredi kartı boyutunda tek kartlı bir bilgisayardır. Yapılan çalışma sonucunda oluşturulan ev otomasyon sisteminde, Açık/Kapalı olup olmadıklarına bakılmaksızın her odadaki tüm ışıkların ve fanların durumu görüntülenmiştir. Pavithra vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın en önemli avantajlarından biri, ev aletlerinin hem windows hem de android'de kontrol edilebilmesi ve izlenebilmesidir. Pavithra vd. (2015), eve izinsiz giriş tehlikesini azaltmak ve acil çözümlerle yangın kazalarından korunmak için IoT tabanlı bir ev otomasyon sistemi sunmuştur.

Tez çalışmasında oluşturulan Hafriyat Çerçeve Sisteminde, hafriyat güzergahının gerçek zamanlı ölçülen konum verilerinin işlenip bilgisayara aktarım aşaması Akıllı Ev Sistemlerinde de kullanılan Ardunio Kart aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Akıllı Ev Sistemlerinin ev aletlerini gerçek zamanlı olarak uzaktan kontrol ve analizi, hafriyat çerçeve sisteminde de GPS modülü sayesinde elde edilen gerçek zamanlı hafriyat güzergahı konum verilerinin bilgisayara aktarımı sayesinde gerçekleşmiştir. Kullanıcı bilgisayar üzerinden gerçek zamanlı olarak iletilen verileri takip edip analiz edebilmektedir.

Tez çalışmasında, literatür çalışmalarında belirtilen Bilgi Teknolojileri, Hafriyat ve İş Makineleri, İnşaat Simülasyonu, Konum Belirleme Sistemleri ve Akıllı Ev Sistemlerinin belirli özelliklerinden yararlanılarak hafriyat güzergahının ölçümü ve sisteme gerçek zamanlı aktarımı ile birlikte toprak işlerini en düşük maliyette gerçekleştiren iş makinesi kombinasyonunu belirleyen toprak işleri otomasyon sistemini tasarlamak amaçlanmıştır.

Bilgi teknolojilerinin iş bölümleri arasındaki bilgi aktarımı ve projenin ilerleyen safhalarında oluşabilecek problemleri tasarım aşamasındayken tespit ederek düzeltmesi özellikleri uygulanan yöntemde kullanılmıştır. Hafriyat sırasında uygulanan kazı, taşıma ve boşaltma iş kalemlerine ait değer tabloları ve formüller kullanılmış ve sistemde çeşitli iş makinelerine bağlı olarak oluşacak zaman ve maliyet değişkenliklerini analiz etmek adına

belirli sayıda ekskavatör, kamyon vb. iş makineleri sisteme eklenmiştir. Toprak işlerini en düşük maliyetle ve en kısa sürede gerçekleştirecek olasılığı belirlemek ve analiz etmek için ortam, çalışma koşulu, kullanılan ekipman kombinasyonu, boyutu ve özellikleri gibi çeşitli değişkenlere bağlı olarak Microsoft Excel programında hafriyat çerçeve sistemi simüle edilmiştir. Oluşturulan sistemi gerçek bir güzergâh üzerinde analiz etmek için yapılan ölçümler GPS ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hafriyat güzergahının ölçüm verilerini GPS ölçüm cihazından alarak işlemek ve ölçüm verilerini bilgisayar ortamına aktarmak için akıllı ev sistemlerinde de kullanılan Arduino Kart kullanılmıştır. Bu sayede literatür çalışmasında belirtilen konulara bağlı olarak ölçümü gerçekleştirilen gerçek bir yol güzergâhı üzerinde kamyon, ekskavatör vb. gibi çeşitli iş makinelerinin farklı koşullar, olasılıklar ve teknik özellikler altında maliyet ve süre performansını analiz eden ve en uygun sonucu bulan bir hafriyat çerçeve sistemi oluşturulmuştur.

2.YÖNTEM

Günümüzde Hafriyat ekipmanı üreten şirketler, uzaktan çalışmayı gerçek zamanlı kontrole doğru iletirmek için 5G hücresel teknolojisini ekipmanlarına birleştirmeye odaklanmaktadır. 5G ağı ayrıca daha iyi uzaktan kontrol ve bağlantı için yapay zekâ, sanal gerçeklik ve IoT teknolojilerini geliştirmeyi vaat etmektedir. Akıllı ev sistemlerinin IoT teknolojisi kullanarak gerçekleştirdiği gerçek zamanlı uzaktan kontrol işleminin benzerini hafriyat ekipmanları üzerinde gerçekleştirmek için tez çalışmasında toprak işleri otomasyonunun oluşturulması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında oluşturulan hafriyat çerçeve sisteminde akıllı ev sistemlerinin sensörler ve mikrodenetleyiciler aracılığıyla elde ettiği gerçek zamanlı veri toplama ve kontrol özelliğinin hafriyat ekipmanları üzerinde GPS ölçüm cihazı ve Arduino Kart ile gerçekleştirilerek toprak işleri otomasyonu oluşturulmuştur. Akıllı ev sistemlerinin mobil cihazlar üzerinden internet aracılığıyla insanlara kendi özel alanındaki ev aletlerinin uzaktan ve gerçek zamanlı şekilde son durumunu aktarması durumu, hafriyat güzergahında iş makineleri ile gerçekleşecek olan toprak işlerinde de kullanılmıştır. Araç üzerine yerleştirilen GPS ölçüm cihazı ile ölçülen hafriyat güzergahı konum verileri Arduino Kart aracılığıyla işlenmiş ve gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu sayede hafriyat güzergahı üzerinde gerçekleşen toprak işlerinin saha ve hafriyat analizi ve maliyet tahminleri bilgisayar üzerinde oluşturulmuş ve gerçek zamanlı olarak takip edilmiştir.

Akıllı ev sistemlerinin konut yapılarında kullanımı belirli bir maliyet artışına sebep olmaktadır. Ev aletlerinin gerçek zamanlı verilerini sağlayan çeşitli sensörler, verileri toplayan ev ve bulut veritabanı sunucuları vb. gibi ekipmanlar birer maliyet faktörüdür. Ancak konut güvenliği, konforu ve takibi açısından kullanıcılara sağladığı avantajlardan dolayı ileride yaşanacak ciddi ekonomik kayıpları önlemektedir. Tez çalışmasında akıllı ev sistemlerine benzer şekilde oluşturulan toprak işleri otomasyon sistemi, Arduino Kart ve GPS modülü harici ek bir maliyete sahip olmamaktadır. Aynı zamanda toprak işleri sırasında kullanılan hafriyat güzergahı ve iş makinelerinin gerçek zamanlı kontrolü ve analizi sayesinde proje aşamasında oluşacak ek maliyet ve süre kayıplarını önceden tespit etme avantajı sağlamaktadır. Bu yüzden maliyeti düşük, kullanışı kolay, zaman ve maliyet tasarrufu sağlayan bir toprak işleri otomasyon sistemi oluşturulmuştur.

Toprak işlerinin en düşük maliyetle gerçekleştirilmesini sağlayan çerçeve sistem hafriyat güzergâhının ölçümü, iş makinelerinin saatlik üretim ve maliyet hesaplamalarının yapılması ve optimizasyon ile en uygun iş makinesi kombinasyonunun oluşturulması aşamalarını içermektedir. Hafriyat güzergâhının ölçümü sayesinde gerçek çalışma koşullarının bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmıştır. Çeşitli iş makinelerinin çerçeve sisteme eklenmesi ile birlikte iş makinelerinin gerçek yol güzergahı üzerinde gerçekleştirdiği saatlik üretim ve maliyet değerleri hesaplanıp analiz edilmiştir. Ek olarak damper hacmi, motor gücü gibi iş makinelerinin üretim performansını önemli ölçüde etkileyecek özelliklerin optimizasyonunun gerçekleştirilmesi planlanan toprak işinin maliyet ve iş verimi analizini gerçekleştirmeye olanak sağlamıştır.

2.1. GPS Ölçüm Cihazı ve Hafriyat Güzergâhı Ölçümü

Hafriyat güzergâhının gerçek zamanlı gözlemini ve ölçümünü gerçekleştirmek için Arduino Kart ve NEO-6M GPS modülü kullanılmıştır. Arduino, açık kaynak kodlu yazılım ve donanıma sahip bir mikrodenetleyici platformudur. Arduino, hem fiziksel olarak programlanabilir bir devre kartından (genellikle mikrodenetleyici olarak anılır) ve bilgisayarda çalışan, bilgisayar kodunu fiziksel karta yazmak ve yüklemek için kullanılan IDE'den (Integrated Development Environment – Entegre Geliştirme Ortamı) oluşmaktadır. Neo-6M modülü, yüksek performanslı U-blox 6 özelliğine sahip bağımsız bir GPS alıcı modüldür. 50 kanalda 22'ye kadar uydu izleyebilir, 2.5m Yatay konum doğruluğu ile saniyede 5 konum güncellemesi yapabilir. U-blox 6, 1 saniyeden daha kısa İlk Onarma Süresi (TTFF) sunar.

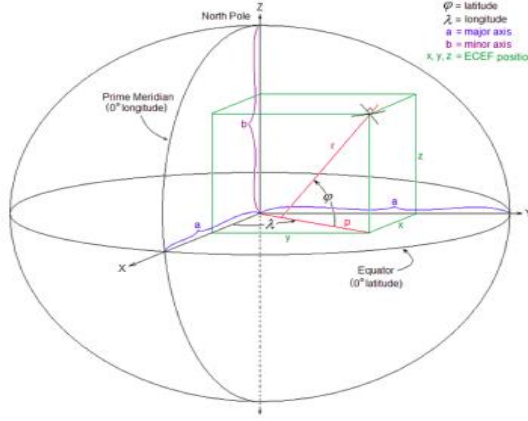
Gerçek ve yerinde bir uygulama gerçekleştirmek için Malatya - Kayseri yolu üzerinde bulunan Çevkur madenciliğe ait Çinko - Kurşun Açık Maden hafriyat güzergâhının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Hafriyat güzergâhı yarı toprak yarı asfalt yol türünde gidiş gelişin ortak olduğu, dik eğimli bir yoldur. Hafriyat güzergâhının yüksek doğrulukta belirlenebilmesi için bir araç üzerine NEO-6M GPS Modülü ile Arduino Kart'tan oluşan GPS ölçüm cihazı monte edilerek yeterli ölçüm hassasiyetinde ve ölçüm sıklığında hafriyat yolu ölçümü gerçekleştirilmiştir. Modülün konumlama hassasiyeti uydu görüntülerinden oluşturulan haritaların hassasiyetinden daha yüksektir (Bettemir, 2011).

Yolun enlem, boylam ve yüksekliğini ifade eden ölçüm değerleri Arduino üzerinde çalışan C tabanlı programlama dili ile geliştirilen yazılımla Arduino Kart üzerinden seri port kullanılarak bilgisayara gerçek zamanlı biçimde aktarılmış ve kaydedilmiştir. Şekil 1. a, b ve c’de oluşturulan GPS ölçüm cihaz tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 1.a. GPS Ölçüm Sistemi **Şekil 1.b.**GPS Ölçüm Sistemi **Şekil 1.c.**GPS Ölçüm Sistemi

Ölçüm verileri Putty yazılımı ile USB girişi üzerinden gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarılarak metin dosyası biçiminde kaydedilmiştir. Metin dosyası Microsoft Excel programıyla açılarak enlem, boylam ve yükseklik değerleri dosyadan çekilmiştir. Yolun bilgisayara aktarılan enlem, boylam ve yükseklik verileri Microsoft Excel programına aktarılarak hafriyat güzergâhı analizi ve hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Hafriyat güzergâh ölçümleri Yer Merkezli Yere Sabit Koordinat Sisteminde (Earth Centered Earth Fixed (ECEF) Coordinates) enlem boylam ve yükseklik olarak gerçekleştirilmektedir. Yer Merkezli Yere Sabit (ECEF) koordinat sistemi, "geleneksel karasal" koordinat sistemi olarak da bilinir. Dünyanın merkezi orijininde olan basit bir Kartezyen koordinat sistemidir. +X eksen Ekvator ve Asal Meridyen kesişiminden geçer. ECEF koordinatları, Dünya Jeodezi Sistemi 1984 (WGS84) standardı ile tanımlanır.



Şekil 2. WGS84 Geometrisi (Coordinate Transformations, Dr. John Stryjewski)

WGS84 tanımında a yarı ana eksen ve f düzleştirme parametresidir. Değerleri sırasıyla $a = 6,378,137m$ ve $1/f = 298.257223563$ olarak tanımlanmıştır. İlk eksantriklik Eşitlik 16 ile hesaplanır.

$$e = \sqrt{2f - f^2} \quad (16)$$

Asal düşey eksene göre eğrilik yarıçapı Eşitlik 17 ile hesaplanır.

$$N(\phi) = \frac{a}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin(\phi))^2}} \quad (17)$$

Elipsoid yüzeyini ifade eden enlem ve boylam değişimleri ilgili konumun asal düşey eksenine göre eğrilik yarıçapı ile çarpılarak yatay düzlem üzerindeki Euclid mesafesi Eşitlik 18’de ifade edilen formülle hesaplanır.

$$\Delta H_{i+1} = \sqrt{(p_{i+1} - p_i)^2 + (lam_{i+1} - lam_i)^2} \times \frac{\pi}{180} \times N(\phi) \quad (18)$$

Eşitlik 18’de noktalar arasındaki mesafe en fazla 15 metre olacağı için elipsoit yüzeyinin eğriliği ihmal edilebilir düzeyde hata doğurmaktadır. Eşitlik 19’da hesaplanan ardışık 2 nokta arasındaki yükseklik farkı ile yatay mesafenin oluşturduğu dik üçgenin hipotenüsünün uzunluğu Eşitlik 20’de ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$\Delta h_{i+1} = h_{i+1} - h_i \quad (19)$$

$$\Delta L_{i+1} = \sqrt{\Delta H_{i+1}^2 + \Delta h_{i+1}^2} \quad (20)$$

Tüm noktaların mesafe ölçümleri toplanarak hafriyat güzergâhının toplam uzunluğu belirlenir. Açık maden sahası hafriyat güzergâhında geliştirilen GPS ölçüm cihazı ile gerçekleştirilen ölçümde 640 noktada ölçüm yapılmıştır. Tablo 1’de Excel programına aktarılan verilerin bir kesiti gösterilmektedir.

Tablo 1. Konum ölçümlerinin bir kesiti

Ölçüm	N (phi)	E (lam)	h
1	381681219	380796797	1173,2
...	...	...	...
16	381681214	380797791	1172,6
17	381681285	380797867	1172,5
18	381681367	380797929	1172,2
19	381681492	380797960	1171,9
20	381681653	380797912	1171,6
21	381681819	380797783	1171,3
22	381681993	380797626	1170,9
23	381682188	380797483	1170,5
24	381682411	380797375	1170,2
25	381682669	380797330	1169,6
...	...	...	...
616	381901820	380906891	975
617	381902431	380906883	974,7
618	381903031	380906875	974,6
619	381903615	380906868	974,5
620	381904186	380906860	974,4
621	381904746	380906854	974,2
622	381905292	380906852	973,9
623	381905814	380906850	973,7
624	381906314	380906847	973,4
625	381906801	380906844	973,2
...	...	...	...
640	381911197	380906928	970,5

Tablo 2’de Eşitlik 16,17 ve 18 uygulanarak hesaplanan normal mesafe ile Eşitlik 19 ve 20 uygulanarak hesaplanan yatay mesafe ve toplam mesafe değerlerinin bir kesiti verilmiştir.

Tablo 2. Hafriyat güzergâhı ölçüm noktalarının mesafe kesiti

Ölçüm	N (φ)	Yatay Mesafe	Mesafe
1	6386305,535	0	0
...	...	...	...
16	6386305,535	1,541	1,592
17	6386305,537	1,159	1,164
18	6386305,540	1,146	1,184
19	6386305,545	1,435	1,466
20	6386305,551	1,873	1,896
21	6386305,557	2,343	2,362
22	6386305,563	2,612	2,643
23	6386305,570	2,695	2,725
24	6386305,578	2,762	2,778
25	6386305,588	2,919	2,980
...	...	...	...
616	6386313,554	6,933	6,936
617	6386313,576	6,811	6,818
618	6386313,598	6,688	6,689
619	6386313,619	6,510	6,511
620	6386313,640	6,365	6,366
621	6386313,660	6,242	6,245
622	6386313,680	6,086	6,093
623	6386313,699	5,818	5,822
624	6386313,717	5,573	5,581
625	6386313,735	5,428	5,432
...	...	...	...
640	6386313,895	0,016	0,101

2.2. İş Makineleri Teknik Verilerinin Tanımlanması

Hafriyat ve kazı işleri için yapılacak hesaplamalar Microsoft Excel programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hafriyat yapılacak kazı alanında gerçekleştirilecek kazı hacmi, planlanan günlük ve toplam çalışma saat verilerinin tanımlanması ile tüm

hesaplamaların yürütüldüğü bir çerçeve oluşturulmuştur. Kullanılabilecek çeşitli iş makineleri modelleri (ekskavatör, kamyon, buldozer vb.) program veritabanına eklenmiştir. 15 kamyon ve 15 ekskavatör modeli uygulamaya eklenmiştir. İş makinelerinin kapasitesi, motor gücü, ağırlığı, maksimum dolum yüksekliği, maksimum kazı derinliği gibi teknik özellikleri ve ilk yatırım maliyetleri veritabanına eklenmiştir.

Kullanıcı tanımlı iş makinelerinden birini seçtiğinde uygulamaya tanımlı teknik ve ekonomik özellikleri ilgili hesaplama hücrelerine aktarılır. Bu sayede ölçülüp Excel programına aktarılan yol güzergâhı üzerinde seçilen iş makinesi modelinin teknik özelliklerine göre birim zamanda gerçekleştirilecek iş ve maliyet hesaplanmaktadır. Kullanılacak iş makinesi sayısına ve modeline göre günlük üretim miktarı ve ulaşılması hedeflenen iş miktarı için gereken zaman belirlenecektir.

