

İnşaat Sürecinin İş Çizelgelemesi, Yönetimi ve Optimizasyonu

Önder Halis BETTEMİR¹
Ömer Faruk BULAK²

ÖZ

Bu çalışmada bina inşaatı ile ilgili iş paketlerinin metrajı, adam.saat ve malzeme gereksinimi hesaplamaları, aktivite süresi ve ekip sayılarının belirlenmesi ile iş çizelgelemesinin oluşturulması işlem adımları yapının geometrisi, imalatlar ve temin edilebilen kaynaklar ile ilişkilendirilip formülleştirilmiştir. Hesaplanan metraj değerleri Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın hazırladığı birim fiyat analizlerinde kullanılan poz listelerindeki malzeme, işçilik ve makine kullanımları ile ilişkilendirilerek tüm iş kalemleri için gereken malzeme, işçilik ve iş makinesi miktarları belirlenmiştir. Ayrıca iş kalemleri arasındaki fiziksel ve mantıksal ilişkiler göz önüne alınarak doğrusal iş programı ile inşaatın tamamlanma süresi tahmin edilmiştir. İnşaatta çalışan taşeronların farklı çalışma takvimi olabileceği göz önüne alınarak farklı günlerde tatil yaparak çalışılması durumunda işin kaç takvim günü süreceği hesaplanmıştır. Buna ek olarak hava koşulları ve Ramazan ayı gibi etkenlerin de iş verimine etkisi dikkate alınmıştır. Şantiyede aynı anda çalışabilecek işçi sayısı, taahhüt edilen proje teslim süresi ve gecikme cezasına göre en uygun iş programının hazırlanması Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma (TBGA) ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kaynak kısıtlı iş programı ve zaman maliyet ödünleşim problemleri oluşturulurken proje paydaşlarının farklı çalışma günlerinin olabileceği ve iş verimlerinin mevsim koşullarına göre değişebileceği dikkate alındığı için inşaat projelerinin iş programlarının, daha fazla etkeni içerir biçimde oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım etkin yapım yönetimi tekniklerinin hızlı biçimde uygulanmasını sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İş programı, optimizasyon, proje yönetimi, yapı bilgi modellemesi, tavlama benzetimli genetik algoritma.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11 Ağustos 2021 günü ulaşmıştır. 29 Ağustos 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.981601>

1 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya
onder.bettemir@inonu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5692-7708>

2 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya
bulakomerfaruk@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-0915-2708>

ABSTRACT

Scheduling, Management and Optimization of Construction Process

In this study, computation of quantity take-off, man.hour and material requirements; determination of activity durations and crew sizes; and preparation of construction schedule related with the construction of a building are formulated by associating them with the geometry of the building, the construction items, and the available resources. Obtained quantity take-off values is joined with the item codes of the unit price analysis of Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of Republic of Türkiye and after this operation quantities of material, workmanship, and machinery requirements are computed by the corresponding unit price analysis data. Line-of-Balance schedule is prepared by considering the physical and logical constraints between the activities and construction duration is estimated. Construction project can be executed by different subcontractors which may have diverse workdays and the developed application computes the project duration in terms of calendar days by considering the different work calendars of the construction crews. Moreover work efficiency is estimated by considering the effects of seasonal conditions, and month Ramadan. Optimization of construction schedule is executed by Genetic Algorithm with Simulated Annealing (GASA) according to the restrictions on the construction duration and the maximum available labor as well as the delay penalty. In this study resource constrained project scheduling and time cost trade-off problems are formulated by taking the possibilities of the project stakeholders may have different workdays and the job efficiencies may deviate according to the seasonal conditions into account which makes preparation of construction schedules considering more factors possible. This approach provides fast implementation of efficient construction management techniques.

Keywords: construction schedule, optimization, project management, building information model, genetic algorithm with simulated annealing.

1. GİRİŞ

Kısa sürede ve düşük maliyetli biçimde teklif hazırlamak için uygulanan inşaat maliyetini ve süresini tahmin eden pratik yöntemler %25'e varan hatalı sonuçlar sunabilmektedir [1]. Buna ek olarak aynı tesisin uygun zemin sınıfı ile uygun olmayan zemin sınıfı üzerine inşa edilmesi durumlarının inşaat maliyetleri arasında iki kat fark olabilmektedir [2]. Yaklaşık yöntemlerin içerdiği hata payı ve inşaat işlerinin belirsizliğinin oluşturduğu değişkenlik inşaat sektörünün rekabet ortamı sonucu oluşan kâr oranının çok üzerinde olduğu için yaklaşık yöntemlerle ihaleye girilmesi çok düşük teklifle işin alınıp zarar edilmesine neden olabilmektedir. Aşırı düşük teklif sunulması müşavir ve işveren tarafından en riskli durum olarak tanımlanmaktadır [3]. Sözleşme türü inşaat sürecinde oluşabilecek beklenmeyen durumlardan kaynaklanan maliyet artışlarının taraflara hangi oranda sorumluluk yükleneyeceğini belirlemektedir [4]. Bu nedenle taraflardan bağımsız gelişen olayların yükleniciye getireceği sorumlulukların sözleşme maddelerinde net biçimde ifade edilmesi gerekmektedir. Fakat sözleşmelerin çok uzun olması, kapsam karmaşıklığı ve tartışmalı ifadeler içermesi, gramer ve yazım hataları bulundurması sözleşmelerin doğru yorumlanabilmesini güçleştirmektedir [5]. Sözleşme ve eklerine uygunluk inşaat projelerinin kalite performansını etkileyen beş faktörün arasında yer almaktadır [6]. Anlaşmazlıkların