Kullanıcı, seçtiği seçeneklerle oluşacak süre ve maliyet değerlerini iş başlamadan önce görüp analiz edebilecektir. İsteddiği proje koşullarına en uygun iş makinesi kombinasyonunu iş başlamadan önce belirleyebilecektir. Kısa sürede az maliyet ile gerçekleştirilebilecek en çok iş yükünü sağlayacak olan iş makinesi modeli kombinasyonun tespiti amaçlanmaktadır. Çerçeve sistemde kullanılan Caterpillar Ekskavatör Modelleri, teknik özellikleri ve maliyetleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.Ekskavatör Modelleri ve Bilgileri

Ekskavatör Modeli	Maliyet	Motor Gücü	Kova Hacmi
320 GC	180.000	143	1
323	200.000	157	1,3
326	200.000	212	1,54
330	230.000	260	1,8
336 GC	230.000	262	1,88
345 GC	260.000	346	2,41
349	270.000	405	2,41
352	300.000	405	3,21
374	350.000	480	4,4
395	400.000	542	6,5
M320D2	400.000	166	1,18
M322D2	550.000	164	1,57

Tablo 4.'te çerçeve sistemde kullanılan Mercedes Kamyon Modelleri, teknik özellikleri ve maliyetleri gösterilmektedir.

Tablo 4. Kamyon Modelleri ve Bilgileri

Kamyon Modeli	Kamyon Maliyeti	Motor Gücü	Ağırlık (dolu)	Ağırlık (boş)	Kasa Uzunluğu
Actros L1848	290.000,00	408	48	8,27	3,65
Actros L1851	300.000,00	450	48	8,54	3,65
Actros 1842 LS	280.000,00	537	48	7,2	3,35
Actros 1845 LS	280.000,00	580	48	7,6	3,66
Actros 1832 L	250.000,00	360	48	6,5	5,20
Actros 2646	315.000,00	460	26	10,7	4,50
Actros 2641	260.000,00	408	26	10,5	3,15
Arocs 3240	330.000,00	435	32	9,7	4,75
Arocs 2032 K	350.000,00	503	20	6,8	4,75
Arocs 3332 K	380.000,00	279	33	8,9	5,75
Arocs 3345 K	390.000,00	279	33	9,5	5,75
Arocs 4145 K	420.000,00	401	41	10,6	6,54
Arocs 4148 K	270.000	354	41	11	3,35
Arocs 4851 K	300.000	300	48	11,1	3,35
Axor 2529 CD	290.000	300	25	8,1	3,35

2.3. Ölçüm Verilerinin Açık ve Kesitlere Çevrilmesi

Hafriyat güzergâhının detaylı hesaplamaları ve analizleri toprak işinin en düşük maliyet ile en kısa sürede gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Toprak işlerinde yüksek verimi sağlayarak proje süresi ve maliyetinin indirilmesini sağlayabilecek birçok aşama mevcuttur. En önemli aşamalardan birisi damperli kamyonun kazılan malzemeyi dolgu sahasına taşımasıdır. Damperli kamyonların taşıma işlemi sırasında ulaşacağı hız değerleri projenin verimini, süresini ve maliyetini etkilemektedir. Hız değerlerini tespit etmek için yol güzergâhının düz ve virajlı kısımlarının bilinmesi gerekmektedir. Ölçümler alınırken yoldaki çukur veya kasisten kaçmak için yapılan manevraların viraj olarak algılanmaması için ardışık 3 nokta birleştirilerek tek nokta haline getirilmiştir. Ölçüm noktalarının arası yakın olduğu için yapılan birleştirme hesap yükünü de düşürmektedir.

Güzergâh üzerindeki virajları ve virajların açısını belirlemek için ölçüm noktalarının oluşturduğu doğrultuların azimut açıları hesaplanmıştır. Eşitlik 21 ve 22’de azimut açısı hesaplamaları gösterilmiştir.

$$\arctan(p_i, lam_i) \times \frac{180}{\pi} > 0 \text{ ise azimut açısı;}$$

$$A = 360 - \arctan(p_i, lam_i) \times \frac{180}{\pi} \quad (21)$$

$\arctan(p_i, lam_i) \times \frac{180}{\pi} \leq 0$ ise azimut açısı;

$$A = - \arctan(p_i, lam_i) \times \frac{180}{\pi} \quad (22)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Denklemden A , azimut açısını ifade etmektedir.

Azimuth, bir gök cisminin gözlemciye göre istikâmetinin ufuktaki kuzey noktasından açısal uzaklık olarak ifadesidir. Gök cismini kesen dikey dairenin ufka değdiği noktanın referans noktasına (genellikle kuzey) açısal mesafesidir. Azimuth kavramı gündelik kullanımda daha çok pusula yönü anlamında kullanılır. Azimuth açıları kuzeyden saat istikametinde ölçülmektedir. 640 nokta için belirlenen azimuth açısının bir önceki noktaya göre farkları alınmış ve açı değişimleri belirlenmiştir. Eşitlik 23 ve 24'te açı değişim hesaplamaları gösterilmiştir.

$A_{i+1} - A_i > 300$ ise açı değişimi

$$\Delta A = A_{i+1} - A_i - 360 \quad (23)$$

$A_{i+1} - A_i < -300$ ise açı değişimi

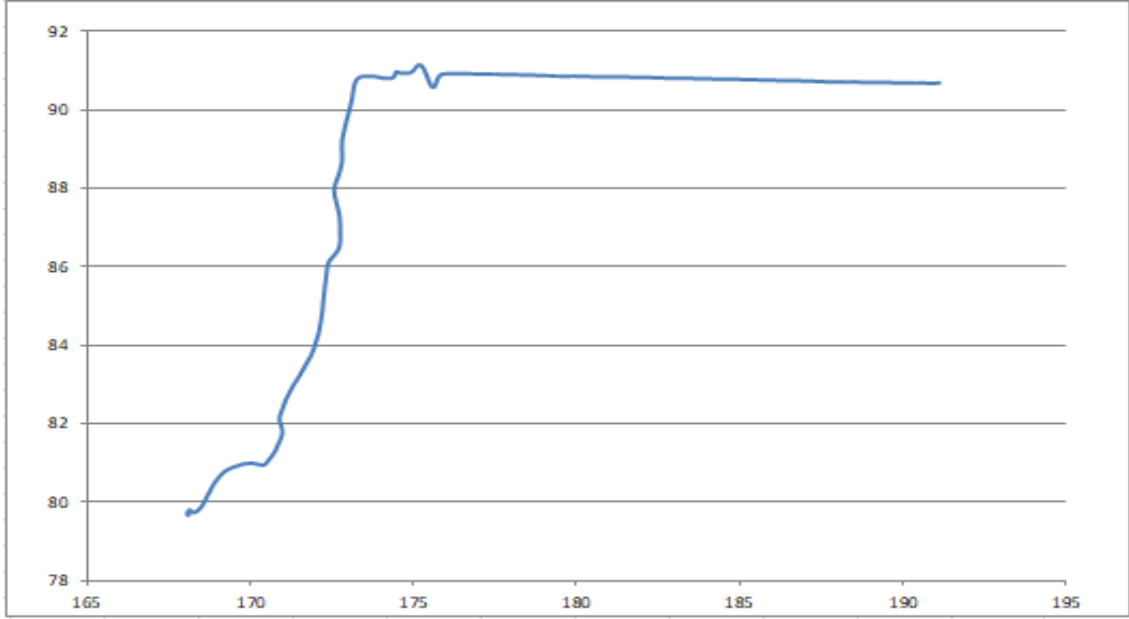
$$\Delta A = A_{i+1} - A_i + 360 \quad (24)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Noktalar arasındaki azimut açı değişimleri sayesinde yol güzergâhının yön olarak nasıl ilerlediği ve yolun düz ve viraj kısımlarının hangi bölgelerde yer aldığı belirlenmiştir. Ölçüm noktalarının oluşturduğu doğrultular, iki nokta arasındaki açı değişim değerleri negatif değere sahipse saat yönünün tersi, pozitif değere sahip ise saat yönünde ilerlemektedir. Noktalar arası açı değişimleri bulunduktan sonra viraj açısı, ardışık 3 açı değişim değeri toplanarak bulunmuştur. Eşitlik 25'te viraj açısı formülü gösterilmiştir.

$$\alpha = \Delta A_i + \Delta A_{i+1} + \Delta A_{i+2} \quad (25)$$

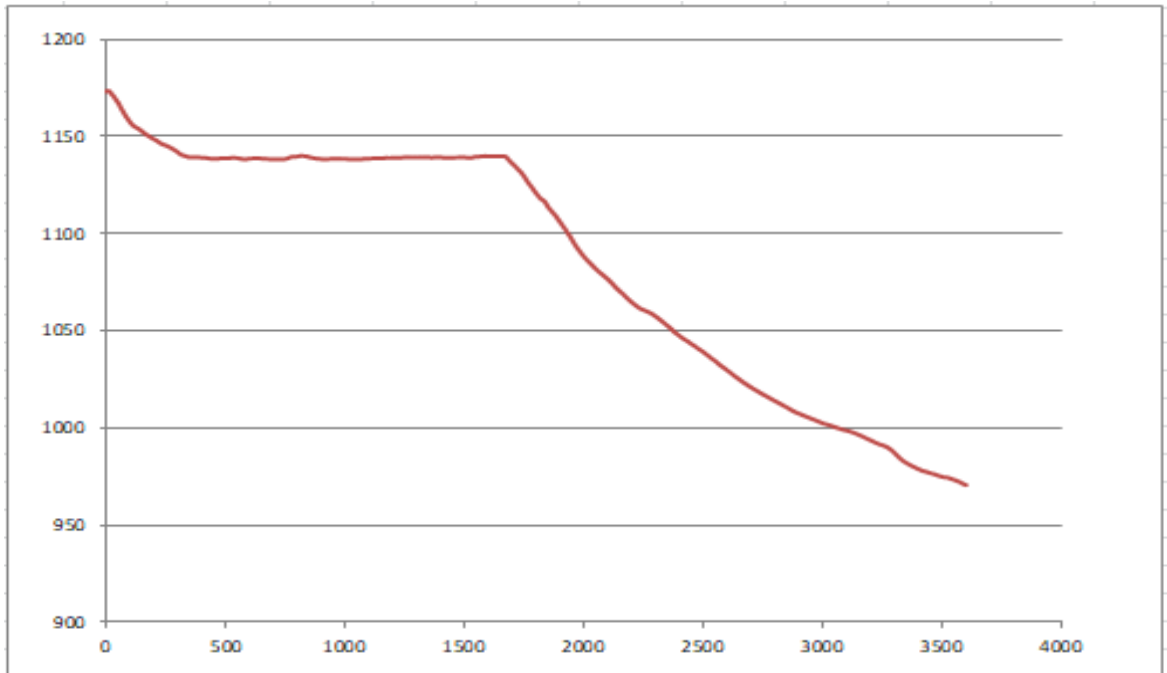
Azimut açısı ile yolun yönü belirlenerek ölçümü gerçekleştirilmiş yol güzergâhı Excel programına yatay ve düşey grafikler aracılığıyla aktarılmış ve analiz edilmiştir. Şekil 3'te yolun enlem ve boylam koordinat verileri ile Microsoft Excel programında hafriyat

güzergâhı analiz edilmek üzere yatay grafik oluşturulmuştur. Grafikte x eksenı enlemi, y eksenı boylamı göstermektedir.



Şekil 3. Hafriyat güzergâhının yatay grafiğı

Şekil 4’te yolun yükseklik ve toplam mesafe verileri ile hafriyat güzergahının düşey grafiğı Microsoft Excel programında oluşturulmuştur. Grafikte x eksenı toplam mesafeyi, y eksenı yüksekliğı göstermektedir.



Şekil 4. Hafriyat güzergâhının düşey grafiğı

GPS ölçüm cihazı ile toplanan koordinat verileri ile yapılan toplam mesafe hesaplamaları sonucu hafriyat güzergahının toplam mesafesi 3602,28 m olarak hesaplanmıştır. Hafriyat güzergahının en yüksek noktası 1173,2 m en düşük noktası 970,5 m olarak tespit edilmiştir.

Günümüzde hafriyat ve saha geliştirme hizmetleri, çalışma başlamadan önce potansiyel sahaları modellemek için bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve diğer yazılımları kullanmaya başlamıştır. Profiller ve üç boyutlu görünüm (3D), mevcut kalitelerin, önerilen kalitelerin ve çoklu alt tabaka katmanlarının grafik çizimlerini sağlamaktadır. Bu sayede saha geliştirme hizmetleri, hafriyat analizi, maliyet tahminleri ve toprak tabakaları analizi gerçekleştirilmektedir.

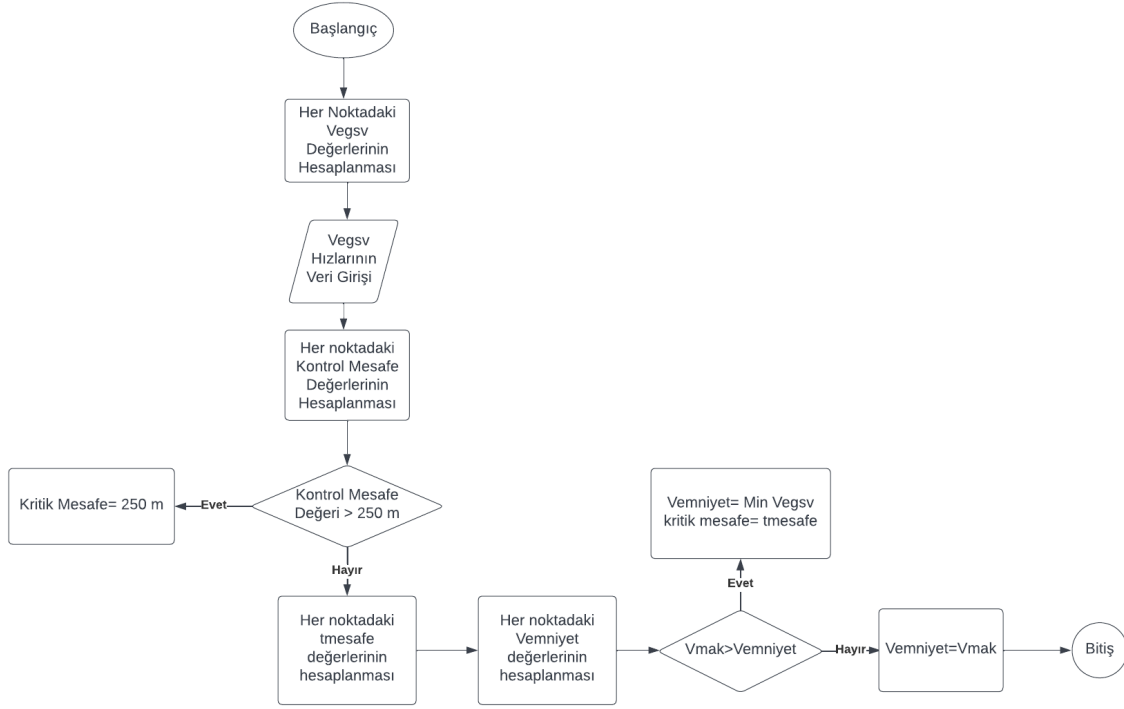
Microsoft Excel programı üzerinde ölçülen hafriyat güzergahı konum verileri kullanılarak oluşturulan hafriyat güzergahı yatay ve düşey grafikleri sayesinde hafriyat güzergahı görselleştirilmiş bu sayede saha ve hafriyat analizi gerçekleştirilmiştir. İnşaat sahasında gerçekleştirilen gerçek zamanlı koordinat ölçümü sayesinde hafriyat güzergahının yüksek doğrulukta ve çözünürlükte belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

2.4. Hafriyat Güzergahının Analizi ile Maksimum Hız Limitlerinin Belirlenmesi

Ölçümü gerçekleştirilmiş ve azimuth açısı ile düz ve viraj kısımları belirlenen hafriyat güzergahını kullanan hafriyat kamyonlarının hızları viraj çapı ve yolun eğimine göre belirlenerek taşıma süresi hesaplanacaktır.

Kamyonun güzergahın viraj kısımlarında ulaşabileceği maksimum hızı bulmak için dairesel hareket formüllerinden faydalanılmıştır. Öncelikle viraj hızını bulmak için dairesel yarıçap bulunmaktadır. Arazi ölçümleri ile elde edilen yay uzunluğu ve açı farkından viraj yarıçapı Eşitlik 26'de sunulduğu gibi hesaplanmıştır. $\sum \Delta x$, iki ölçüm noktası arasındaki mesafelerin toplamını, $\text{Mutlak}(\alpha)$, ölçüm noktaları arasındaki açı değişimlerini ifade etmektedir.

$$R = \frac{\sum \Delta x \times 360}{2 \times \pi \times \text{Mutlak}(\alpha)} \quad (26)$$



Şekil 5. Her noktaya ait mesafe ve hız kontrolü akış şeması

Emniyetli geçişi sağlayacak viraj hızı $Vegsv = \sqrt{a \times R}$ formülü ile bulunmaktadır. Formüldeki a simgesi maksimum merkezkaç ivmesidir. Dolu ve boş kamyonların devrilmeden ilerleyebileceği merkezkaç ivmesi 1 m/s^2 değerinde alınmıştır.

Kamyonun güzergâh boyunca güvenli bir şekilde ilerlemesi ve taşıma işlemini en verimli şekilde gerçekleştirmesi için mesafe ve hız kontrolü yapılmıştır. Şekil 5’te sunulan algoritma Excel üzerinde yazılan Makro aracılığıyla koşturulmuş ve tüm noktalar için Vegsv değeri hesaplanmıştır.

Hafriyat yolunda ilerleyen kamyon güzergâh boyunca hesaplanan Vegsv hız limitini aşmayacak şekilde ilerlemek zorundadır. Kamyonun frenleme esnasında maksimum fren ivmesinin 2 m/s^2 olabileceği varsayılmış ve reaksiyon süresi boyunca kamyonun sabit 20 metre ilerleyeceği kabul edilmiştir.

Şekil 5’te sunulan algorithmada, her noktadaki kontrol mesafe değerlerinin hesaplanması işlemi kamyonun bulunduğu noktadan $\frac{Vegsv^2}{4} + 20$ metre ilerledikten sonra durma koşuluna göre belirlenmiştir. Yolun göreceli olarak düz olduğu kısımlarda hız

değeri çok yüksek olabilmektedir. Bu durumda kritik mesafe değeri 250 metre alınmıştır. 250 metreden daha az bir mesafe kontrol ediliyorsa, kontrol mesafesine ulaşana kadar yol güzergahındaki noktaların mesafeleri (tmesafe) toplanır.

Şekil 5’te sunulan algoritma içerisindeki her noktadaki Vemniyet hız değerlerinin hesaplanması işleminde toplanan mesafeler içerisindeki minimum Vegsv değeri Vemniyet hızı olarak kabul edilmiştir. Her ölçüm noktasında hesaplanan $\frac{Vegsv^2}{4} + 20$ metre kontrol mesafesi kadar ileriye bakılarak kamyonun her noktada ulaşabileceği maksimum hız değeri olan Vemniyet hızı bulunmuştur.

Kamyonun ulaşabileceği maksimum hız (Vmak) 60 km/saat değerine eş olan 16,67 m/s alınmıştır. Vemniyet değeri maksimum hız değerinden büyükse Vemniyet değeri olarak tanımlı Vmak değeri alınır.

2.5. Kamyon Kuvvet Analizi ve Geometrik Model ile Hızın Belirlenmesi

Yol güzergâhında kamyonun yapacağı hareket koşullarına göre her noktada hareketi kısıtlayacak Fdirenc ve kamyonun ivmelenmesi sağlayacak Fivme kuvvetleri oluşacaktır. Her araç bulunduğu yol güzergahının yapısına ve sahip olduğu özelliklere göre hareketi kısıtlayabilecek bazı direnc kuvvetleri ile karşılaşmaktadır. Bu çalışma kapsamında denklemlere dâhil edilen direnc kuvvetleri eğim direnci, yuvarlanma direnci ve hava direncidir. Eğim direnci, taşıtın yokuş yukarı hareketi sırasında taşıtın ağırlığının yola paralel bileşeninden kaynaklanır. Eğer hareket yokuş yukarı ise bu bileşen aracın hareketine direnc göstererek yokuş direncini oluşturmaktadır. Yuvarlanma direnci ise aracın lastiğinin yuvarlanma esnasında kaybettiği enerjidir. Bu direncin esas sebebi lastiğin hareket esnasında sürekli deforme olmasıdır. Yuvarlanma direnci katsayıları, birçok faktörün etkisi altındadır. Taşıt hızı, yolun durumu, aracın yükü, lastik yapısı, şişirme basıncı, kesit oranı, lastik karışımı, dış malzemesi bu faktörlerden bazılarıdır. Tamamen pürüzsüz bir zeminde lastiğin basıncı arttıkça lastiğin deformasyonu ve yuvarlanma direnci azalır. Arazi koşullarında ise durum tam tersidir, basınç azaldıkça yuvarlanma direnci de azalır. Hava direnci ise herhangi bir cismin hareketinin tersi yönünde etki eden ve cismin hareketini kısıtlamak amacıyla hava tarafından uygulanan kuvvettir. Eğim direnci Eşitlik 27’de ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$D_{eğim} = \frac{\Delta h_i}{\sqrt{\Delta H_i^2 + \Delta h_i^2}} * A_{kamyon} \quad (27)$$

Eşitlik 27’de A_{kamyon} kamyonun ton biriminde ağırlığıdır. Yol kesitinin eğim değeri $\frac{\Delta h_i}{\sqrt{\Delta H_i^2 + \Delta h_i^2}}$ ifadesi ile hesaplanmaktadır. Δh_i ardışık iki ölçüm noktası arasındaki yükseklik farkını, ΔH ise noktalar arasındaki yatay değişimi belirtmektedir. Bulunan eğim değerleri filtreleme yöntemi ve formülü kullanılarak düzeltilmiş eğim değerlerine dönüştürülmüştür. Ardışık 3 ölçüm noktası birleştirilerek düzeltilmiş eğim değerlerinin ortalaması alınmış ve kullanılan kamyonun ağırlığı ile çarpılmıştır. Yuvarlanma direnci, analizleri ve hesaplamaları gerçekleştirilen hafriyat güzergâhının kaplama malzemesinin durumuna göre belirlenmiştir. Maden yolu güzergâhı bozuk asfalt zemin yapısına sahiptir. Bu yüzden yuvarlanma direnci katsayısı 30 kg/ton değeri alınmıştır. Yuvarlanma direnci formülü Eşitlik 28 de gösterilmiştir. Formülde DK, yuvarlanma direnç katsayısını temsil etmektedir.

$$D_{yuvarlanma} = DK * A_{kamyon} \quad (28)$$

Hava direnci aracın şekli, hareket odaklı alanı, hızı, havanın sürüklenme katsayısı ve yoğunluğuna bağlıdır. Hava direnci Eşitlik 29 ile hesaplanır.

$$D_{Hava} = 0,5 * \rho \times A \times k \times V_m^2 \quad (29)$$

Eşitlik 29’da ρ havanın yoğunluğunu ifade etmekte ve hesaplamalarda sabit olarak 1,225 kg/m³ değeri alınmıştır. Kamyonun ön yüzey alanı yüklenmiş halde 11,25 m² boş halde 9,5 m² değerini almıştır. Kamyon yük ile dolu durumdayken sürtünme katsayısı k, 0,9 boş durumdayken 0,85 değerini almıştır.

Ayrıca yol güzergâhının üzerinde kamyon şoförünün yol hız sınırını aşmamak için uygulayacağı fren etkisi ile birlikte yolun bazı bölümlerinde fren direnci etkili olacaktır. Fren direnç kuvveti, Şekil 6’da ivme hesabında kamyon şoförünün frene bastığı zaman kullanılan sürtünme ivmesi ve fren emniyet ivmesinin minimumunu alma koşulunu devam ettirerek bulunmuştur.

Fren direnci formülü Eşitlik 30 da gösterilmiştir. Denklemden a_s sürtünme ivmesini, a_{fe} fren emniyet ivmesini temsil etmektedir.

$$D_{fren} = \text{Min}(a_s, a_{fe}) \times A_{kamyon} \quad (30)$$

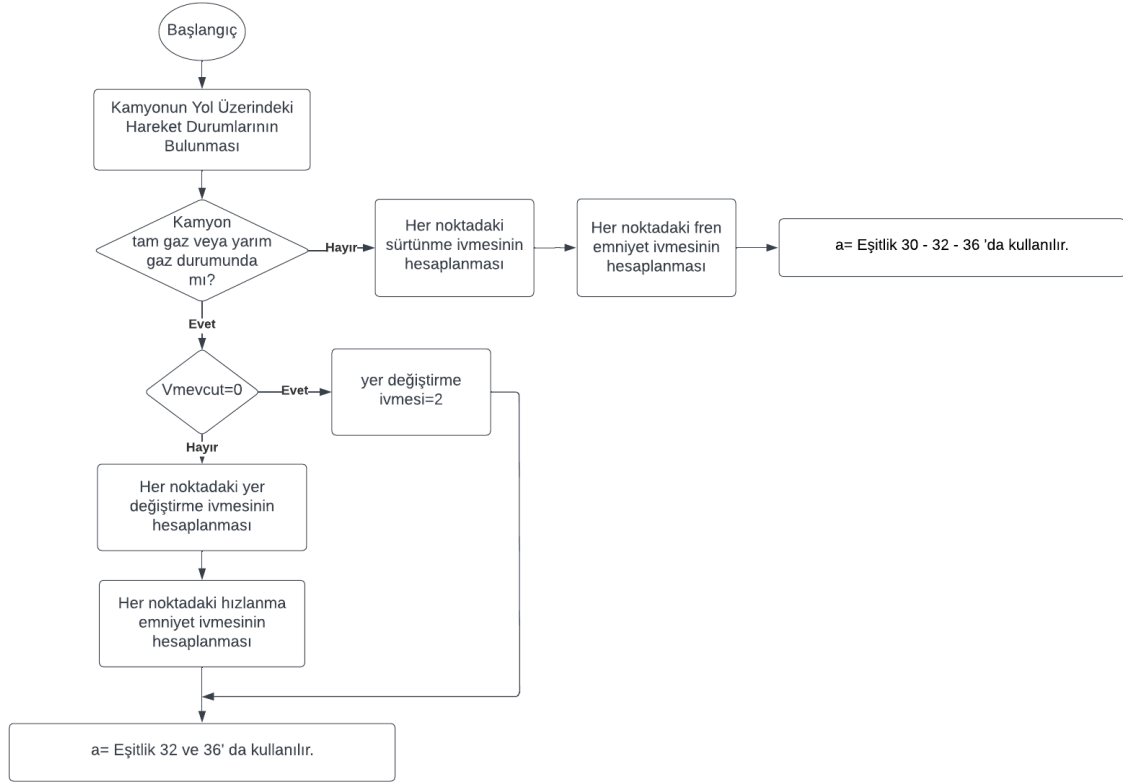
Fren direnci eklenerek yol güzergâhındaki her noktada oluşan direnç kuvveti Eşitlik 31’de ifade edildiği biçimde hesaplanmıştır.

$$F_d = \text{Değim} + D \text{ yuvarlanma} + D_{\text{hava}} + D_{\text{fren}} \quad (31)$$

Seçilen kamyonu göre yol güzergâhındaki her noktada kamyonun V_{mevcut} hızı bulunmuştur. Yol güzergahındaki her noktada oluşan ivme değerleri, V_{mevcut} belirlenirken önemli bir parametredir. Seçilen kamyonun motor gücü, yol güzergahının yapısı ve kamyonun hareket durumuna bağlı etki eden eğim, yuvarlanma, hava ve fren dirençlerine göre her noktadaki ivme değerleri açığa çıkar ve bu sayede V_{mevcut} hızı hesaplanır. V_{mevcut} hızında başlangıç değeri olarak 0 olarak atanmıştır. Sonrasında her noktada bir önceki değere bakılarak hesaplamalar devam etmektedir. V_{mevcut} formülü denklem 32’de verilmiştir. a kamyonun ivmesi, Δx iki nokta arasındaki mesafe toplamıdır.

$$V_{m,i+1} = \sqrt{\left((V_{m,i})^2 + 2 \times a \times \Delta x\right)} \quad (32)$$

Damperli kamyonun yol güzergâhının kısımlarına göre gerçekleştireceği hızlanma, yavaşlama ve sabit hız durumlarına göre her noktanın ivme değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6. İvme hesabı akış şemasını göstermektedir.



Şekil 6. İvme Hesabı Akış Şeması

Şekil 6'daki algoritmada, her noktada hesaplanan V_{mevcut} hızlarının ardından, yol güzergâhında bir sonraki noktada bulunan $V_{emniyet}$ hızına bakılarak kamyon şoförünün taşıma ve geri dönüş işlemi sırasında yol güzergâhının hangi kısmında gaza ve frene basacağı veya sabit bir hızda devam edeceği belirlenmiştir. V_{mevcut} hızı $V_{emniyet}$ hızından küçükse gaza basılacak büyükse frene basılacaktır. İki değer birbirine eşitse şoför aynı hızda yoluna devam edecektir.

Kamyonun hareket durumuna göre eğer kamyon tam gaz veya yarım gaza basıyorsa öncelikle V_{mevcut} kontrolü yapılmıştır. V_{mevcut} değeri sıfıra eşitse yer değiştirme ivmesi olarak sabit değer 2 m/s^2 alınmıştır. Bu şekilde belirli bir kalkış ivmesi belirleyerek kamyon harekete geçirilmiştir. V_{mevcut} değeri sıfıra eşit değilse her noktadaki yer değiştirme ivmesi hesaplanmış ve bulunan iki değer minimumu yer değiştirme ivmesi olarak alınmıştır. Aynı zamanda $V_{emniyet}$ hızına bağlı hızlanma emniyet ivmesi de hesaplanmıştır.

Yer değiştirme ivmesi;

$$\frac{\frac{W}{V_m} - F_d}{A_{kamyon} \times 1000} \quad (33)$$

formülü kullanarak bulunmuştur. W, kamyonun Watt cinsinden beygir gücüdür. $W; \left(\frac{Hp}{0,736} \right) \times 1000 \times \text{Motor verimi}$ formülü kullanarak hesaplanmıştır.

Hızlanma emniyet ivmesi;

$$\frac{V_e^2 - V_m^2}{2 \times \Delta x} \quad (34)$$

formülü kullanarak bulunmuştur. Bu sayede her noktada tespit ettiğimiz Vemniyet hızını aşmayacak ivme değeri hesaplanmış olacaktır. Yol güzergâhının tam gaz veya yarım gaz noktalarında bulunan yer değiştirme ivmesi ve hızlanma emniyet ivmesi değerlerinin minimumu ivme olarak alınmıştır. Eğer sürücü frene basıyorsa sürtünme ivmesi ve fren emniyet ivmesi hesaplanmıştır.

Sürtünme ivmesi; $Tsk \times g$ formülü kullanarak bulunmuştur. Tsk, Tekerlek sürtünme katsayısını temsil etmektedir. Tekerlek sürtünme katsayısı 0,3 sabit değeri alınmıştır. G, yer çekimi ivmesi olduğundan 9,81 m/s² sabit değeri alınmıştır.

Fren emniyet ivmesi;

$$\frac{V_m^2 - V_e^2}{2 \times KM} \quad (35)$$

formülü kullanarak bulunmuştur. Denklemden KM, kritik mesafeyi temsil etmektedir.

Bulunan iki değerin minimumu alınarak ivme tespit edilmiştir. Frene basılması durumunda oluşacak ivmelenme negatif değerde olacaktır.

İvme kuvveti Şekil 6. da damperli kamyonun yol güzergahı üzerinde gösterdiği hızlanma, yavaşlama veya sabit hız durumlarına göre belirlenen ivme değerleri kullanarak hesaplanmıştır. İvme kuvveti formülü Eşitlik 36 da gösterilmiştir.

$$F_i = a \times A_{kamyon} \times 1000 \quad (36)$$

Fdirenç ve Fivme kuvvetlerinin hesaplanması ile birlikte yol güzergahının her noktasında Fnet değerleri bulunmuştur. Fnet kuvveti formülü Eşitlik 37 de gösterilmiştir.

$$F_n = F_d + F_i = m \times a \quad (37)$$

Bulunan F_{net} değerleri sayesinde yol güzergâhının her noktasında damperli kamyonun motorunun üreteceği güç performansı analiz edilmiştir.

F_{net} değeri sıfırdan büyükse; yol güzergâhının her noktasında gerekli motor gücü Eşitlik 38 ile hesaplanmıştır. Denklemden P , oluşacak motor gücünü ifade etmektedir.

$$P = V_m \times F_n \quad (38)$$

F_{net} değeri sıfır ya da sıfırdan küçük ise motor gücü 0 olarak belirlenmiştir. Uygulamaya tanımlanan kamyon modellerine göre yol güzergâhındaki her noktada motor gücü kontrolü yapılmıştır. Kullanılan kamyon modellerinin H_p cinsinden beygir gücü, yol güzergâhındaki her noktada oluşan $F_{direnç}$ ve F_{ivme} kuvvetlerini karşılayacak güçte olmalıdır. Bu nedenle yol güzergâhının her noktasında hesaplanan gerekli motor gücü değerleri, seçilen kamyon modelinin motor gücü değeri ile karşılaştırılmıştır. Eğer kamyonun motor gücü yol güzergâhında gerekli olan motor gücü değerlerinden küçükse bir problem bulunmakta ve tekrardan kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer kamyonun motor gücü yol güzergâhında gerekli olan motor gücü değerlerini karşılayabiliyorsa yapılan hesaplamalarda bir sorun bulunmamakta ve seçilen kamyon taşıma işlemi için yol güzergâhında kullanılmaya uygundur.

Taşıma işlemi sırasında önemli faktörlerden biri de zaman faktörüdür. Kısa sürede gerçekleşen taşıma işlemleri daha fazla taşıma işinin gerçekleşmesine ve toplam maliyetin azalmasını sağlamaktadır. Her kamyon modeline göre yol güzergâhının her noktasında gerçekleşen zaman değerleri, Eşitlik 39 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta t = \frac{V_{m_{i+1}} - V_{m_i}}{a} \quad (39)$$

İvme değeri 0 olan noktalarda zaman değerleri, Eşitlik 40 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta t = \frac{\Delta x_i}{V_{m_i}} \quad (40)$$

Taşıma işlemi sırasında oluşabilecek önemli maliyet kalemlerinden bir tanesi de kamyonun yakıt maliyetidir. Yol güzergâhının zemin özellikleri, yol güzergâhının toplam mesafesi, taşıma işleminin süresi, kullanılan kamyon modelinin motor gücü ve motor verimi vb. gibi özellikler harcanan yakıt miktarını etkilemektedir. Güzergâh boyunca kamyon modellerine göre oluşabilecek tek turluk toplam harcanan yakıtı bulmak için

Eşitlik 41’de ifade edilen formül kullanılır. E, mazot özgül enerji η , motor verimini ifade etmektedir.

$$\sum_{i=1}^n HY = \frac{P_i \times \Delta t_i}{\eta \times E} \quad (33)$$

Belirtilen işlemlerin tamamı güzergâh boyunca kamyonun hem gidiş hem dönüş aşamalarında uygulanmıştır. Gidiş aşamalarında kamyonun dolu ağırlığı, dönüş aşamalarında kamyonun boş ağırlığı kullanılmıştır.

2.6. Saatlik Kazı Miktarı ve Süresini Belirleme

Toprak işlerinin daha kaliteli ve hızlı bir şekilde gerçekleşmesi için çeşitli iş makineleri kullanılmaktadır. İş makineleri ağırlıklı olarak yapılacak toprak işlerinin süresini kısaltmak için kullanılmaktadır. İş makineleri yüksek ilk yatırım maliyetine sahip oldukları için yüksek verimde kullanılmaları gereklidir. Bu yüzden iş makinelerinin yapılan işe uygun boyutta seçilmesi önemlidir. Oluşturulan toprak işi simülasyonuna göre kullanıcı gerçekleştirmeyi hedeflediği toplam kazı miktarını Excel programına girebilecektir. Bu sayede kullanıcı toprak işi sırasında gerçekleşen koşulları da program içerisinde belirleyerek en kısa sürede yüksek verimde en az maliyet ile kazı ve taşıma işlemini gerçekleştirecek ekskavatör ve kamyonu belirleyebilecektir. Ekskavatörün kazı hızı 1 saat içinde yapabildiği çevrim sayısına, kova hacmine, çalışma koşullarına ve yönetim koşullarına bağlıdır. Seçilen ekskavatörün m³ cinsinden saatlik kazı miktarı Eşitlik 12’de belirtilen formülle hesaplanmaktadır.