nedenleri ele alınarak ve potansiyel çözümlerin erken uyarılarına erişildiğinde uygun bir anlaşmazlık çözüm yöntemi uygulanabilmektedir [7].

Gelişen teknolojiyle birlikte endüstriyel inşaat yöntemlerinin geliştirilmesi ve inşaat malzemesi üreticilerinin yenilikçi malzemeler üretip sektörün kullanımına sunmaları farklı inşaat yöntemlerinin uygulanmasına yol açmıştır [8]. Artan çevre duyarlılığı sonucunda çevreye daha az zarar veren inşaat malzemeleri ve tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır [9]. Belirtilen etkiler neticesinde inşaat sektörünün uyguladığı yöntemlerde önemli değişiklikler olmuştur.

Belirtilen rekabet koşulları, zemin ile ilgili belirsizlikler, net olmayan sözleşmelerin getirdiği riskler ve uygulanan yeni inşaat yöntemleri ile yeni yapı malzemeleri üzerinde yeterli deneyimin olmaması yüklenicilerin risklerini arttırmaktadır. Bu nedenle ihale öncesi maliyet ve süre tahminini yüksek doğrulukta yapabilmek için tüm inşaat kalemlerinin metrajının yüksek doğrulukta hesaplanması, iş kalemleri için gereken malzeme, işçilik ve iş makinesi ihtiyaçları ile birim maliyetlerinin belirlenmesi ve birim sürede gerçekleştirilecek işin yüksek doğrulukta tahmin edilmesi gereklidir. Tahsis edilebilen kaynaklar göz önüne alınarak iş kalemlerinin kaç iş günü içerisinde tamamlanabileceği veya iş kaleminin süresi önemli ise istenilen sürede tamamlanması için ne kadar kaynak tahsis edilmesi gerektiği hesaplanır. İş programı oluşturularak inşaatın kaç iş gününde tamamlanacağı belirlenir. Yapım sürecine taşeronlar da dâhil olacağı için iş kalemlerinin icra edilmesinde farklı çalışma günleri uygulanabilir. Taşeron seçiminde taşeronların performanslarının proje başarısına etkisi önemlidir [10]. Bu çalışmada uygulanan takvimli iş programı yöntemi ile taşeronların proje süresine etkisi ölçülebilir. Bayram tatilleri ve resmi tatiller göz önüne alınarak inşaatın kaç takvim gününde tamamlanacağı ayrıca hesaplanır. Günlük personel ve iş makinesi ihtiyacı belirlenerek temin zorluğu yaşanması durumunda daha az kaynak tahsisine ihtiyaç duyulacak şekilde iş programı revize edilir. İnşaat süresince ortaya çıkacak malzeme ve işçilik kullanımları, elde edilecek hak ediş miktarları ve dolaylı giderler dikkate alınarak nakit akışı oluşturulup teklif dosyasında sunulacak bedel ve süre belirlenir.

Teklif hazırlama sürecindeki emek yoğunluğunu azaltmak için gerçek veya gerçeğe yakın metraj hesaplayan ve iş programı hazırlayan birçok yazılım geliştirilmiştir. Fakat iş programı oluşturulurken inşaat veriminin tüm dönemlerde sabit kaldığı, mevsimsel koşullardan etkilenmediği varsayılır. Bu durum iş programının önemli ölçüde sapmasına neden olur. Ayrıca mevcut ticari yazılımlar güçlü optimizasyon algoritmalarına sahip olmadıkları için kaynak tahsisini ve iş kalemlerinin sürelerini belirlemeyi en uygun biçimde gerçekleştirememektedir. İnşaat sektöründe bilgi teknolojileri kullanımının oldukça ilerlediği bir ortamda teknolojik ilerlemelerden planlama sürecinde tam anlamı ile yararlanılmaması önemli bir eksikliklerdir. Bu durum en az insan emeği ile metraj hesaplayan, aktivite süresi veya kaynak talebi miktarlarını belirleyen, mevsimsel etkileri dikkate alarak takvimli iş programını kaynak kısıtlı zaman-maliyet ödünleşim problemini çözerek oluşturan bir sistemin gerçekleştirilmesi için önemli bir motivasyon oluşturmıştır.