Çevrim sayısı, kova hacmi, çalışma koşulları ve yönetim koşulları sektörde yaygın olarak kullanılan iş makineleri tablolarından elde edilmiştir. Kullanıcı gerçekleştireceği toprak işindeki malzeme türü, planladığı kazı derinliği, kullanacağı makine türü ve teknik özelliklerini sistemden seçerek saatlik üretim miktarını belirleyebilecektir. Tablo 5, 6, 7 ve 8’de saatlik kazı miktarını hesaplamak için kullanılan iş makineleri tabloları gösterilmektedir.

Tablo 5. Hidrolik backhoe kazıcılar için saatlik standart çevrim sayısı tablosu

Malzeme Türü	Makine Boyu			
	Tekerlekli Çekici	Küçük Kazıcı ($\leq 0,76 m^3$)	Orta Boy Kazıcı ($0,94-1,72 m^3$)	Büyük Kazıcı ($>1,72 m^3$)
Yumuşak (Kum, Çakıl, Topak)	170	250	200	150
Orta (Genel zemin, Yumuşak kil)	135	200	160	120
Sert (Sert Kil, Kaya)	110	160	130	100

Tablo 6. Hidrolik kazıcılar için salınım-derinlik faktör tablosu

Kazı Derinliği (Maksimum Der. %'si)	Salınım Açısı					
	45	60	75	90	120	180
30	1,33	1,26	1,21	1,15	1,08	0,95
50	1,28	1,21	1,16	1,10	1,03	0,91
70	1,16	1,10	1,05	1,00	0,94	0,83
90	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,75

Tablo 7. Kazıcı ve Yükleyiciler için Kova Dolum Faktörleri

Malzeme	Kova Dolum Faktörü
Genel Zemin	0,80-1,10
Kum ve Çakıl	0,90-1,10
Sert Kil	0,65-0,95
Islak Kil	0,50-0,90
İyi Patlatılmış Kaya	0,70-0,90
Kötü Patlatılmış Kaya	0,40-0,70

Tablo 8. Makine kullanımının iş verim faktörleri tablosu

Çalışma Koşulları	Yönetim Koşulları			
	Mükemmel	İyi	Orta	Kötü
Mükemmel	0,84	0,81	0,76	0,70
İyi	0,78	0,75	0,71	0,65
Orta	0,72	0,69	0,65	0,60
Kötü	0,63	0,61	0,57	0,52

Çevrim sayısı, iş makinesinin kazı sahasındaki zemini kazıp kovaasına doldurması, dönüp kamyonu veya yere boşaltması ve boş halde tekrar dönüp kazı sahasında kazı pozisyonunu almasıdır. Bir saat içinde yapılacak çevrim sayısı; iş makinesinin büyüklüğüne, zemin koşullarına, salınım açısına ve kazı derinliğine bağlıdır. Kova hacmi ekskavatörün taşıyabileceği malzeme miktarını belirtmektedir. Dönüş açısı iş makinesinin kazdıktan sonra malzemeyi boşaltmak için yapması gereken dönüş miktarıdır. Kazı derinliği arttıkça operatörün kazılan yeri görmesi zorlaşacak ve çevrim süresi artacaktır. Saatlik kazı miktarı formülü ile her ekskavatör modelinin gerçekleştirebileceği saatlik kazı miktarı bulunmuştur.

Saatlik kazı miktarı hesaplandıktan sonra tek bir ekskavatörün işi tamamlama süresi, günlük kazı miktarı ve tüm iş süresi boyunca gerçekleştireceği kazı miktarı belirlenecektir.

Bu sayede belirlenen sürede işin tamamlanması için gerekli ekskavatör sayısı hesaplanacaktır. 1 ekskavatörün işi tamamlama süresi Eşitlik 34’de belirtilen denklemle hesaplanmıştır. Denklemde TKH toplam kazı hacmi, Q_e saatlik kazı hızını, GÇS günlük kazı miktarını ifade etmektedir.

$$\dot{ITS} = \frac{TKH}{Q_e \times GÇS} \quad (34)$$

Günlük gerçekleşen kazı miktarı Eşitlik 35’de belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$GKM = Q_e \times GÇS \quad (35)$$

1 ekskavatörün toplam kazı miktarı Eşitlik 36’da belirtilen formül ile hesaplanmaktadır. Denklemde TİS toplam iş süresini ifade etmektedir.

$$TKM = TİS \times GKM \quad (36)$$

İşin belirlenen sürede tamamlanması için gerekli ekskavatör sayısı Eşitlik 37’de belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$GES = \frac{TKH}{TKM} \quad (37)$$

Ekskavatör kazı yaparken ekskavatörün boş kalmadan kazı yapmasını sağlayacak şekilde kamyon tedarik etmek gerekir. Kamyon ekskavatörün kendisini doldurduğu süre boyunca ekskavatörü çalışır durumda tutar. Kamyonun dolum süresi tdolum olarak

tanımlanır. Ardından kamyon dolu biçimde hafriyat sahasına gider. Bu geçen süreye $t_{gidiş}$, malzemeyi boşalttığı anda geçen süreye $t_{boşaltım}$, boş şekilde geri döndüğü süreye $t_{dönüş}$ ve ekskavatörün yanına yanaştığı zaman geçen süre t_{spot} olarak ifade edilmektedir.

Kamyonun Tur süresi Eşitlik 38’de belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_{tur} = t_{dolum} + t_{gidiş} + t_{dönüş} + t_{spot} + t_{boş} \quad (38)$$

Ayrıca t_{dolum} süresi hesaplanırken ekskavatörün %100 verimde çalıştığı kabul edilir. Ekskavatörün kamyonu doldururken işe ara verilmesi çok olası bir durum değildir. Ekskavatör ve kamyonun kova hacmi ve dolum faktörü, ekskavatörün çevrim sayısı, kazı derinliği, salınım açısı ve kamyonun ekskavatöre uzaklığı dolum süresini etkilemektedir. Dolum süresi Eşitlik 39’da belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$t_{dolum} = \frac{V_{kamyon} \times B_{kamyon}}{V_{eks} \times B_{eks}} \times \frac{60}{C \times S} \quad (39)$$

T_{tur} süresini bulmak için gerekli olan $t_{gidiş}$ ve $t_{dönüş}$ sürelerinde, Excel programına aktarılan yol güzergâhı üzerinde her kamyon modeli için hesaplanan toplam $t_{gidiş}$ ve $t_{dönüş}$ süreleri kullanılmıştır. $t_{boş}$ süresi 2 dk, t_{spot} süresi 1 dk olarak sabit değerlerde atanmıştır.

Kamyon ekskavatörü t_{dolum} süresi boyunca çalışır durumda tutarken kendisi t_{tur} süresi boyunca çalışmaktadır. Bu yüzden ekskavatörün doldurma aşamasında beklememesi ve zaman kaybı olmaması adına ekskavatör için gerekli kamyon sayısı;

Gerekli kamyon sayısı Eşitlik 40’ta belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{t_{tur}}{t_{dolum}} \quad (40)$$

2.7. Ekskavatör ve Kamyonların Maliyet Hesaplaması

İş makinelerinin maliyetinin bilinmesi işverenin gerçekleştireceği toprak işlerinde kullanacağı iş makinelerini belirlemede önemli bir parametredir. Projede gerçekleştirilecek kazı hacmini planlanan tamamlanma süresinde yerine getirecek iş makineleri, istenen teknik özelliklerin yanında uygun maliyetlerde olmalıdır. İş makinelerinin maliyetini proje

gerçekleşmeden önce belirlemek projeye uygun doğru iş makinelerini seçme ve toprak işlerinin maliyet tahmini ve kontrolünü gerçekleştirmede yardımcı olacaktır.

İş makinelerinin giderleri sabit ve işletme giderleri olarak 2 kısma ayrılmaktadır.

Sabit giderler;

- Amortisman Maliyeti: Amortisman, iş makinesinin zamanla değerinin düşmesi sonucu ortaya çıkan maliyet kalemidir. İş makinelerinin saatlik amortisman maliyeti Eşitlik 41'e göre hesaplanmıştır.

$$SAM = \frac{A}{N \times n} \quad (41)$$

Formülde A, iş makinesinin ilk yatırım maliyetini N, iş makinesinin amortisman ömrünü n, iş makinesinin yıllık kullanım saatini temsil etmektedir.

- Yedek Parça Maliyeti: İş makinesinin yedek parça gideri amortisman maliyetinin %53'ü alınarak bulunmaktadır. İş makinelerinin saatlik yedek parça maliyeti Eşitlik 42'ye göre hesaplanmıştır.

$$SYPM = 0,53 \times \frac{A}{N \times n} \quad (42)$$

- Bakım ve Onarım Maliyeti: İş makinesinin 1 saatlik çalışması sonucu ortaya çıkacak olan bakım ve onarım gideri amortisman maliyetinin %13'ü alınarak bulunmaktadır. İş makinelerinin saatlik bakım ve onarım maliyeti Eşitlik 43'e göre hesaplanmıştır.

$$SBOM = 0,13 \times \frac{A}{N \times n} \quad (43)$$

- Sermaye Maliyeti, Sigorta ve Diğer Yasal Maliyetler : İş makinesi satın alan bir girişimci parasını iş makinesine yatırdığı için ekonomik olarak oluşacak kazançtan yoksun olmaktadır. Fırsat maliyeti olarak değerlendirilen kazanç hiç risk içermeyen yatırım olan hazine bonosunun reel getirisinden yüksek olmalıdır. Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı maliyet hesaplamalarında sermaye maliyetini %8 almaktadır. Sermaye maliyeti hesaplanırken iş makinesinin ortalama değeri alınır. Sermaye maliyeti %i alındığında iş makinelerinin saatlik sermaye maliyeti Eşitlik 44'e göre hesaplanmıştır.

$$SM = \frac{i \times A(N+1)}{2 \times N \times n} \quad (44)$$

- Demontaj, Taşıma ve Kurulum Maliyeti: İş makinesinin yıl boyunca yapacağı taşınma ve kurulum maliyetinin satış fiyatının %2'si kadar olacağı kabul edilmektedir. İş makinelerinin saatlik nakliye maliyeti Eşitlik 45 uygulanarak hesaplanmıştır.

$$NM = 0,02 \times \frac{A}{n} \quad (45)$$

İşletme giderleri;

İş makinesinin çalıştığı süre boyunca oluşan maliyetler işletme gideri olarak tanımlanmaktadır.

- Yakıt Maliyeti: İş makinesinin 1 saatlik çalışma süresi boyunca harcayacağı yakıtın maliyetidir. Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı dizel motora sahip iş makinelerinde 1 saatlik yakıt tüketiminin 0,0855 kg/HP benzinli motora sahip iş makinelerinde saatlik yakıt tüketiminin 0,114 kg/HP olduğunu kabul etmektedir. Ekskavatör modellerinin 1 saatlik yakıt maliyeti Eşitlik 46'a göre hesaplanmıştır. MRF, mazot rayiç fiyatını DYYS, dizel yakıt yağ sabitini P, motor gücünü temsil etmektedir.

$$EYM = P \times DYYS \times MRF \quad (46)$$

Kamyon modellerinin yakıt maliyeti ise, yol güzergâhı üzerinde yapılan hesaplamalar sonrası Eşitlik 33. de gidiş ve dönüş aşamalarında bulunan harcanan yakıt değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Kamyon modellerinin 1 saatlik yakıt maliyeti Eşitlik 47'e göre hesaplanmıştır. Denklemden THY, toplam harcanan yakıtı temsil etmektedir.

$$KYM = THY \times MRF \quad (47)$$

- Yağ Maliyeti : İş makinesinin 1 saatlik çalışma süresi boyunca harcayacağı veya değişmesi gereken yağın maliyetidir. Yağ gideri tüm iş makinelerinde hesaplanmaz. Özellikle paletli, hidrolik aksamı olan iş makinelerin yağ gideri hesaplandığı için yağ maliyeti sadece ekskavatör modelleri üzerinde hesaplanmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı yağ giderini 0,0171 kg/HP mazot eşdeğeri olarak hesaplamaktadır. Ekskavatör modellerinin 1 saatlik yağ maliyeti Eşitlik 48'e göre hesaplanmıştır. YGS, yağ gideri sabitini temsil etmektedir.

$$YM = P \times YGS \times MRF \quad (48)$$

- Personel Maliyeti: Şantiyede çalışan personelin yaptığı iş sözleşmesine göre alacağı ücrettir. Genellikle işçilerin fazladan mesai yapsa bile haftada 60 saat, ayda 240

saat çalışacağı varsayılır. İş makinesini kullanan operatör ve formen iş makinesi çalıştığı süre boyunca çalışabileceklerdir. Buna göre yılda n saat çalışan bir iş makinesi için $\frac{n}{12}$ iş makinesinin aylık çalışma saatidir.

Bir işçi ayda 240 saatlik ücret aldığına göre $\frac{240}{\frac{n}{12}} = \frac{2880}{n}$ işlemi sayesinde iş makinesi ile birlikte çalışan personele bir saatlik çalışması karşılığı ödenen birim ücret katsayısı elde edilir. Personel maliyeti içinde formen, operatör ve yağcı maliyetlerini barındırmaktadır.

Formen maliyeti sadece ekskavatör modelleri için hesaplanmıştır. Kamyonlar için formene ihtiyaç duyulmamaktadır. Bir formen aynı anda birden fazla iş makinesini yönetebilir. Bu yüzden formen maliyeti Eşitlik 49 ile hesaplanmaktadır. FRF, formen rayiç fiyatını PBÜM, personel birim ücret miktarını temsil etmektedir.

$$FM = \frac{PBÜM}{3} \times FRF \quad (49)$$

Operatör maliyeti hem kamyon hem ekskavatör modelleri için hesaplanmıştır. Operatör maliyeti Eşitlik 50 ile hesaplanmıştır. ORF, operatör rayiç fiyatını temsil etmektedir.

$$OM = PBÜM \times ORF \quad (50)$$

Yağcı maliyeti aynı yağ giderinde olduğu gibi sadece paletli, hidrolik aksamı olan iş makinelerinde hesaplandığı için ekskavatör modelleri üzerinde hesaplanmıştır. Yağcı maliyeti Eşitlik 51 ile hesaplanmıştır. YRF, yağcı rayiç fiyatını temsil etmektedir.

$$YM = YRF \quad (51)$$

İşletme maliyetleri hesaplanırken kullanılan birim fiyatlar Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2022/3 sayılı listesinden alınmıştır. Tablo 9.'da işletme maliyetleri hesaplanırken kullanılan birim fiyat listesi gösterilmiştir.

Tablo 9. Birim Fiyat Listesi

Poz No.	Tanımı	Ölçü Birimi	Rayiç Fiyatı
10.100.1055	Operatör Makinist	Sa	52
10.100.1059	Yağcı	Sa	33
10.100.1060	Formen	Sa	65
10.160.1026	Mazot	Kg	26,53

Excel uygulamasına tanımlı ekskavatör ve kamyon modelleri verilerinden yararlanarak her iş makinesi modelinin saatlik maliyet değerleri bulunmuştur. Ekskavatör ve kamyon modellerinin ilk yatırım maliyet değerleri veri girişi olarak sisteme tanımlanmıştır. Ek olarak kamyon modellerinin saatlik maliyetleri içerisinde damper ve harcanan yakıt maliyeti yer almaktadır.

İş makineleri modellerinin saatlik maliyet ve damper maliyet değerleri ülkemizdeki belirsiz kur ve artan maliyetlerden dolayı dolar cinsinden hesaplanmıştır. Belirsiz kur göz önünde bulundurularak damper maliyet hesabında ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının birim fiyatları dönüşümünde dolar 18 ₺ değerine sabitlenmiştir. Sonuç olarak veri tabanındaki tüm iş makinelerinin toplam saatlik maliyeti Eşitlik 52’de sunulan denklem ile hesaplanmıştır. Denklemden TSM toplam sabit maliyeti, TİM toplam işletme maliyetini temsil etmektedir.

$$STM \left(\frac{\text{Dolar}}{\text{Saat}} \right) = TSM + TİM \quad (52)$$

2.8. Kamyon Damper hacmine bağımlı maliyet, süre ve yakıt analizi

İş makineleri veya yol güzergahında oluşabilecek farklı koşullarla birlikte yapılacak toprak işinin süresi, maliyeti ve iş verimi değişkenlik gösterebilir. Bu koşullardan bir tanesi kamyon üzerindeki damperin hacmidir. Damper hacminin gerçekleştirilecek toprak işinin toplam maliyetini minimize, iş verimini maksimize hale getirmesini sağlamak için kamyon modelleri ve kasa uzunlukları olasılıklarına göre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon matematiksel anlamda; bir gerçel fonksiyonu minimize ya da maksimize etmek amacı ile gerçek ya da tam sayı değerlerini tanımlı bir aralıkta seçip fonksiyona yerleştirerek sistematik olarak bir problemi incelemek ya da çözmek işlemlerini ifade eder. Excel programına kamyon modellerinin maksimum kasa uzunluk verileri girilmiştir. Her kamyon modeli için kasa uzunluğu her defasında 0,05 birim azaltılarak 16 tane kasa uzunluğu olasılığı bulunmuştur. Tüm kamyon modelleri göz önüne alındığında toplam 240 kasa uzunluğu olasılığı mevcuttur. Yol güzergâhı üzerinde gerçekleştirilecek taşıma işlemi sırasında 240 kasa uzunluğu olasılığı incelenerek kamyonların saatlik taşıyacağı yük, harcayacağı yakıt ve maliyeti analiz edilmiştir. Tüm olasılıklar içerisinde en az maliyet ile en verimli şekilde işi gerçekleştiren kamyon modeli ve uygun kasa uzunluğu bulunmuştur.