Bu çalışmada proje yönetimi sürecinde yer alan metraj hazırlama, aktivite süreleri ile kaynak gereksinimlerini belirleme, iş programını oluşturma, birim fiyatlara göre inşaatın maliyetini ve süresini belirlemeyi birçok etkeni göz önüne alarak gerçekleştiren entegre bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. İş programının oluşturulması temin edilebilen kaynak miktarları ve inşa edilen yapının işletmeye alınması ile elde edilecek gelir, şantiyenin genel giderleri, mevsimsel koşullar ve inşaatın yer seviyesinden yüksekliği dikkate alınarak kaynak kısıtlı iş

programı problemi ile zaman maliyet ödünleşim problemlerinin çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki çalışmalar ve uygulamaya yönelik geliştirilen ticari yazılımlar belirtilen bütünlükten uzak kalmakta ve genellikle proje yönetim sürecinin bir aşamasına ağırlık vermektedir. Bu çalışmada bütünsel bir yaklaşımla iş programı oluşturan bir süreç önerilmektedir. Önerilerin sistem teknoloji yatırımı yapabilme konusunda oldukça zayıf durumda olan küçük ve orta ölçekli yükleniciler için önemli fayda sağlama potansiyeline sahiptir, çünkü küçük ve orta ölçekli inşaat firmaları üzerinde gerçekleştirilen araştırmada dört önemli anahtar performans göstergesi arasında yöneticilerin yetkinliği de yer almaktadır [11]. Bu durumun nedenleri arasında yapım yönetimi sürecinin manuel yürütülmesinde etkisi bulunmaktadır.

Makalenin ikinci bölümünde bu çalışmanın motivasyonunu oluşturan otomatik metraj hesaplama, hava ve çevre koşullarının iş verimine etkisini araştırma, zaman-maliyet ödünleşimi ve kaynak kısıtlı iş programı problemi üzerine literatür taraması sunulmuştur. Üçüncü bölümde metraj, kaynak gereksinimlerinin belirlenmesi aktivite sürelerinin ve ekip sayılarının belirlenmesi, iş günü ve takvim gününe göre iş programının oluşturulması, günlük malzeme kullanımı ve personel ihtiyacı hesaplamaları ile iş programını optimize eden TBGA'nın açıklandığı kuramsal yöntem bölümü yer almaktadır. Bu bölümün ardından geliştirilen yöntemin uygulaması yapılmış ve sunduğu faydaları ve geliştirilmesi gereken kısımlarının açıklandığı tartışma ve sonuç kısmı ile makale sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Metraj Hesaplamasının Otomasyonu

Bilgi teknolojisi uygulamalarının niteliklerinin artması ile inşaat sektörü teknik çizim amaçlı kullanılan Bilgisayar Destekli Çizim (BDC) yazılımlarından malzeme ve imalatlar ile ilgili öznelik bilgilerinin kaydedilip işlenebildiği Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) yazılımlarına geçiş yapmaktadır. YBM binanın inşa ve kullanım süreçlerini de içeren bir otomasyon uygulamasıdır. Metraj hesaplamasının otomasyonu ihmalleri ve yuvarlama hatalarını en aza indirdiği için doğruluğunu da arttırmaktadır [12]. Metraj otomasyonundaki faydalarına rağmen YBM yaygın olarak görsellik, mimari tasarım ve modelleme ile mekânsal çakışma analizlerinde kullanılmaktadır. Metraj otomasyonunda metraj kalemlerinin standartlaşmaması ve farklı kurumların aynı metraj kalemini değişik yöntemlerle hesaplamaları otomasyonun önünde önemli bir engeldir [13]. Otomasyon çalışmalarına insan müdahalesi olmadan yer karosu metrajını gerçekleştiren sistem [14], prefabrik beton kesitlerin metrajını ve maliyet analizini gerçekleştiren yöntem [15], açık kaynak kodlu YBM tabanlı modelle sisteme gömülü veritabanı yardımı ile metraj hesaplayıp gerekli adam.saat ve makine.saat değerlerini hesaplayan yaklaşım [16], kazı, beton ve kalıp metrajlarının otomatik hesaplanmasını sağlayan yaklaşım [17] örnek gösterilebilir. Buna ek olarak Khosakitchalert vd. duvar, döşeme ve diğer yapısal ve mimari elemanların birleşim yerlerinin minhalarını dikkate alarak metraj hesaplayan YBM tabanlı bir yöntem geliştirmiştir [18]. Teknik çizimlerden metraj hazırlayan yazılımların güncel durumları mimari ve yapısal elemanların birbirlerine temas ettikleri kesim bölgelerindeki kesişim miktarlarını tam olarak belirleyemedikleri için hazırladıkları metraj değeri $\pm\%5$ mertebesinde gerçek değerden sapabilmektedir [19]. Bu nedenle mevcut yazılımların ve hesaplama yöntemlerinin

iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerçekleştiğinde teknik çizimlerden iş programının hazırlanmasına kadar olan süreç tamamen otomasyonla yürütülebilecektir.

2.2. Hava Koşullarının İş Verimine Etkisi

İnşaat işleri ağırlıklı olarak açık alanda yapıldığı için işin süresi ve maliyeti hava şartlarından etkilenmektedir. Özellikle inşaat süresinin uzaması nedeniyle oluşabilecek gecikme cezaları yükleniciler için önemli bir risk oluşturmaktadır. Sepasgozar vd. inceledikleri inşaatların gecikme nedenlerini araştıran 94 makalenin 10'unda gecikmenin hava durumu kaynaklı olduğunu belirtmiştir [20]. Larsson ve Rudberg sahada imal edilen beton duvar inşaatının hava koşullarından etkilenmesini benzetim tabanlı inceleyerek rüzgârın iş verimine etkisini tahmin etmiştir [21]. Maqsoom vd. küçük firmaların gecikme nedenleri arasında hava koşullarının etkili olduğunu belirtmiştir [22]. Hurlimann vd. sektör paydaşları ile gerçekleştirdikleri anket çalışması sonucunda Avusturalya inşaat sektörünü en çok etkileyecek etkenlerin başında inşaat sırasında görülebilecek sıra dışı hava olaylarının geldiğini belirlemiştir [23]. Russo inşaat işlerinde hava durumundan kritik ölçüde etkilenen işleri kazı, fore kazık, kalıp, betonarme çeliğinin yerleştirilmesi, beton dökümü, betonun kürü, su yalıtımı, geri dolgu, dış duvar örümü, dış cephe doğramaları, çatı işleri ve dış cephe boyası olarak özetlemiştir [24]. Smith ve Hancher yağmurun inşaat süresinin uzamasında mücbir sebep olup olamayacağına bulanık mantık ile karar veren bir model oluşturmuştur [25]. Markov süreci ile geçmiş yılların yağış verilerini kullanarak hava durumu modeli oluşturmuş ve inşaat süresine etkisini benzetimle tahmin etmiştir. Kazı, boya, beton dökümü, çevre düzenlemesi ve yapısal çelik montajını yağmurdan etkilenen işler olarak sınıflandırmış ve modellemiştir.

Li mevsimsel şartlara göre bir ay içerisinde kaç gün iş kaybı olacağını kurduğu matematiksel model ile belirlemiş ve buna göre takvimli iş programı oluşturmuştur [26]. Apipattanavis vd. yol inşaatlarında görülen olumsuz hava koşullarından kaynaklanan gecikmelerin tahminini ve niceliğini belirleyen bir çerçeve sistem geliştirmiştir [27]. Shan ve Goodrum çelik yapı inşaatlarında inşaat süresine sıcaklık ve nem oranının etkisini YBM ile modelleyerek tespit etmişlerdir [28]. ABD'nin çeşitli eyaletlerinde inşa edilen ve edilecek olan tip mağaza inşaatları sıcaklık ve nem oranlarına göre Koehn ve Brown [29] tarafından sunulan iş verimi tablosundan yararlanılarak modellenmiştir. Jung vd. inşaat işinin gerçekleştirildiği konumun yer seviyesinden yüksekliğinin artmasının inşaat süresini hava koşullarından daha fazla etkilenir hale getirdiğini belirtmiştir [30]. Literatür taraması yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak mevsimsel ve çevre koşullarının iş verimine etkisini inceleyip gecikme cezası ödenmesine veya sözleşme maddelerinde mücbir sebep sayılabileme durumunun oluşma koşulunu incelemeye yönelik olduğunu göstermektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar sıcaklık, nem, rüzgâr, yağış durumu, inşaatın yer seviyesinden yüksekliği etkenlerinden sadece birini ele alıp belirtilen etkenlerin birlikte etki etmesinin sonuçlarını incelememişlerdir. Bu çalışmada hava ve çevre koşullarının etkisinin beraber değerlendirildiği bir yaklaşım önerilmektedir. Olumsuz hava koşulları tüm iş kalemlerini eşit oranda etkilemediği için yavaşlama tüm iş kalemleri için aynı olmamaktadır. Özellikle dış cephe panelleri gibi yüzey alanı büyük yüklerin kule vinç ile taşınması sırasında rüzgârın şiddetli olduğu durumlarda işin durdurulmasına sık rastlanmaktadır. Hava tahminlerinin en büyük hata kaynağı geçmiş yılların iklim verilerine dayalı tahmin yapılmasıdır. Küresel iklim değişimiyle mevcut hava

koşulları geçmiş yıllardaki hava olaylarından ayrılmaktadır. Fakat geçmiş verilere dayalı tahmin modelinden daha yüksek doğrulukta tahmin sunan başka bir model bulunmamaktadır.