Kamyon modellerinin her kasa uzunluğu olasılığına göre sahip olacağı boş ve dolu ağırlık ve kapasiteyi bulmak için bazı hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle her kasa

uzunluğu olasılığına göre kasa hacmi bulunmuştur. Kasa hacmi Eşitlik 53’de sunulan denklem ile hesaplanmıştır. KH, kasa hacmini KU, kasa uzunluğunu KG, kasa genişliğini KY, kasa yüksekliğini ifade etmektedir.

$$KH = (KU - 0,3) \times KG \times KY \quad (53)$$

Kamyonlara yerleştirilen her kasa için 0,3 m’lik bir boşluk payı bırakılmıştır. Kasa genişliği için 2,55 metre ve kasa yüksekliği için 1,435 metre sabit değerler alınmıştır. Sonrasında her kasa uzunluğu olasılığına göre oluşacak kasa ağırlıkları hesaplanmıştır. Kasanın her yüzeyi için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır. Kasa yüzey kalınlığı olarak 0,04 m sabit değeri alınmıştır. Kamyon kasasında kullanılan demirin özgü ağırlığı 7,8 gr/cm³ olarak alınmıştır. Kasa ağırlığı Eşitlik 54’de ifade edilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$KA = (KY \times KU \times 0,04 \times 7,8 \times 2) + (KG \times KU \times 0,04 \times 7,8) + \left(KY \times KG \times 0,04 \times 7,8 \times \left(1 + \frac{1}{\sin(60)} \right) \right) \quad (54)$$

Kamyonun dolu ağırlığını tespit etmek için hesaplanan kasa hacmi ve kamyonun boş ağırlığı kullanılmıştır. Kamyon kasasında bulunacak yükün doğal hacme sahip olacağı kabul edilir. Bu yüzden kasa hacmine %30 kabarma faktörü eklenmiştir. Kamyon modellerinin boş ağırlığı veri tabanından alınmıştır. Kamyon dolu ağırlığı hesaplanırken Eşitlik 55 kullanılmıştır. KDA, kamyon dolu ağırlığını KBA, kamyon boş ağırlığını ifade etmektedir.

$$KDA = (1,3 \times KH) + KBA + KA \quad (55)$$

Bazı kamyon damper hacimleri için hesaplanan kamyon dolu ağırlıkları, kamyonun maksimum ulaşabileceği dolu ağırlık değerini aşabilmektedir. Böyle bir durum oluşmaması adına bir sınırlama getirilmiş ve kamyonların taşıyabileceği maksimum kapasite belirlenmiştir. Kamyon modellerinin veritabanından alınan dolu ve boş ağırlıklar kullanılarak gevksek hacimde taşınabilecek kapasite miktarı bulunmuştur. Hesaplanan damper hacmi ile karşılaştırma yapılıp Eşitlik 56’da sunulduğu gibi minimum değer alınmıştır.

$$TMH = \text{Min} \left(\frac{(KDA - KBA - KA)}{1,3}; KH \right) \quad (56)$$

Eşitlik 40’ta TMH Taşınabilecek Maksimum hafriyat miktarını ifade etmektedir. KA, kasa ağırlığını ifade etmektedir. Böylece olabilecek maksimum dolu ağırlık değerini

aşmayan ve taşınabilecek maksimum kapasite miktarını belirleyen sistem oluşturulmuştur. Kamyon modellerinin ulaşabileceği maksimum dolu ağırlık değerleri Eşitlik 57 uygulanarak hesaplanmıştır.

$$KMDA = KBA + KA + (TMH \times 1,3) \quad (57)$$

Kamyon boş ağırlığı da kamyon veri tabanından alınan boş ağırlık değerlerine eklenen kasa ağırlığı ile birlikte bulunmuştur. Kamyon modellerinin boş ağırlık değerleri Eşitlik 58 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KAB = KBA + KA \quad (58)$$

Kamyon modellerinin kasa uzunluğu olasılıklarına göre hesaplamaları yapıldıktan sonra damper ağırlık değerleri baz alınarak her olasılık için kamyon modellerinin saatlik damperli maliyet değerleri hesaplanmıştır. Damper çeliğinin kg maliyeti için 1,4 \$ sabit değeri alınmıştır. Kamyon modellerinin saatlik damperli maliyet değerleri Eşitlik 59 uygulanarak hesaplanmıştır. KSM, kamyon modellerinin saatlik damper ve harcanan yakıt maliyetlerini içermeyen saatlik maliyetini ifade etmektedir.

$$SDM \text{ (Dolar/Saat)} = KSM + \frac{(KA \times 1,4 \times 1000)}{N \times n} \quad (59)$$

Saatlik iş verimini analiz etmek için kasa uzunlukları ve kamyon modelleri olasılıklarına göre bulunan 240 tane taşınabilecek maksimum hafriyat miktarı (TMH) değeri Excel üzerinde yazılan Makro aracılığıyla koşturulmuş ve kamyonun saatlik taşıyabileceği hafriyat miktarı Eşitlik 60 uygulanarak hesaplanmıştır. KTS, kamyonun 1 saatte gerçekleştirdiği tur sayısını ifade etmektedir. Kamyonun 1 saatlik tur sayısı; $50/t_{tur}$ formülü ile belirlenmektedir. Kamyon 1 saatlik süre içerisinde hiç durmadan %100 verimde çalışamayacağından formülde süre 50 dk alınmıştır.

$$KSTHM = TMH \times KTS \quad (60)$$

Saatlik maliyeti analiz etmek için kasa uzunlukları ve kamyon modelleri olasılıklarına göre bulunan 240 tane kamyon dolu ve boş ağırlıkları değeri Excel üzerinde yazılan Makro aracılığıyla koşturulmuş ve her olasılık için saatlik harcanan toplam yakıt değeri Eşitlik 61 kullanılarak hesaplanmıştır. HY, tek turda harcanan toplam yakıt değerini ifade etmektedir. Kamyonun ekskavatör malzeme doldururken, taşıdığı malzemeyi boşaltırken ve ekskavatöre malzeme almak için yanaşırken oluşan t_{dolum} , t_{spot} ve $t_{boş}$

rölanti sürelerinde harcayacağı yakıt miktarı da dikkate alınmıştır. Denklemden kamyonun rölantide beklerken 1 saatte 15 litre yakıt harcayacağı kabul edilmiştir.

$$SHY = HY \times KTS + ((t_{dolum} + t_{spot} + t_{boş}) \times \frac{KTS}{60} \times 15) \quad (61)$$

Her olasılık için saatlik harcanan yakıt değerleri bulunduğundan sonra saatlik yakıt maliyet değerleri Eşitlik 62 kullanılarak hesaplanmıştır. SHY, saatlik harcanan yakıt değerini MRF, mazot rayiç fiyatını ifade etmektedir.

$$SYM = SHY \times MRF \quad (62)$$

Hafriyat çerçeve sisteminde her kasa uzunluğu ve kamyon modeli olasılığı için oluşan saatlik maliyet değerleri Eşitlik 63 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KTSM = SDM + SYM \quad (63)$$

Kamyon modelleri ve kasa uzunluklarına göre oluşan 240 seçenek arasında en uygun seçeneği belirlemek için birim taşıma maliyeti Eşitlik 64 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden STHM, kamyonun saatlik taşıdığı hafriyat miktarını ifade etmektedir.

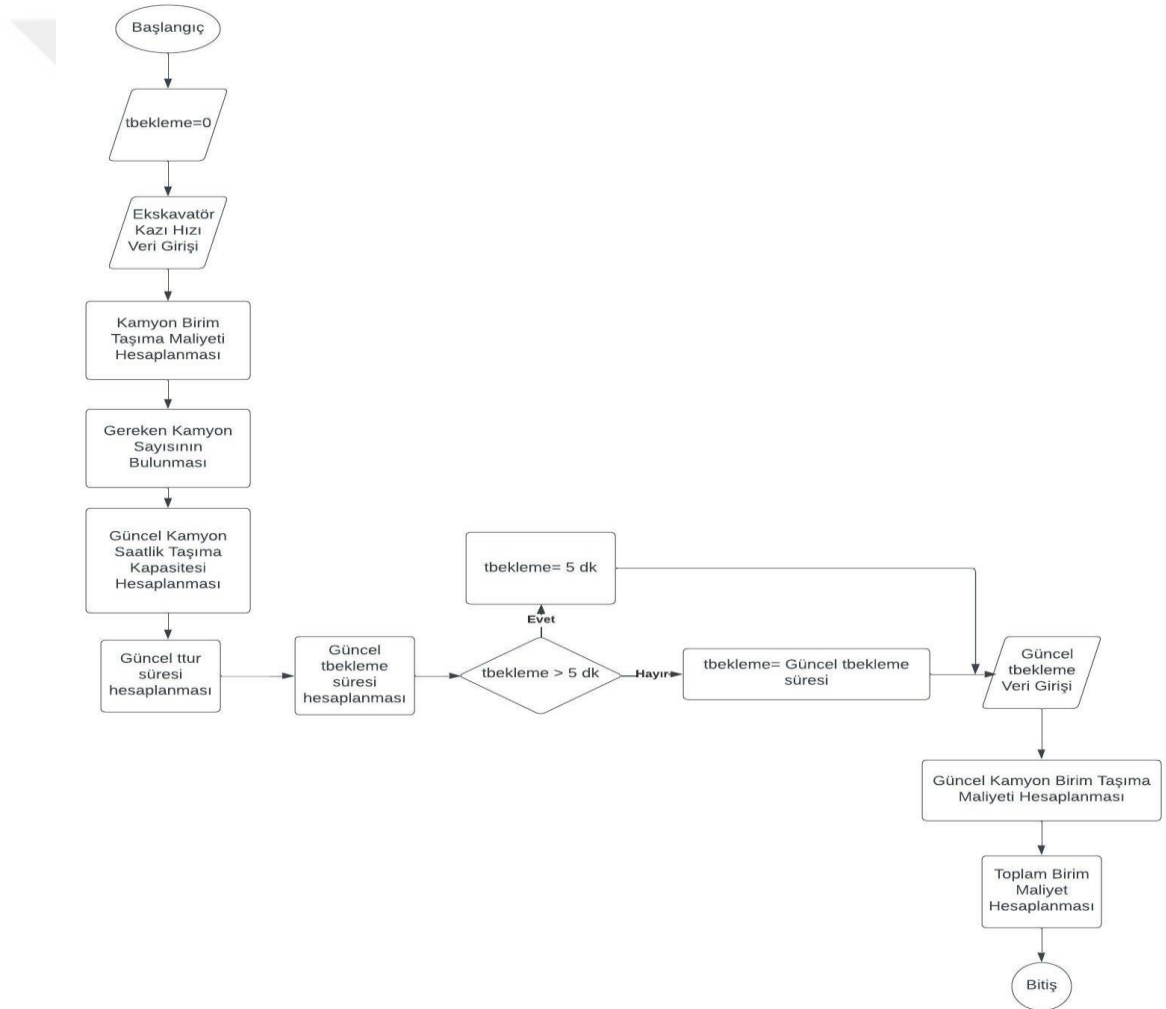
$$BTM = \frac{KTSM}{STHM} \quad (64)$$

Bu şekilde her kasa uzunluğu ve kamyon modeli olasılığına göre bulunan kamyon boş ve dolu ağırlıkları ve taşınabilecek kapasite değerleri ile birlikte değişen saatlik iş verimi ve maliyet değerleri analiz edilmiştir.

2.9. En Düşük Maliyet Analizi ve İş makinelerinin kombinasyonunun gerçekleştirilmesi

Toprak işlerinde kullanılan iş makinelerinin çalışma esnasında birbirleriyle olan etkileşimi projenin toplam süre, maliyet ve iş verimini etkilemektedir. Toprak işlerinde çok sık şekilde kullanılan kamyon ve ekskavatör gibi iş makinelerinin kazı, doldurma, taşıma ve boşaltma vb. gibi iş aşamaları esnasında birbirleriyle uyumlu şekilde çalışması gerekmektedir. İş makineleri birbiriyle uyumlu şekilde çalışmazsa gerçekleştirilen işin süresi ve maliyeti artacak ve iş verimi düşecektir. 2.6. bölümünde gerçekleştirilen kasa uzunluğuna bağlı optimizasyon işlemi sonrası oluşan damper hacmi olasılıkları ile birlikte kamyonların saatlik taşınan kapasite miktarı değerleri elde edilmiştir. Kamyonların saatlik

taşınan kapasite miktarı değerleri ve sistemde bulunan ekskavatör modellerinin sahip olduğu teknik özelliklerle ulaştığı kazı hızı değerleri baz alınarak iş makinesi modellerinin kombinasyon olasılıkları ve bekleme süreleri hesaplanmıştır. Kombinasyon olasılıkları oluşumu ile birlikte oluşan güncel kamyon saatlik taşıma kapasiteleri, güncel tur ve bekleme süreleri ve güncel toplam birim maliyet değerleri analiz edilmiştir. Bu sayede toprak işlerinde kullanılan ekskavatör ve kamyon iş makinelerinin teknik özelliklerine bakılarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucu en az boşta kalan ve en yüksek verimde çalışan en uygun iş makinesi kombinasyonu belirlenmiştir. Şekil 7’de bekleme sürelerini ve en uygun iş makinesi kombinasyonunu belirleyen algoritma şeması gösterilmiştir.



Şekil 7. Bekleme süresi ve İş makinesi kombinasyonu Akış Şeması

İlk olarak kamyonların taşıma işlemi sırasında hiç durmayacağı koşuluna bağlı olarak $tbekleme = 0$ atanmıştır. İş makinesi kombinasyonlarının oluşumu sonrasında elde

edilen kamyon bekleme sürelerini etkilememek adına 0 değerinden başlanmıştır. İşlemlerde kullanılmak adına ekskavatör saatlik kazı hızı verileri sistem veri tabanından çekilmiştir. Sonrasında sunulan algoritma Excel üzerinde yazılan Makro aracılığıyla $t_{bekleme}=0$ koşuluna bağlı olarak her kamyon modeli ve kasa uzunluğu olasılığına göre koşturulmuş ve birim taşıma maliyet değerleri hesaplanmıştır. Her kamyon modeli ve kasa uzunluğu olasılığına göre elde edilen kamyon saatlik taşıma kapasite değerleri sayesinde saatlik ekskavatör kazı miktarını taşımak için gerekli olan kamyon sayısı Eşitlik 65 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden ESKM, ekskavatör saatlik kazı miktarını, KSTK kamyon saatlik taşıma kapasitesini ifade etmektedir.

$$GKS = \frac{ESKM}{KSTK} \quad (65)$$

Gerekli olan kamyon sayısının bulunması ile birlikte güncel kamyon saatlik taşıma kapasite değerleri Eşitlik 66 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$GSTK = \frac{ESKM}{GKS} \quad (66)$$

Güncel kamyon saatlik taşıma kapasitesinin bulunması ile birlikte her kamyon modeline göre oluşan güncel tur süreleri Eşitlik 67 kullanılarak belirlenmiştir. Denklemden ESTK, eski kamyon saatlik taşıma kapasitesini temsil etmektedir.

$$GTS = eski\ t_{tur} \times \frac{ESTK}{GSTK} \quad (67)$$

Bu sayede kamyonların güncel bekleme süreleri Eşitlik 68 kullanılarak hesaplanmıştır. Bekleme süresinin fazla olması durumunda kamyon şoförünün kamyonu boş yere çalıştırıp yakıt harcamasını önlemek adına bekleme süresi sınırı getirilmiştir. Bekleme süresi 5 dakikanın üzerinde ise kamyon şoförü motoru kapatacaktır.

$$GBS = güncel\ t_{tur} - eski\ t_{tur} \quad (68)$$

Güncel boşta kalma sürelerine göre tekrardan kamyonların birim taşıma maliyeti hesaplanmıştır. Ekskavatör ve kamyonların birlikte çalıştığı süre boyunca oluşan toplam birim maliyet değerleri Eşitlik 69 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden BKM, birim kazı maliyetini BTM, birim taşıma maliyetini temsil etmektedir.

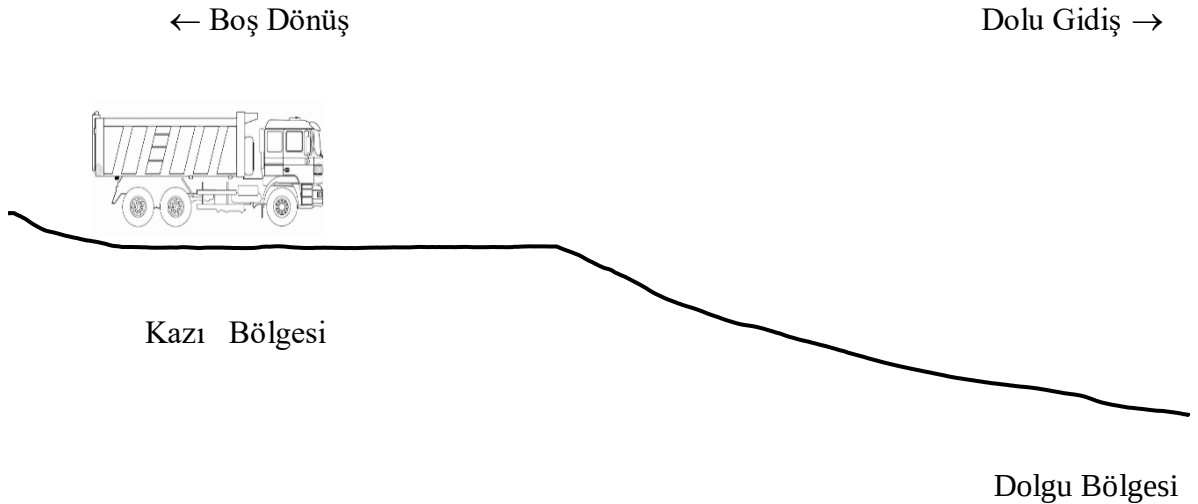
$$TBM = BKM + BTM \quad (69)$$

15 ekskavatör modeli ve 15 kamyon modelinin kombinasyonu sonucu 3600 kombinasyon oluşturulmuştur. Oluşan 3600 iş makinesi kombinasyonlarının bekleme süreleri, toplam saatlik harcanan yakıt, saatlik güncel kamyon taşıma kapasitesi ve toplam birim maliyet değerleri analiz edilmiştir.