2.3. İş Programının Optimizasyonu

Ön analizlerle oluşturulan iş programı her zaman inşaat koşullarına en uygun iş programı olmayabilir. İnşaa edilecek yapıdan elde edilecek gelirler, sözleşmede taahhüt edilen bitirme süresi, gecikme cezası ile şantiyenin genel giderleri dikkate alınarak iş programı optimize edilmelidir. İş kalemlerinin süresi ile inşasının doğrudan maliyetleri arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır [31, 32]. Doğrudan maliyet ile genel giderler toplamının en düşük değerinin bulunması gereklidir. Belirtilen problem zaman-maliyet ödünleşim problemi (ZMÖP) olarak tanımlanır ve bu problemin çözümü ile inşaat süresi ekonomik koşullar göz önüne alınarak en uygun duruma getirilir. Wang vd. ZMÖP'ü baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma ile inşaat kalitesini de göz önüne alarak çözmüştür [33]. Liu vd. kesikli simbiyotik organizma aramasını uygulamıştır [34]. ZMÖP'e kaliteye ek olarak çevre duyarlılığını Banhashemi ve Khalilzadeh ekleyerek veri zarflama analizi ile çözmüştür [35]. Abdel-Basset vd. belirsiz inşaat sürecini nütrosifik sayılarla modelleyerek stokastik ZMÖP'ü çözmüştür [36]. Toğan ve Eirgash ZMÖP'ü probleme özel popülasyon üreten bir algoritma ile çözmüştür [37]. Eirgash vd. öğretim ve öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması ile ZMÖP'ü çözmüştür [38]. ZMÖP şebeke analizi yöntemi ile de çözülmüştür [39].

İnşaat sürecinde teknik ve ekonomik etkenlerden dolayı kaynaklar üzerinde kısıtlamalar bulunmaktadır. İnşaat boyunca bazı aktivitelerin beraber yürütülmesi durumunda ihtiyaç duyulan kaynak miktarı temin edilebilen miktarın üzerine çıkmakta ve gerekli kaynaklar temin edilemediği için kaynak çakışması yaşayan bazı aktivitelerin geciktirilmesi zorunlu hale gelmektedir. Temin edilebilen kaynak miktarı göz önüne alınarak en kısa sürede inşaatın tamamlanmasına olanak sağlayan Kaynak Kısıtlı İş Programı Problemi (KKİPP)'nin optimum çözümü inşaat süresi ve maliyetlerinin düşürülebilmesi için oldukça önemlidir. Zhu vd. ayrık zıt çoklu versiyon optimizasyon algoritması ile çok kaynaklı KKİPP'yi çözmüştür [40]. Lin vd. genetik programlamalı hiper sezgisel yöntemle çok kaynaklı KKİPP'yi çözmüştür [41]. Pellerin vd. KKİPP çözümü için uygulanan hibrit üst sezgisel yöntemlerle, Birjandi ve Mousavi stokastik KKİPP'yi sezgisel yöntemle, çok kaynaklı KKİPP'yi Laszczyk ve Myszkowski çok amaç fonksiyonlu evrimsel gelişim algoritması ile çözmüştür [42-44]. Chakraborty vd. çok modlu KKİPP'yi modifiye edilmiş değişken komşulu arama sezgisel yöntemi ile Tirkolae vd. çok amaç fonksiyonlu çok modlu KKİPP'yi Pareto tabanlı algoritmalarla, Creemers stokastik KKİPP'yi aktiviteleri istenildiği zaman yarıda kesip bir süre geçtikten sonra devam ettirecek şekilde çözmüştür [45-47]. Arab vd. KKİPP'yi çok amaçlı evrimsel algoritma ile çözmüştür [48]. Erzurum ve Bettemir inşaat işlerinin kaynak dengeleme problemini paralel hesaplama ile çözmüştür [49].