3.VAKA ANALİZLERİ

Şekil 8.de görüldüğü üzere hafriyat sahasında kazı bölgesine ulaşan kamyonlar ekskavatörün kazdığı kazı miktarını damperlerine yükleyerek dolgu bölgesine götürür. Kamyonların kazı bölgesi ve dolgu bölgesi arasında gerçekleştirdiği tur süresince ekskavatör yeniden kazı işlemini gerçekleştirmek ve kamyonu taşıyacağı yükü sağlamak zorundadır. Eğer ekskavatör kamyonların gerçekleştirdiği tur süresi boyunca gerekli kazı hızına ulaşamazsa kamyonlar taşıyacağı yükün dolumunu belirli bir süre beklemek zorunda kalacaktır. Kamyonların bekleme süresi artarsa gerçekleştirdiği tur süresi artmaktadır. Bu yüzden saatlik gerçekleştirdiği tur sayısı azalır ve saatlik taşıdığı yük miktarı azalarak iş veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Ekskavatörün kova hacmi, gerçekleştirdiği saatlik kazı hızı, kamyonun taşıma kapasitesi ve taşıma işlemi sırasında gereken kamyon sayısı vb. gibi etkenler sonucu taşıma işlemi sırasında kamyonların bekleme süresi değişmektedir. Gerçekleştirilen toprak işinin daha kısa sürede ve yüksek iş veriminde gerçekleşmesini sağlamak için birbirleriyle uyumlu şekilde çalışacak kamyon-ekskavatör iş makinesi kombinasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen hafriyat çerçeve sistemi ile birlikte en yüksek iş verimini en kısa süre ve en düşük maliyette sağlayan iş makinesi kombinasyonları bekleme süresi, saatlik taşınan kapasite, saatlik harcanan yakıt ve saatlik toplam birim maliyet parametreleri analiz edilerek belirlenmiştir.



Şekil 8. Hafriyat güzergahı

İş makinesi kombinasyonlarının kova hacmi, gerçekleştirdiği saatlik kazı hızı ve taşıma işlemi sırasında gereken kamyon sayısı parametrelerine göre değişen saatlik taşıma kapasitesi değerleri örnek olarak verilen tablo 10 ve 11. de incelenmiştir.

Tablo 10. 330GC ve Arocs 2032 K İş Makinesi Kombinasyonu Verileri

Damper Hacmi (m ³)	Taşınan Güncel Saatlik Kapasite (m ³)	Harcanan Saatlik Yakıt (lt)	Toplam Birim Maliyet (dolar)	Bekleme Süresi (dk)	Kamyon Sayısı (adet)
8,1	23,81	15,87	3,303	3,042	5
8,2	23,81	15,79	3,298	3,164	5
8,2	23,81	15,71	3,292	3,286	5
8,3	23,81	15,63	3,287	3,408	5
8,4	29,76	16,32	3,282	0,009	4
8,4	29,76	16,23	3,277	0,103	4
8,5	29,76	16,13	3,272	0,197	4
8,6	29,76	16,04	3,267	0,292	4
8,7	29,76	15,95	3,263	0,386	4
8,6	29,76	15,88	3,259	0,322	4
8,4	29,76	15,83	3,256	0,060	4
8,2	23,81	15,13	3,254	3,256	5
8,0	23,81	15,09	3,251	2,917	5
7,8	23,81	15,04	3,248	2,578	5
7,7	23,81	15,00	3,245	2,240	5
7,5	23,81	14,95	3,242	1,901	5

Tablo 11. 349 ve Arocs 4851 K İş Makinesi Kombinasyonu Verileri

Damper Hacmi (m ³)	Taşınan Güncel Saatlik Kapasite (m ³)	Harcanan Saatlik Yakıt (lt)	Toplam Birim Maliyet (dolar)	Bekleme Süresi (dk)	Kamyon Sayısı (adet)
21,94	59,78	19,09	3,068	0,64	3
22,01	59,78	19,04	3,066	0,70	3
22,07	59,78	19,00	3,064	0,76	3
22,10	59,78	18,97	3,063	0,79	3
21,91	59,78	18,99	3,064	0,69	3
21,73	59,78	19,01	3,066	0,58	3
21,55	59,78	19,02	3,068	0,48	3
21,37	59,78	19,04	3,070	0,38	3
21,18	59,78	19,06	3,072	0,27	3
21,00	59,78	19,09	3,075	0,17	3
20,82	59,78	19,11	3,077	0,06	3
20,63	44,83	14,37	3,079	5	4
20,45	44,83	14,46	3,082	5	4
20,27	44,83	14,54	3,084	5	4
20,08	44,83	14,61	3,086	5	4
19,90	44,83	14,69	3,089	5	4

Tablo 10 ve 11.de 330 GC ve 349 ekskavatör modellerinin saatlik kazı miktarı değerlerine göre Arocs 2032K ve Arocs 4851 K kamyon modellerinin değişen bekleme süreleri, taşınan saatlik kapasite miktarları, saatlik harcanan yakıt ve toplam birim maliyet değer olasılıkları gösterilmiştir.

Her kamyon modeli için kasa uzunluğu olasılığına göre gerçekleştirilen optimizasyon ile birlikte değişen damper hacimleri, aynı kamyon modeli için farklı saatlik taşıma kapasite olasılıkları sunmuştur. Farklı taşıma kapasite olasılıkları ve 330GC ve 349 ekskavatör modellerinin saatlik kazı hızına göre Arocs 2032K ve Arocs 4851K kamyon modellerinin gereken kamyon sayısı değişmiştir. Tablo 10 ve 11'e bakıldığında kasa uzunluğu olasılığına göre gerçekleştirilen optimizasyon ile birlikte değişen damper hacimleri taşınan saatlik kapasite miktarını etkilemektedir. Arocs 2032K ve Arocs 4851K modellerinin yüksek damper hacmine sahip olasılıklarında taşınan güncel saatlik kapasite miktarı artmaktadır. Yüksek damper hacmine sahip olan olasılıklarda güncel saatlik taşınan kapasite miktarı arttığı için gereken kamyon sayısı değerleri düşmektedir.

Tablo 10 ve 11. deki diğer parametreler incelendiğinde yüksek damper hacmine sahip olan olasılıklarda taşınan güncel saatlik yük miktarının fazla olması iş verimini arttırmakta ve bekleme süresini azaltmaktadır. Kamyon modellerinin taşıdığı saatlik yük miktarında artış ve bekleme süresinde azalma olduğunda kamyonun harcadığı saatlik yakıt miktarı artmıştır. Kamyon modellerinin toplam birim maliyeti saatlik taşınan kapasite miktarı ve harcanan saatlik yakıt miktarı değerlerine göre değişmektedir. Saatlik taşınan kapasite miktarı azalınca kamyonların birim taşıma maliyet değerleri artmaktadır. Harcanan saatlik yakıt miktarı değeri artınca birim yakıt maliyeti artmaktadır. Birim taşıma ve yakıt maliyetinin artması toplam birim maliyet değerlerinin artışına sebep olmaktadır.

3600 iş makinesi kombinasyonunun oluşmasından sonra iş makinesi kombinasyonları en iyi, en kötü ve ortalama toplam birim maliyet, harcanan birim yakıt ve saatlik taşınan kapasite miktarı parametrelerine göre analiz edilmiş ve en uygun iş makinesi kombinasyonları belirlenmiştir. Hesaplamalar sonrası oluşturulan tablolarda taşınan gevşek hacim ve kova hacmi olarak 2 parametre sunulmuştur. Kamyon modellerinin dolu ağırlık kapasite değerlerini aşmamak adına 2 parametreden minimum olanı dorse hacmi olarak kabul edilmiştir.

Tablo 12’de ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen en düşük toplam birim maliyet değerleri gösterilmiştir.

Tablo 12.İş makinesi kombinasyonlarının minimum toplam birim maliyet değerleri

Ekskavatör Modeli	En düşük Toplam Birim Maliyet (dolar)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m ³)	Saatlik Maksimum Taşınan Kapasite (m ³)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kamyon Sayısı (adet)
320 GC	2,59	Actros 1832L	15	37,2	2,07	2
320	2,51	Actros 1832L	15	29,52	3,2	3
323	2,44	Actros 1832L	15	32,24	1,44	3
326	2,46	Actros 1832L	15	38,2	3,48	3
330 GC	2,43	Actros 1832L	15	39,69	2,88	3
330	2,45	Actros 1832L	15	44,65	1,16	3
336 GC	2,43	Actros 1832L	15	46,63	0,58	3
336	2,54	Actros 1832L	15	46,63	0,58	3
345 GC	2,54	Actros 1832L	15	44,83	1,87	4
349	2,54	Actros 1832L	15	44,83	1,87	4
352	2,33	Actros 1832L	15	47,77	1,41	5
374	2,27	Actros 1832L	15	46,77	2,21	7
395	2,14	Actros 1832L	15	53,74	0,53	9
M320D2	2,54	Actros 1832L	15	29,27	3,38	3
M322D2	2,54	Actros 1832L	15	38,94	3,17	3

Sistemde bulunan her ekskavatör modeli Actros 1832L kamyon modeli ile birlikte kullanıldığında en düşük toplam birim maliyet değerine ulaşmıştır. Sonuçlara bakılınca projenin toplam maliyetinin en düşük seviyede olmasını amaçlayan proje yöneticisi, Caterpillar 395 ve Mercedes Actros1832L iş makinesi kombinasyonunu seçmesi gerekir.

Çünkü Caterpillar 395 ve Actros 1832L iş makinelerinin kombinasyonu 2,14 dolar ile en düşük toplam birim maliyet değerini elde etmiştir. Ek olarak Caterpillar 395 - Actros 1832L kombinasyonu saatlik maksimum taşınan kapasite ve en az bekleme süresi değerlerine sahiptir. Bu yüzden en yüksek iş verimine sahip olan iş makinesi kombinasyonudur. Proje yöneticisi tarafından seçilebilecek en uygun iş makinesi kombinasyonlarından biridir. Diğer yandan bu iş kombinasyonunda gereken kamyon sayısının fazla olmasının nedeni Caterpillar 395 ekskavatör modelinin yüksek kova hacmi nedeniyle saatlik kazı hızı miktarının fazla olmasıdır.

Tablo 13.te ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen en yüksek toplam birim maliyet değerleri gösterilmiştir.

Tablo 13. İş makinesi kombinasyonlarının maksimum toplam birim maliyet değerleri

Ekskavatör Modeli	En yüksek Toplam Birim Maliyet (dolar)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m³)	Saatlik Minimum Taşınan Kapasite (m³)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kova Hacmi (m³)	Kamyon Sayısı (adet)
320 GC	3,80	Actros 2646	9,5	24,80	3,43	11	3
320	3,73	Actros 2646	9,5	29,51	0,88	11	3
323	3,66	Actros 2646	9,5	24,18	3,3	11	4
326	3,68	Actros 2646	9,5	28,65	0,83	11	4
330 GC	3,65	Actros 2646	9,5	29,76	0,33	11	4
330	3,67	Actros 2646	9,5	26,79	1,47	11	5
336 GC	3,65	Actros 2646	9,5	27,98	0,87	11	5
336	3,75	Actros 2646	9,5	27,98	0,87	11	5
345 GC	3,65	Actros 2646	9,5	29,89	1,76	11	6
349	3,76	Actros 2646	9,5	29,89	1,76	11	6
352	3,55	Actros 2646	9,5	34,12	1,08	11	7
374	3,49	Actros 2646	9,5	32,74	0,55	11	10
395	3,36	Actros 2646	9,5	34,55	0,59	11	14
M320D2	3,75	Actros 2646	9,5	29,27	0,99	11	3
M322D2	3,54	Actros 2646	9,5	29,20	0,58	11	4

Tablo 13'te en yüksek toplam birim maliyet değerlerine bakıldığında Caterpillar 320 GC ve Actros 2646 iş makinesi kombinasyonu 3,80 dolar ile en yüksek toplam birim maliyet değerini vermektedir. En düşük ve en yüksek toplam birim maliyet değerleri karşılaştırıldığında 1,66 dolar birim maliyet farkı bulunmaktadır. Hafriyat çerçeve sistemi sayesinde elde edilen kâr miktarı küçük çaplı toprak işlerinde dikkate alınmayacak

miktarda olsa da örneğin 1 milyon m³'lük büyük çaplı toprak işlerinde doğru iş makinesi kombinasyonu seçimi maksimum 1,66 milyon dolar kar sağlayabilir.

Tablo 14.te ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen en düşük harcanan birim yakıt değerleri gösterilmiştir.

Tablo 14. İş makinesi kombinasyonlarının minimum harcanan birim yakıt değerleri

Ekskavatör Modeli	En düşük Harcanan Birim Yakıt (lt)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m³)	Saatlik Maksimum Taşınan Kapasite (m³)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)
320 GC	0,362	Arocs 4851K	22,10	37,20	5
320	0,385	Actros 1832L	17,7	44,27	1,81
323	0,361	Actros 1832L	17,7	48,37	0,46
326	0,329	Arocs 4851K	22,10	38,2	5
330 GC	0,327	Arocs 4851K	22,10	39,69	5
330	0,321	Arocs 4851K	22,10	44,65	5
336 GC	0,319	Arocs 4851K	22,10	46,63	5
336	0,319	Arocs 4851K	22,10	46,63	5
345 GC	0,317	Arocs 4851K	22,10	59,78	0,79
349	0,317	Arocs 4851K	22,10	59,78	0,79
352	0,312	Actros 1832L	17,7	59,72	0,08
374	0,299	Arocs 4851K	22,10	65,48	0,71
395	0,289	Arocs 4851K	22,10	69,10	0,42
M320D2	0,388	Actros 1832L	17,7	43,90	1,94
M322D2	0,328	Arocs 4851K	22,10	38,94	5

Çıkan sonuçlarda Caterpillar 395 ve Mercedes Arocs 4851K iş makinesi kombinasyonu 0,289 lt harcanan birim yakıt miktarı ile en uygun iş makinesi kombinasyonunu sunmuştur. İş makinesi kombinasyonunun bu sonuca ulaşmasının en büyük etkeni Arocs 4851K kamyon modelinin saatlik maksimum taşınan kapasite miktarı değerinin yüksek olmasıdır. Harcanan birim yakıt miktarının taşınan m³ başına hesaplanmasından dolayı saatlik taşıma kapasitesi önemli bir parametredir. Arocs 4851K kamyon modelinin hem damper hacminin hem taşıyabileceği dolu ağırlık kapasite miktarının yüksek olması saatlik taşınan yük miktarını arttırmaktadır. Ayrıca Arocs 4851 K kamyon modelinin saatlik taşıdığı yük miktarının fazla ve bekleme süresinin kısa olmasından dolayı iş verimi yüksektir. Proje yöneticisi diğer seçenekleri ele alarak benzer verilere sahip Caterpillar 374 – Arocs 4851K iş makinesi kombinasyonuna da seçebilir.

Tablo 15.de ise ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen en yüksek harcanan birim yakıt değerleri gösterilmiştir.

Tablo 15. İş makinesi kombinasyonlarının maksimum harcanan birim yakıt değerleri

Ekskavatör Modeli	En yüksek Harcanan Birim Yakıt (lt)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m³)	Saatlik Minimum Taşınan Kapasite (m³)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kova Hacmi (m³)
320 GC	0,731	Actros 2646	9,5	24,8	3,26	11
320	0,785	Actros 2646	8,2	22,14	3,76	8,2
323	0,744	Actros 2646	9,5	24,18	4,56	11
326	0,664	Actros 2646	9,5	28,65	1,92	11
330 GC	0,746	Actros 2646	8,2	23,81	3,11	8,2
330	0,694	Actros 2646	9,5	26,79	3,40	11
336 GC	0,674	Actros 2646	9,5	27,98	2,73	11
336	0,674	Actros 2646	9,5	27,98	2,73	11
345 GC	0,645	Actros 2646	9,5	29,89	2,05	11
349	0,645	Actros 2646	9,5	29,89	2,05	11
352	0,639	Actros 2646	8,2	29,86	0,55	8,2
374	0,641	Actros 2646	8,2	29,76	0,85	8,2
395	0,614	Actros 2641	8,2	30,23	0,79	8,2
M320D2	0,790	Actros 2646	8,2	21,95	3,90	8,2
M322D2	0,756	Actros 2646	8,2	23,36	3,40	8,2

Çıkan sonuçlarda Caterpillar M320D2 ve Mercedes Actros 2646 iş makinesi kombinasyonu 0,790 lt harcanan birim yakıt miktarı ile en yüksek saatlik harcanan birim yakıt değerine ulaşmıştır. En yüksek harcanan birim yakıt değerine ulaşmasının sebebi Actros 2646 kamyon modelinin saatlik maksimum taşınan kapasite miktarı değerinin düşük olmasıdır. Actros 2646 kamyon modelinin hem damper hacminin hem taşıyabileceği dolu ağırlık kapasite miktarının düşük olması saatlik taşınan yük miktarını azaltmaktadır. Ayrıca Actros 2646 kamyon modelinin saatlik taşıdığı yük miktarının az ve bekleme süresinin fazla olmasından dolayı iş verimi düşüktür.

Proje yöneticisi tüm kombinasyon seçeneklerindeki hem harcanan yakıt miktarı hem iş verimi değerlerini analiz ederek kendisine en uygun olan iş makinesi kombinasyonunu seçebilir.

Taşıtların egzozlarından çıkan dumanların içerisinde yüksek oranda toz ve çeşitli zararlı gazlar vardır. Harcanan yakıt miktarının artışı ile birlikte egzozlardan çıkan duman miktarının fazlalığı şehirlerde ve kırsallarda hava kirliliği, iklim değişikliği gibi çevresel zararlara sebebiyet vermektedir. Hafriyat çerçeve sistemi, çevresel zararları azaltmak için harcanan yakıt miktarını analiz etme ve ekipman seçim hakkı sunmuştur.

Tablo 16.da ise ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen saatlik maksimum taşınan kapasite miktarı değerleri gösterilmiştir.

Tablo 16. İş makinesi kombinasyonlarının saatlik maksimum taşınan kapasite değerleri

Ekskavatör Modeli	Saatlik Maksimum Taşınan Kapasite (m ³)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m ³)	En düşük Birim Yakıt (lt)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kova Hacmi (m ³)
320 GC	37,2	Actros 1832 L	17,7	16,35	4,58	17,7
		Arocs 3240	13,7	18,68	0,88	13,7
		Arocs 3332 K	14,8	16,09	1,12	14,8
		Arocs 3345 K	14,5	16,30	0,69	14,5
		Arocs 4145 K	18,4	15,59	5	18,5
		Arocs 4148 K	18,1	17,68	4,38	18,1
		Arocs 4851 K	22,1	13,47	5	22,1
320	44,28	Actros 1832 L	17,7	17,08	1,81	17,7
		Arocs 4145 K	18,4	19,18	2,14	18,5
		Arocs 4148 K	18,1	18,67	1,55	18,1
		Arocs 4851 K	22,1	17,29	3,81	22,1

323	48,37	Actros 1832 L Arocs 4145K Arocs 4148K Arocs 4851 K	17,7 18,4 18,1 17,7	17,5 19,8 19,24 17,73	0,58 0,86 0,30 2,28	17,7 18,5 18,1 22,1
326	38,2	Actros L1848 Actros L1851 Actros 1845LS Actros 1832 L Arocs 3240 Arocs 3332K Arocs 3345K Arocs 4145K Arocs 4148K Arocs 4851K	12 12 11,4 17,7 13,7 14,8 14,5 18,4 18,1 22,1	17,89 18,45 18,43 13,09 18,84 16,18 16,40 14,77 14,60 12,60	0,51 0,58 0,008 5 2,17 2,51 2,05 5 5 5	12 12 11,4 17,7 13,7 14,8 14,5 18,5 18,1 22,1
330 GC	39,69	Actros L1848 Actros L1851 Actros 1845LS Actros 1832 L Arocs 3240 Arocs 3332 K Arocs 3345 K Arocs 4145 K Arocs 4148 K Arocs 4851 K	12 12 11,9 17,7 13,7 14,8 14,5 18,4 18,2 22,1	18,11 18,69 18,70 13,51 19,09 16,33 16,5 15,26 15,08 13	0,02 0,09 0,1 5 1,62 1,92 1,49 5 5 5	12 12 11,9 17,7 13,7 14,8 14,5 18,5 18,3 22,1
330	44,65	Actros 1832 L Arocs 3240 Arocs 3332 K Arocs 4145 K Arocs 4148 K Arocs 4851 K	17,7 13,7 14,8 18,4 18,1 22,1	17,12 19,91 16,80 19,24 18,72 14,34	3,51 0,05 0,22 3,89 3,28 5	17,7 13,7 14,8 18,5 18,1 22,1
336 GC	46,63	Actros 1832 L Arocs 4145 K Arocs 4148 K Arocs 4851 K	17,7 18,4 18,1 22,1	17,32 19,54 19 14,88	2,81 3,18 2,57 5	17,7 18,5 18,1 22,1
336	46,63	Actros 1832 L Arocs 4145 K Arocs 4148 K Arocs 4851 K	17,7 18,4 18,1 22,1	17,32 19,54 19 14,88	2,81 3,18 2,57 5	17,7 18,5 18,1 22,1
345 GC	59,78	Arocs 4851 K	22,1	18,97	0,79	22,1
349	59,78	Arocs 4851 K	22,1	18,97	0,79	22,1
352	59,72	Arocs 4145K Arocs 4851 K	18,4 22,1	21,52 18,96	0,34 1,65	18,5 22,1
374	65,48	Arocs 4851 K	22,1	19,59	0,71	22,1

395	69,1	Arocs 4851 K	22,1	19,98	0,42	22,1
M320D2	43,9	Actros 1832 L	17,7	17,04	1,94	17,7
		Arocs 4145 K	18,4	19,13	2,27	18,5
		Arocs 4148 K	18,1	18,62	1,68	18,1
		Arocs 4851 K	22,1	17,25	3,96	22,1
M322D2	38,94	Actros L1848	12	18	0,26	12
		Actros L1851	12	18,57	0,33	12
		Actros 1845LS	11,7	18,57	0,15	11,7
		Actros 1832 L	17,7	13,3	5	17,7
		Arocs 3240	13,7	18,97	1,89	13,7
		Arocs 3332 K	14,8	16,25	2,21	14,8
		Arocs 3345 K	14,5	16,48	1,76	14,5
		Arocs 4145 K	18,4	15,01	5	18,5
		Arocs 4148 K	18,2	14,84	5	18,3
		Arocs 4851 K	22,1	12,80	5	22,1

Çıkan sonuçlarda Caterpillar 395 ve Mercedes Arocs 4851K iş makinesi kombinasyonu 69,1 m³' lük saatlik taşıma kapasitesi miktarı ile en yüksek iş verimine sahip iş makinesi kombinasyonudur. Bu sonuca ulaşılmasının nedeni Caterpillar 395 ekskavatör modelinin diğer ekskavatör modellerine göre yüksek kova hacmi nedeniyle saatlik kazı hızının daha fazla olmasıdır. Ek olarak Arocs 4851K kamyon modelinin yüksek damper hacmi, saatlik kazı miktarının daha kısa sürede daha çok miktarda taşınmasına yardım etmektedir. Birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışan iş kombinasyonu sayesinde bekleme süresi azalır ve iş verimi artar.

Tablo 17.de ise ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon olasılığı sonucunda her ekskavatör modeli için elde edilen saatlik minimum taşınan kapasite miktarı değerleri gösterilmiştir.

Tablo 17. İş makinesi kombinasyonlarının saatlik minimum taşınan kapasite değerleri

Ekskavatör Modeli	Saatlik Minimum Taşınan Kapasite (m ³)	Kamyon Modeli	Taşınan Gevşek Hacim (m ³)	En yüksek Saatlik Yakıt (lt)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kova Hacmi (m ³)
320 GC	24,80	Actros L1848	9,3	16,05	3,08	9,3
		Actros L1851	9,3	16,43	3,13	9,3
		Actros 1842 LS	10,2	15,92	4,72	10,2
		Actros 1845 LS	10,3	16,27	4,79	10,3
		Arocs 3240	12,4	12,71	5	12,4
		Arocs 2032K	8,1	16,02	1,24	10,2

320 GC	24,80	Arocs 3332 K	13,4	10,84	5	13,4
		Arocs 3345 K	13,4	11,04	5	13,4
		Axor2529CD	10,7	15,05	4,94	11
		Actros2646	9,5	18,14	3,26	11
		Actros2641	9,6	17,50	3,40	11
320	22,14	Actros 1842 LS	8,6	15,36	4,62	8,6
		Arocs 2032 K	8,1	15,64	3,68	10,2
		Axor 2529CD	9	14,70	4,91	9
		Actros2646	8,2	17,39	3,76	8,2
		Actros2641	8,2	16,95	3,69	8,2
323	24,18	Actros L1848	9,3	15,96	4,35	9,3
		Actros L1851	9,3	16,34	4,40	9,3
		Actros 1842 LS	9,5	15,75	4,82	9,5
		Actros 1845 LS	9,6	16,11	4,90	9,6
		Arocs 2032K	8,1	15,93	2,34	10,2
		Axor2529CD	9,9	14,93	4,99	9,9
		Actros2646	9,5	18,00	4,56	11
		Actros2641	9,6	17,38	4,71	11
326	22,92	Arocs 2032 K	8,1	14,99	3,50	8,1
		Axor 2529CD	8,2	14,75	3,48	8,2
330 GC	23,81	Actros 1842 LS	8,2	15,51	3,26	8,2
		Arocs 2032K	8,1	15,87	3,04	10,2
		Axor 2529CD	8,6	14,85	3,53	8,6
		Actros2646	8,2	17,77	3,11	8,2
		Actros2641	8,2	17,28	3,03	8,2
330	26,79	Actros L1848	9,3	16,33	3,21	9,3
		Actros L1851	9,3	16,75	3,26	9,3
		Actros 1842 LS	9,3	16,08	3,36	9,3
		Actros 1845 LS	9,4	16,48	3,43	9,4
		Arocs 2032K	8,1	16,30	1,35	10,2
		Axor 2529 CD	9,7	15,19	3,49	9,7
		Actros 2646	9,5	18,60	3,40	11
		Actros 2641	9,6	17,90	3,53	11
336 GC	23,31	Arocs 2032K	7,5	14,90	2,49	7,5
336	23,31	Arocs 2032K	7,5	14,90	2,49	7,5
345 GC	25,62	Arocs 2032K	7,8	15,24	2,02	7,8
349	25,62	Arocs 2032K	7,8	15,24	2,02	7,8
352	26,54	Arocs 2032K	7,7	15,29	1,46	7,7
374	27,28	Arocs 2032K	7,5	15,31	0,99	7,5
395	28,45	Arocs 2032K	7,5	15,43	0,63	7,5
M320D2	21,95	Actros 1842 LS	8,6	15,33	4,76	8,6
		Arocs 2032 K	8,1	15,61	3,82	10,2
		Axor 2529 CD	8,8	14,67	4,71	8,8
		Actros 2646	8,2	17,35	3,90	8,2
		Actros 2641	8,2	16,91	3,82	8,2

M322D2	23,36	Arocs 2032K	8,1	15,81	3,33	10,2
		Axor 2529 CD	8,4	14,80	3,51	8,4
		Actros 2646	8,2	17,67	3,40	8,2
		Actros 2641	8,2	17,19	3,32	8,2

Çıkan sonuçlarda Caterpillar M320D2 ekskavatör modeli Mercedes Actros 1842 LS, Arocs 2032 K, Axor 2529 CD, Actros 2646 ve Actros 2641 kamyon modelleri ile birlikte iş makinesi kombinasyonları oluşturması sonucu 21,95 m³'lük saatlik taşıma kapasitesi değeri ile en düşük iş verimine sahip olmaktadır. Bu sonuca ulaşılmasının nedeni kamyon modellerinin düşük damper hacmine sahip olması nedeni ile saatlik kazı miktarının daha uzun sürede daha az miktarda taşınmasıdır. Ek olarak Caterpillar M320D2 ekskavatör modelinin diğer ekskavatör modellerine göre düşük kova hacmi nedeniyle saatlik kazı hızının daha düşük olmasıdır. Saatlik kazı ve taşınan kapasite miktarı düşünce iş verimi düşmektedir. Tablo 17.deki veriler kamyon başına değerleri ifade etmektedir. Ekskavatör modelinin saatlik kazı hızını karşılamak için kamyon sayısı arttırıldığında, artan kamyon sayısı ile bekleme süresi artar ve iş verimi düşmektedir.

Saatlik maksimum ve minimum taşınan kapasite miktarları karşılaştırıldığında hafriyat çerçeve sistemi, proje yöneticisine en iyi iş makinesi kombinasyonunu belirleme imkanı tanıyarak iş verimini maksimum;

$$\dot{IV} = \frac{SMTK - TSMK}{TSMK} \times 100 = \frac{69,1 - 21,95}{21,95} \times 100 = \%201 \text{ oranında arttırabilme fırsatı sunmuştur.}$$

Denklemden $\dot{IV}$ iş verimini, SMTK saatlik maksimum taşıma kapasitesini, TSMK saatlik minimum taşıma kapasitesini ifade etmektedir.

Tablo 18.de ise ekskavatör ve kamyon modellerinin dorse hacmine göre oluşan 3600 kombinasyon sonucunda eğer her ekskavatör modeli için proje yöneticisi rastgele bir iş kombinasyonu seçerse oluşacak ortalama harcanan yakıt, taşıma kapasitesi ve toplam birim maliyet değerleri gösterilmiştir.

Tablo 18. İş makinesi kombinasyonlarının ortalama değerleri

Ekskavatör Modeli	Ortalama Harcanan Birim Yakıt (lt)	Ortalama Toplam Birim Maliyet (dolar)	Ortalama Taşınan Gevşek Hacim (m³)	Saatlik Ortalama Taşınan Kapasite (m³)	Ortalama Kamyon Bekleme Süresi (dk)	Kova Hacmi (m³)
320 GC	0,541	3,29	12,9	30,28	3,21	13,2
320	0,523	3,22	12,9	32,34	2,79	13,2
323	0,526	3,15	12,9	33,02	2,79	13,2
326	0,502	3,16	12,9	33,46	2,76	13,2
330 GC	0,502	3,13	12,9	34,14	2,66	13,2
330	0,499	3,16	12,9	35,34	2,56	13,2
336 GC	0,503	3,14	12,9	35,73	2,51	13,2
336	0,503	3,24	12,9	35,73	2,51	13,2
345 GC	0,478	3,14	12,9	38,30	1,87	13,2
349	0,478	3,25	12,9	38,30	1,87	13,2
352	0,461	3,03	12,9	40,83	1,35	13,2
374	0,445	2,98	12,9	43,02	0,94	13,2
395	0,432	2,85	12,9	45,25	0,6	13,2
M320D2	0,525	3,24	12,9	32,07	2,89	13,2
M322D2	0,502	3,03	12,9	33,79	2,72	13,2

Sonuçlara bakınca sistemdeki kamyon modelleri ile kombinasyonu sonucu 395 ekskavatör modeli 0,432 lt ile en iyi ortalama harcanan birim yakıt değerini, 2,85 dolar ve 45,25 m³ ile en iyi ortalama toplam birim maliyet ve en iyi ortalama saatlik taşınan kapasite değerini vermiştir. Aynı zamanda 395 ekskavatör modeli kamyon modelleri ile en az bekleme süresi içerisinde çalışan ekskavatör modelidir. En iyi ortalama değerler minimum ve maksimum değerler ile karşılaştırıldığında, ortalama harcanan birim yakıt minimum harcanan birim yakıttan m³ başına 0,143 lt fazla, maksimum harcanan birim yakıttan m³ başına 0,358 lt az harcamaktadır. Ortalama toplam birim maliyet, minimum toplam birim maliyetten 0,71 dolar fazla, maksimum toplam birim maliyetten 0,95 dolar az olmaktadır. Ortalama saatlik taşınan kapasite miktarı, maksimum saatlik taşınan kapasite miktarından 23,85 m³ az, minimum saatlik taşınan kapasite miktarından 23,30 m³ fazla kapasiteye sahiptir. Saatlik minimum ve ortalama taşınan kapasite miktarları karşılaştırılınca iş verimi maksimum;

$$İV = \frac{STOK-STMK}{STMK} \times 100 = \frac{45,25-21,95}{21,95} \times 100 = \%106 \text{ oranında arttırabilir.}$$

Ortalama ve en yüksek toplam birim maliyet değerleri karşılaştırıldığında eęer toplam 1 milyon m³ kazı hacminde bir iř yapılırsa maksimum 950 bin dolar değerinde maliyet dūřürülebilir.

Sonuçlara genel olarak bakılınca proje yöneticisi maliyet karından feragat ederek işi daha kısa bir sürede bitirmek istiyorsa Caterpillar 395 ve Mercedes Arocs 4851K iş makinesi kombinasyonunu, projenin toplam maliyetini göz önünde bulunduruyorsa Caterpillar 395 ve Mercedes Actros 1832L iş makinesi kombinasyonunu seçmesi planlanan hedeflere ulaşmak açısından en uygun seçenekler olacaktır.

Hafriyat çerçeve sistemi sayesinde toplam birim maliyet, saatlik taşınan kapasite miktarı, dorse hacmi, harcanan birim yakıt ve bekleme süresi parametreleri dikkate alınarak en uygun iş makinesi kombinasyonu belirlenebilir.

4.TARTIŞMA VE SONUÇ

Oluşturulan hafriyat çerçeve sistemi sayesinde hafriyat güzergâhı ölçümünde kullanılan sistemin Ardunio kart ve GPS modülü harici ek bir cihaz gereksinimi bulunmamaktadır. Belirtilen cihazlar yaklaşık \$20 karşılığında temin edilebilmektedir. Bu yüzden tasarlanan sistemin piyasada ölçüm için kullanılan GPS ölçüm cihazlarına göre yüksek fiyat avantajı bulunmaktadır. Ayrıca elde ettiğimiz koordinat verileri ve Microsoft Excel programında gerçekleştirdiğimiz hesaplamalar ve analizler 50 Kb'lık düşük bir veri boyutu kaplayarak kolaylıkla saklanabilir ve sonradan kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Geliştirilen ölçüm sistemi ileride gerçekleştirilecek çalışmalarda daha korunaklı bir plaka ile düşme, hava şartlarından etkilenme, bozulma vb. gibi durumlardan korunabilir. Ayrıca yol yapısı, zemin türü vb. gibi farklı özelliklere sahip hafriyat güzergâhlarını GPS ölçüm sistemi ile bilgisayara kaydederek farklı hafriyat güzergâhlarını karşılaştırarak projenin iş makinesi seçimi, maliyeti ve zamanı üzerine etkileri araştırılabilir. GPS ölçüm sistemi başka araçlara monte edilerek hafriyat güzergahında üretim hızı karşılaştırılması yapılabilir.

Ayrıca ülkemizin ekonomik durumunu göz önünde bulundurulduğunda yüksek maliyetli ithal GPS ölçüm cihazları yerine kullanabilecek yeterli konum doğruluğuna sahip, hızlı ve kolay bir şekilde kullanılabilen, düşük maliyetli, araca kolayca monte edilebilen taşınabilir ve saha yerinde gerçek zamanlı gözlem ve ölçüm avantajı sağlayan yerli bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu tasarım sayesinde piyasadaki mühendis veya müteahhitlerin, yüzeysel konum, yükseklik ve mesafe değerleri veren Google Earth gibi uygulamalara göre daha yüksek doğrulukta ve çözünürlükte veri elde etme imkânı olacaktır.

Oluşturulan çerçeve sistemde taşıma işlemini gerçekleştirecek kamyon modelleri üzerinde analiz ve hesaplamalar gerçekleştirilerek minimum maliyet ve zaman koşullarını sağlayacak olan kamyon modelinin bulunması hedeflenmiştir. Taşıma işlemini en kısa sürede gerçekleştirmek için birçok faktörün incelenmesi gerekmektedir. Kamyon modellerinin dolu ve boş ağırlıkları, beygir gücü, taşıma kapasitesi gibi teknik özellikleri kamyonun yol güzergâhında gerçekleştireceği hızı buna bağlı olarak taşıma süresini, taşınacak yükü, harcanacak yakıtı ve işin toplam maliyetini etkilemektedir. Ayrıca yol güzergahının toplam mesafesi, zemin koşulları, arazi yapısı, yol güzergahındaki düz ve

viraj kısımlarına göre oluşan hız emniyet koşulları taşıma işlemini etkileyen faktörlerdendir. Aynı zamanda kullanılan kamyon türüne göre ve yolun yapısına bağlı olarak bozulma, lastik patlaması vb. gibi ek maliyetler ortaya çıkarabilir. Belirtilen durumlar aykırı olay olarak tanımlanmış ve analizlerin dışında tutulmuştur. Fakat bütün iş makineleri için yedek parça ve bakım onarım maliyetleri alınarak düzenli aralıklarda lastik tekerlek ve diğer parça ve aksamların onarıldığı veya değiştirildiği kabul edilmiştir.