Literatürde ZMÖP ile KKİPP'nin birlikte çözüldüğü çalışmalar da bulunmaktadır. Lotfi vd. zaman-maliyet ödünleşimine kalite, enerji ve çevre etkilerini de dahil ederek modellemiştir. Ayrıca temin edilebilen kaynak miktarları üzerindeki kısıtları da dikkate alarak doğrusal olmayan programlama ile bir altgeçit inşaatının iş programını optimize etmiştir [50]. Sharma ve Triverdi zaman-maliyet ödünleşimine kalite ve iş güvenliğini ekleyerek modellemiştir. Temin edilebilen kaynak miktarları üzerindeki kısıtları da dikkate alarak baskın olmayan

sıralama genetik algoritma ile iş programını optimize etmiştir [51]. Amiri vd. baskın olmayan sıralama genetik algoritma ile [52], Albayrak parçacık sürü optimizasyonu ile genetik algoritmayı birleştirerek hibrit bir algoritma ile [53] Banihashemi ve Khalilzadeh veri zarflama analizi ile ZMÖP ile KKİPP'yi birlikte çözmüştür [54]. Kannimuthu vd. ikili tamsayı programlama algoritması ile ZMÖP ile KKİPP'yi birlikte çözmüştür [55]. Heravi ve Moridi tekrarlayan işlerden oluşan inşaat işleri için ZMÖP ile KKİPP'yi parçacık sürü optimizasyonu ile birlikte çözmüştür [56].

Literatürde yer alan çalışmalarda ZMÖP ve çok modlu KKİPP hipotetik problemler üzerinden çözülmüştür. Hem ZMÖP hem de KKİPP için tüm iş kalemlerini kapsayacak şekilde farklı yapım alternatiflerinin oluşturulması önemli miktarda iş yükü gerektirdiği için inşaat sektörü tarafından literatürdeki teorik çalışmalar uygulama alanında fazla karşılık bulamamaktadır. Bu çalışmada hem ZMÖP, hem de KKİPP için tüm aktivitelere insan müdahalesi olmadan farklı yapım alternatifleri oluşturup aktivite sürelerine göre kaynak miktarını hesaplayan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu sayede metraj verileri kullanılarak ZMÖP ve KKİPP için gerekli veriler hesaplanarak temin edilebilen kaynak miktarları dikkate alınarak en uygun iş programı oluşturulabilecektir. Ayrıca, dünyayı etkileyen COVID-19 pandemi sürecinde kalabalık ortamlarda çalışmaktan mümkün olduğunca kaçınılarak inşaat sırasında ekip sayıları düşürülmüş ve inşaatlardaki insan yoğunluğu azaltılmıştır. Bu nedenle birçok şantiye için KKİPP'nin çözülmesi gerekmiştir. Pandemi sürecinin dışında da inşaatlarda iş güvenliğini sağlamak veya genel giderleri düşürmek için inşaatta çalışan işçi sayısına kısıtlamalar getirilebilmektedir. Personel ve iş makinesi sayısını azaltılırken inşaat süresini aşırı arttırmamak önemli bir sorundur. Literatürde zaman-maliyet ödünleşim problemi ile kaynak kısıtlı iş programının çözümü problemin kolay tanımlanabilmesi ve hesap yükünün azaltılması için mevsimsel ve mekânsal etkiler göz ardı edilerek iş veriminin sabit kaldığı kabul edilerek oluşturulmaktadır. Bu çalışmada bütünsel bir yaklaşım geliştirilerek mevsimsel ve mekânsal etkenlerin iş verimi üzerindeki etkileri optimizasyon sürecine dâhil edilerek ZMÖP ve KKİPP gerçek koşullara daha yakın biçimde oluşturulup optimize edilerek literatüre özgün katkı sağlanmıştır.

3. YÖNTEM

İnşaat sürecinin bütünsel biçimde yönetimi ve optimizasyonu; metraj hazırlama, iş kalemlerinin kaynak gereksinimlerinin belirlenmesi, iş programının oluşturulması, iklim ve ortam koşullarına göre günlük iş veriminin hesaplanması, ekiplerin çalışma günlerine göre takvimli iş programının oluşturulması, iş programının kaynak ve süre kısıtlarına göre optimize edilmesi adımlarından oluşmaktadır. Çalışmada uygulanan yöntemlerin detayları bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

3.1. Metraj Hesaplanması

Metraj hesaplama işlemi bina inşaatına ait iş kalemlerinden kazı, iksa sistemi, geri dolgu, su yalıtımı, kalıp, donatı, kalıp iskelesi, beton, dış duvar, iç duvar, iş iskelesi, sıva, boya, fayans, yer döşemesi, kapı ve pencere doğrama işleri için gerçekleştirilmiştir. Yapısal ve mimari elemanlar arasındaki temasın belirlenebilmesi ve dolayısı ile metrajın doğru hesaplanabilmesi için tüm yapısal ve mimari elemanlara tanımlayıcı anahtar öznitelik