Hafriyat çerçeve sistemine eklenen çeşitli iş makineleri modelleri sayesinde kullanıcıya gerçekleştireceği toprak işi için birden fazla seçeneği analiz etme ve seçim şansı tanınmıştır. Aynı zamanda kullanıcı proje öncesinde amaçladığı toplam kazı miktarı ve çalışma süresini sağlamak adına seçeceği iş makinelerini çevrim sayısı, salınım açısı, kazı derinliği, malzeme türü, kova hacmi, çalışma, yönetim ve hafriyat güzergahı koşullarına göre değerlendirebilir. Kullanıcı, sisteme yüklenen bu özellikler sayesinde gerçekleştireceği toprak işi öncesinde iş makineleri modelleri arasında kısa sürede en düşük maliyet ile en yüksek verimi sağlayabilecek en uygun iş makinesi kombinasyonunu belirleyebilecektir. Kullanıcı, planladığı toplam üretim miktarı ve süresine ulaşmak için kaç tane iş makinesine ihtiyacı olduğunu tespit edebilecektir.

Sistem, herkesin kolaylıkla anlayabileceği ve hızlı bir şekilde kullanıp sonuç alabileceği şekilde geliştirilmiştir. Ek olarak sistem, ölçülen hafriyat güzergahını çalışma başlamadan önce kullanıcıya yatay ve düşey grafikler aracılığıyla modelleyerek aktarmaktadır. Bu sayede kullanıcı hafriyat, taşıma ve saha geliştirme hizmetlerinde kullanacağı hafriyat güzergahını çalışma başlamadan önce görsel bir şekilde analiz etme imkanına sahip olmaktadır.

Sistem, kullanıcıya yol güzergâhı hakkında sisteme yüklenen çeşitli kamyon modelleri ve yol koşulları sayesinde detaylı analiz imkânı sağlamaktadır. Sisteme eklenen çeşitli kamyon modellerinin yol güzergahının düz ve viraj kısımlarında ulaşacağı hızın tespitini ve analizini gerçekleştirmek kullanılacak en uygun kamyon modelini tespit etmeye fayda sağlar. Bu tespit sayesinde seçilen yol güzergâhı ve proje koşullarına göre taşıma işleminin maliyeti ve süresi azalacaktır. Her yol güzergahında viraj kısımlarının belirli bir maksimum hız sınırı vardır. Kamyonun taşıma işlemini gerçekleştirirken yol güzergâhı üzerinde ulaştığı mevcut hız değerlerinin hız limitlerini aşmaması gerekmektedir. Ölçümü yapılan yol güzergâhının hız limitlerini belirleyerek, kullandığımız kamyon modeline göre yol güzergâhı üzerinde hangi bölgelerde şoförün daha dikkatli

olması gerektiği ve hangi bölgelerde hızlanıp yavaşlaması gerektiğini belirlemek güvenli bir yük taşıma işleminin gerçekleşmesine yardımcı olur. Ayrıca yük taşıma işleminin verimliliğini ve üretkenliğini arttıracaktır. Ek olarak hafriyat güzergahı üzerinde çalışacak kamyon modellerinin hız ve süre analizi kullanıcıya seçeceği kamyon modelinin beygir gücünün hafriyat güzergahında yeterli olup olmayacağının tespitini, harcayacağı yakıt miktarını ve maliyetini göstermektedir.

Sisteme gelecekte farklı hafriyat güzergahları eklenerek, hafriyat güzergahlarının eğimi, yay uzunluğu, açısı ve zemin koşullarına göre değişkenlik gösterebilecek hız, süre, maliyet, harcanacak yakıt, kamyon tur sayıları ve kamyonların motor gücü yeterliliği özellikleri karşılaştırıp analiz edilebilir. Aynı zamanda sisteme daha fazla iş makinesi türü eklenerek gerçekleştirilecek toprak işinin farklı iş makinesi seçenekleri ile daha detaylı ve kapsamlı analizleri gerçekleştirilebilir.

Sistemin sağladığı en büyük avantajlardan birisi, yol güzergâhı üzerinde taşıma işlemini gerçekleştirecek kamyon modellerinin damper hacimlerinin kasa uzunlukları olasılıklarına göre optimizasyonu işlemidir. Kullanıcı, sistemde bulunan kamyon modellerinin kasa uzunlukları olasılıklarına göre hangi kamyon modelini ve kasa uzunluğu olasılığını seçerse taşıyacağı yük miktarının artacağını tespit edebilmektedir. Aynı zamanda seçtiği iş makinesi modelleri ve kasa uzunluğuna göre oluşacak saatlik maliyeti ve harcanacak saatlik yakıtı görebilmektedir. Bu sayede kullanıcı gerçekleştireceği toprak işleri projesi için en düşük maliyet ve en yüksek iş verimi değerlerini sağlayan iş makinesi kombinasyonunu belirleyebilir ve projesinde kullanabilir.

Sistem gelecekte ekskavatör büyüklüğüne bağlı çevrim sayısı, kazı derinliğine bağlı salınım açısı vb. gibi toprak işinin süresini, maliyetini ve verimini etkileyecek çeşitli faktörlerinde optimizasyon işlemini gerçekleştirerek çalışma alanını genişletebilir. Oluşturulan hafriyat çerçeve sistemi, kullanıcıya gerçekleştireceği toprak işinin toplam süresini ve maliyetini azaltırken iş verimini arttıracak iş makinesi teknik özelliklerini, kombinasyonunu ve çalışma koşullarını tespit etme, analiz etme ve belirleme imkânı sunmaktadır. Sistem gelecekte çalışma alanını, toprak işlerini gerçekleştiren birimlerin çevrim içi bilgi aktarımını sağlamak adına IoT ve Bilgi teknolojileri kullanımı ile genişletebilir. Ayrıca kazı alanı ve yol güzergahı gibi potansiyel çalışma alanlarının 3 boyutlu profil, katman vb. analizi için oyun motoru yazılım teknolojisi sisteme eklenebilir.

KAYNAKÇA

- Akkaya, D., & Başaraner, M.** (2012). Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS). Akademik Bilişim, 12, 477-483.
- Alshaer, B. J., Darabseh, T. T., & Alhanouti, M. A.** (2013). Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle. Applied Mathematical Modelling, 37(7), 5315-5325.
- Anysz, H., & Zawistowski, J.** (2018). Cost minimization of locating construction machinery park with the use of simulation and optimization algorithms. In MATEC Web of Conferences (Vol. 196, p. 04088). EDP Sciences.
- Azar, E. R., & Kamat, V. R.** (2017). Earthmoving equipment automation: A review of technical advances and future outlook. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 22(13), 247-265.
- Baertlein, H., Carlson, B., Eckels, R., Lyle, S., & Wilson, S.** (2000). A High-Performance, High-Accuracy RTK GPS Machine Guidance System. GPS Solutions, 3(3), 4-11.
- Balaraaman, P., & Chandrasekaran, P.** (2021, October). Influence of loading cycle time on the performance of hydraulic excavator in a construction site. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2054, No. 1, p. 012086). IOP Publishing.
- Bayram, S.** Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) Kapsamında Geleneksel Metraj ile Yazılımın Karşılaştırılması. Yapı Bilgi Modelleme, 2(2), 58-65.
- Bazjanac, V.** (2006). Virtual building environments (VBE)-applying information modeling to buildings. August, 29, 2009.
- Bettemir, Ö. H.** (2020). Computation of Critical Path Probabilities by Modified PERT. Gazi University Journal of Science, 33(3), 673 – 694, 10.35378/gujs. 611579.
- Bettemir, Ö. H.** (2011). Prediction of georeferencing precision of pushbroom scanner images. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 50(3), 831-838.
- Bettemir, Ö. H.** (2009). Kazı ve hafriyat sürelerindeki belirsizliğin Monte Carlo Analizi ile tahmini. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(2), 165-173.
- Bettemir, Ö. H., Gündüz, E., Akkurt, O., Efe, H., & Arslan, M. A.** (2019). İnşaat işlerinin iş programına bağlı nakit akışı değişkenliğinin saptanması ve düzenlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(1), 211-223.

- Bettemir, Ö. H. (2018).** Development of spreadsheet based quantity take-off and cost estimation application. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 1(3), 108-117.
- Bettemir, Ö. H. (2018).** Development of spreadsheet based quantity take-off and cost estimation application. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 1(3), 108-117.
- Bettemir, Ö. H., & Zafer, E. H. (2022).** Yer Kaplaması ve Betonarme Kalıbı İmalatlarının Atık Değerlemesi ve İnşaatının Yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(4), 2276-2289.
- Bettemir, Ö. H., & Bulak, Ö. F. (2022).** Scheduling, Management and Optimization of Construction Process. *Teknik Dergi*, 33(6), 12945-12986.
- Bettemir, Ö. H., & Yücel, T. (2023).** Simplified Solution of Time-Cost Trade-off Problem for Building Constructions by Linear Scheduling. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(2).
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013).** The project benefits of building information modelling (YBM). *International journal of project management*, 31(7), 971-980.
- Caterpillar, 1979.** Fundamentals of Earthmoving. Caterpillar Tractor CO.
- CMR, C., & FC, H. (1989).** A database/spreadsheet application for equipment selection. *Construction Management and Economics*, 7(3), 235-247.
- Çetiner, O. (2010).** Mimarlıkta Yapı Bilgi Modelleme ve Örnekler. *Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Muğla Üniversitesi*, 10-12.
- Drygin, M., Kurychkin, N., & Bakanov, A. (2017).** Ways of increasing excavator fleet productivity in Russian coal open pits (Kuzbass case study). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 15, p. 03010). EDP Sciences.
- Edwards, D. J., & Griffiths, I. J. (2000).** Artificial intelligence approach to calculation of hydraulic excavator cycle time and output. *Mining Technology*, 109(1), 23-29.
- Edwards, D. J., & Holt, G. D. (2000).** ESTIVATE: a model for calculating excavator productivity and output costs. *Engineering, Construction and Architectural Management*
- Edwards, D. J., Malekzadeh, H., & Yisa, S. B. (2001).** A linear programming decision tool for selecting the optimum excavator. *Structural Survey*.
- Ergen, F., & Bettemir, Ö. H. (2022).** Development of BIM software with quantity take-off and visualization capabilities. *Journal of Construction Engineering Management & Innovation*, 5(1), 01-14.

- Ergen, F., & Bettemir, Ö. H. (2023).** Yüksek doğrulukta kaba inşaat kalemlerinin metrajını hesaplayan YBM tabanlı prototip yazılımın geliştirilmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(1), 86 - 105, 10.17714/gumusfenbil.1117848.
- Enegbuma, W. I., & Ali, K. N. (2013, May).** Hypothesis analysis of building information modelling penetration in Malaysian construction industry. In Proceedings of CIB World Building Congress (pp. 5-9).
- Farnsworth, C. B., Beveridge, S., Miller, K. R., & Christofferson, J. P. (2015).** Application, advantages, and methods associated with using YBM in commercial construction. International Journal of Construction Education and Research, 11(3), 218-236.
- Hamdan, O., Shanableh, H., Zaki, I., Al-Ali, A. R., & Shanableh, T. (2019, January).** IoT-based interactive dual mode smart home automation. In 2019 IEEE international conference on consumer electronics (ICCE) (pp. 1-2). IEEE.
- Han, S. W., Lee, S. Y., & Halpin, D. W. (2005).** Productivity evaluation of the conventional and GPS-based earthmoving systems using construction simulation. In Construction Research Congress 2005: Broadening Perspectives (pp. 1-9).
- Holt, G. D., & Edwards, D. (2015).** Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors. International Journal of Productivity and Performance Management.
- Jonasson, S., Dunston, P. S., Ahmed, K., & Hamilton, J. (2002).** Factors in productivity and unit cost for advanced machine guidance. Journal of construction engineering and management, 128(5), 367-374.
- Kalfa, S. M. (2018).** Building information modeling (YBM) systems and their applications in Turkey. Journal of Construction Engineering Management & Innovation, 1(1), 55-66.
- Karshenas, S. (1989).** Truck capacity selection for earthmoving. Journal of construction engineering and management, 115(2), 212-227.
- Khataei, S., Akcamete, A., & Sonmez, R. 4D BIM Integrated Productivity Estimation of Construction Projects.**
- Kim, H., Ahn, C. R., Engelhaupt, D., & Lee, S. (2018).** Application of dynamic time warping to the recognition of mixed equipment activities in cycle time measurement. Automation in Construction, 87, 225-234.
- Kumar, P., & Pati, U. C. (2016, May).** IoT based monitoring and control of appliances for smart home. In 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT) (pp. 1145-1150). IEEE.

- Lakshmi, R., Karthika, P., Rajalakshmi, A., & Sathya, M.** (2019). Smart-Home Automation Using IoT-Based Sensing and Monitoring Platform. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 5(1).
- Lee, S. Y., & Han, S. W.** (2003). Geospatial construction data collection using GPS. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(4), 363-370.
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S.** (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in construction*, 20(5), 601-609.
- Lim, H. C., Lee, H. C., & Lee, D. E.** (2018, January). Economic Excavator Configuration for Earthwork Scheduling. In *International Conference on Architecture and Civil Engineering*.
- Liu, C., Ji, W., AbouRizk, S. M., & Siu, M. F. F.** (2019). Equipment logistics performance measurement using data-driven social network analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(5), 04019033.
- Love, P. E., Matthews, J., Simpson, I., Hill, A., & Olatunji, O. A.** (2014). A benefits realization management building information modeling framework for asset owners. *Automation in construction*, 37, 1-10.
- Macit, S., & GÜNAYDIN, H. M.** (2015). Yapı Yönetmeliklerinin Sayısal Temsili: Yeni Bir Model. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 83-102.
- Manyele, S. V.** (2017). Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time. *Engineering*, 9(7), 599-624.
- Mathur, N., Aria, S. S., Adams, T., Ahn, C. R., & Lee, S.** (2015). Automated cycle time measurement and analysis of excavator's loading operation using smart phone-embedded IMU sensors. In *Computing in Civil Engineering 2015* (pp. 215-222).
- Moradi, S., Kähkönen, K., Klakegg, O. J., & Aaltonen, K.** Profile of Project Managers' competencies for Collaborative Construction Projects.
- Nunnally S. W.**, 2001. *Construction Methods and Management* 5th Edition. Prentice Hall Ohio.
- Pavithra, D., & Balakrishnan, R.** (2015, April). IoT based monitoring and control system for home automation. In *2015 global conference on communication technologies (GCCT)* (pp. 169-173). IEEE.
- Peurifoy, R.L. and Schexnayder, C.J.** (2002). *Construction Planning, Equipment and Method*, 6th edition, McGraw-Hill, USA.

- Pradhananga, N., & Teizer, J.** (2013). Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction*, 29, 107-122.
- Rausch, P.** (2010). Intelligent Performance and Cost Analysis of Construction Machines' Data. *Journal of Intelligent Computing Volume*, 1(1), 13.
- Reddy, P. S. N., Reddy, K. T. K., Reddy, P. A. K., Ramaiah, G. K., & Kishor, S. N.** (2016, October). An IoT based home automation using android application. In 2016 International conference on signal processing, communication, power and embedded system (SCOPEs) (pp. 285-290). IEEE.
- Rifai, A. I., Latief, Y., & Rianti, L. S.** (2018). Data mining applied for earthworks optimisation of a toll road construction project. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 195, p. 04019). EDP Sciences.
- Sağlam, B., & Bettemir, Ö. H.** (2018). Estimation of duration of earthwork with backhoe excavator by Monte Carlo Simulation. *Journal of Construction Engineering*, 1(2), 85-94.
- Shengxiang, H., Jingnan, L., & Huai'en, Z.** (2005). GPS real-time supervisory system and application in the construction of face rockfill dam. *Geo-spatial Information Science*, 8(4), 240-246.
- Succar, B.** (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in construction*, 18(3), 357-375.
- Tam, C. M., Tong, T. K., & Tse, S. L.** (2002). Artificial neural networks model for predicting excavator productivity. *Engineering, construction and architectural management*.
- Teizer, J., Golovina, O., Wang, D., & Pradhanang, N.** (2015). Automated collection, identification, localization, and analysis of worker-related proximity hazard events in heavy construction equipment operation. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 32, p. 1). IAARC Publications.
- Vahdatikhaki, F., & Hammad, A.** (2014). Framework for near real-time simulation of earthmoving projects using location tracking technologies. *Automation in Construction*, 42, 50-67.
- Wong Chong, O., & Zhang, J.** (2019). Game Simulation to Support Construction Automation in Modular Construction Using YBM and Robotics Technology—Stage I. In

Computing in Civil Engineering 2019: Data, Sensing, and Analytics (pp. 376-383). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Yang, J., Edwards, D. J., & Love, P. E. (2003). A computational intelligent fuzzy model approach for excavator cycle time simulation. *Automation in construction*, 12(6), 725-735.

Yang, X., Luo, X., Li, H., Luo, X., & Guo, H. (2017). Location-based measurement and visualization for interdependence network on construction sites. *Advanced Engineering Informatics*, 34, 36-45.

Yoon, J., Kim, J., Seo, J., & Suh, S. (2014). Spatial factors affecting the loading efficiency of excavators. *Automation in construction*, 48, 97-

Yu, Y., Zhang, J., & Guo, H. (2017). Investigation of the Relationship between Construction Workers' Psychological States and Their Unsafe Behaviors Using Virtual Environment-Based Testing. In *Computing in Civil Engineering 2017* (pp. 417-424).

Zhang, J., Chen, Y., Liu, R., & Debs, L. (2019, May). Cartesian Points Visualization in Game Simulation for Analyzing Geometric Representations of AEC Objects in IFC. In *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*.

Zhang, S., Teizer, J., & Pradhanang, N. (2015). Global positioning system data to model and visualize workspace density in construction safety planning. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 32, p. 1)*. IAARC Publications.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Alper Çırak

Öğrenim Durumu:

- **Lisans:** İnönü Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği (2019)

Mesleki Deneyimler:

- Malatya 1.Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü/ Stajyer Mühendis (2017)
- Torunlar İnşaat/ Stajyer Mühendis (2018)

Yayınlar

Bettemir Ö. H., Çırak A. (2022) Measurement and Analysis of Haul Routes, 7th International Project And Construction Management Conference, Istanbul, Türkiye, 20-22 October, pp. 966 - 975