atanmıştır. Kolonların köşe koordinatları, kirişlerin hangi kolonlara bağlandığı, saplama kiriş ise kirişin köşe koordinatları, döşemelerin hangi kirişlerle çevrelendiği, duvarların başlangıç ve bitiş koordinatları tanımlanmıştır. Yapısal elemanlara ek olarak tüm mimari elemanların geometrisi de düğüm noktalarıyla tanımlanmıştır. Düğüm noktaları ve düğüm noktalarının koordinatları kullanılarak elemanlar arasında komşuluk ilişkileri kurulabilmektedir. Bu sayede elemanların kesişim noktaları tespit edilip minhalar hesaplanabilmekte ve elemanların boyutu veya konumu değiştiğinde tüm metraj değerleri güncellenebilmektedir. Metraj birimi uzunluk olan süpürgelik gibi iş kalemleri imalatın sınırlarını belirleyen düğüm noktaları arasındaki mesafe hesaplanarak elde edilmektedir. Yer döşemesi, duvar gibi metraj birimi alan olan iş kalemlerinin metrajı düğüm noktaları ile oluşturulan poligonun alanı hesaplanarak belirlenir. Beton, kalıp iskelesi gibi metraj birimi hacim olan iş kalemlerinin metrajı ise dikdörtgen prizmanın taban alanının belirlenip yükseklikle çarpılması ile hesaplanmıştır. Binalarda üst katlara çıkıldıkça taşıyıcı sisteme daha az donatı konulması, taşıyıcı sistemin boyutlarının küçültülmesi, kat alanlarının düşürülmesi ile karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle metraj hesaplaması binanın tüm katları için tekrarlanmıştır.

Yapı elemanlarının metrajı belirli hesaplama kuralları tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Kolonların beton metrajı hesaplanırken kolonun eni, boyu ve kat yüksekliği değerleri çarpılır. Kirişlerin beton metrajı hesaplanırken kirişin yüksekliği ve kalınlığı ile kiriş açıklığı çarpılır. Kiriş açıklığı verisi doğrudan tanımlanmamıştır. Kirişin saplandığı kolonlardan yararlanılarak kirişin ham açıklığı tespit edilir. Kiriş x doğrultusunda uzanmakta ise başlangıç kolonunun x boyutu, aksi durumda ise başlangıç kolonunun y boyutu ham açıklıktan düşülerek net kiriş açıklığı hesaplanır. Kirişin net açıklığı hesaplanırken kirişin başlangıç ve bitişinde yer alan kolonların tespit edilmesi için tüm kolon ve kirişlerin tanımlayıcı anahtar öznitelikleri taranır ve eşleşen anahtar öznitelik verilerinden yola çıkarak kesişen kolon ve kirişler belirlenir. Yapısal ve mimari elemanlar arasında kolon-döşeme, kiriş-döşeme, duvar-kolon, duvar-kapı, duvar-pencere, lento-kapı, lento-pencere eşleşmeleri için anahtar öznitelikleri taranmaktadır. Belirtilen tarama sonucu kesişen elemanlar tespit edilmekte ve elemanın boyutu, konumu ve açıklığı verilerinden kesişim büyüklüğü hesaplanıp minha edilmektedir. Bu şekilde metraj hesaplamaları yüksek doğrulukta gerçekleştirilmekte ve planda olabilecek revizeler sonucunda sadece ilgili elemanın konumu ve boyutunu ifade eden değerler değiştirildiğinde en az insan emeği ile metraj değerleri güncelleştirilebilmektedir.

3.2. İş Kalemlerinin Kaynak Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Metrajı hesaplanan iş kalemlerinin inşa edilebilmesi için gereken işçilik, malzeme, iş makinesi ve ekipman ihtiyaçlarının hesaplanması inşaat firmasının daha önceden gerçekleştirmiş olduğu işlerde ortaya çıkan birim işin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarı kullanılarak hesaplanabilir. Fakat her firma farklı usulde analiz yapabileceği için bu çalışmada tüm inşaat sektörü tarafından kabul görmüş olan Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınladığı birim fiyat analizlerinden yararlanılarak kaynak ihtiyacı hesaplanmıştır. Bir iş kaleminin inşası farklı yöntem veya malzeme ile gerçekleştirilebileceği için aynı iş kalemi için birden fazla iş tanımı oluşturulmuştur. Örneğin kalıp işi plywood veya kereste ile yapılabileceği gibi yer döşemesi; halıflex, marley, granit, laminat parke, karo, seramik, terrazo gibi farklı malzeme ve teknikle inşa edilebilmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan poz tariflerindeki

işçilik ihtiyaçları maliyet analizinde kullanıldığı için işin yürütülmesi sırasında işçilerin boşta kalacağı durumlarda da yevmiye ödeneceğini kabul etmektedir. Gerçek işçilik değerlerini elde etmek için pozlarda yer alan işçilik ihtiyaçları bu durum dikkate alınarak ikiye bölünmüş ve adam.saat hesaplamaları revize edilmiş birim işçilik ihtiyaçları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Fakat iş makinesi operatörleri ve fore-kazık makinesinin delmesi sırasında pasayı uzaklaştırmakla görevli olan işçilerin çalışma süreleri olduğu gibi kullanılmıştır.

İş kaleminin metraj değeri ile birim imalatın gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarları çarpılarak iş kaleminin inşası için gerekli kaynak ihtiyacı tahmin edilmektedir. Tüm iş kalemleri ilgili poz listesi ile eşleştirilerek iş kalemlerinin kaynak ihtiyaçları hesaplanmıştır. Bir iş kalemine atanan iş tarifinin uygulanma değişkeni 1 değerini alırken atanmayan iş tariflerinin uygulanma değişkenlerinin alacağı değerler 0 olur. Katlara göre metraj değerlerinin değişebilecek olması sonucu malzeme ve kaynak ihtiyaçlarının hesaplanması Eşitlik 1’de gösterilen şekilde ilişkilendirilerek gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned}
 AS_{j,b,l} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,l} * \delta_{j,b,x} \\
 MS_{j,b,m} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,m} * \delta_{j,b,x} \\
 M_{j,b,k} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,k} * \delta_{j,b,x}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Eşitlik 1’de $AS_{j,b,l}$ b’ninci kattaki j ’ninci aktivitenin tamamlanması için tayin edilmesi gereken l ’ninci personel sınıfının adam.saat değerini, $MS_{j,b,m}$ j ’ninci aktivitenin tamamlanması için tayin edilmesi gereken m ’ninci makine-ekipman sınıfının makine.saate değerini, $M_{j,b,k}$ j ’ninci aktivitenin tamamlanması için kullanılması gereken k ’ninci malzeme sınıfının miktarını, $Metraj_{j,b}$ j aktivitesinin b ’ninci kattaki toplam metrajını belirtmektedir. POZ_j j ’ninci aktivitenin iş tarifini, $\delta_{j,b,x}$ b ’ninci katta gerçekleştirilecek j iş kalemi için atanabilecek x iş tariflerinin uygulanma değerini ifade etmektedir. $\delta_{j,b,x}$ sadece 0 veya 1 değerini alabilir ve $\sum_{x=1}^{ps} \delta_{j,b,x} = 1$ ’dir. ps sisteme tanımlı poz sayısını ifade etmektedir.

3.3. Aktivite Süreleri ve Ekip Sayıları

İş paketlerinin süreleri ve ekip büyüklüğünün belirlenmesi kaynak ve süre kısıtı olmak üzere 2 farklı biçimde yapılabilmektedir. Birinci durum aktivitenin yürütülmesi sırasında temin edilebilen kaynak miktarının kısıtlı olması durumunda görülür. Genellikle iş makinesi kullanılan iş kalemlerinde kaynak kısıtı oluşur. İşin süresi, seçimi yapılan iş makinesinin sayısı ve kapasitesine göre belirlenir. İkinci durumda ise aktivitenin istenilen tamamlanma süresine göre ekibin büyüklüğü hesaplanır. Buna karşın ekip sayısında sınırlama olduğu için personel kısıtına göre sürenin belirlendiği durumlar olabilmektedir.

3.3.1. Kaynak teminine göre planlama

Aktivite için temin edilebilen kaynak miktarına göre birim zamanda gerçekleştirilebilecek imalat miktarı belirlenir. Toplam imalat miktarının birim zamandaki imalat miktarına bölünmesi ile iş günü birimindeki imalat süresi Eşitlik 2’de belirtildiği şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} \frac{TI_j * BIS_j}{GCS} < 1 \quad \text{ise} \quad \{ \\ \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] * TI_j * BIS_j < 11 \quad \text{ise} \quad \{ IS_j = \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] \} \\ \text{değilse} \quad IS_j = \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] \} \\ \text{değilse} \quad IS_j = \frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \end{aligned} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de IS_j , j aktivitesinin bir günde gerçekleştirilen imalat sayısını, TI_j j aktivitesinin içerdiği bir imalatın tamamlanması için gereken iş miktarını, BIS_j birim işin süresini, GCS günlük çalışma süresini ifade etmektedir. Yürürlükteki İş Kanunu gereği günde 11 saatten fazla çalışmadığı için fazla mesai çalışma süresi en fazla 11 saat olabilecek şekilde Eşitlik 2 düzenlenmiştir. “ \lceil ” matematiksel sembolü yukarı yuvarla, “ \lfloor ” matematiksel sembolü aşağı yuvarla anlamına gelmektedir. İş makinesi sayısı ve modeline göre aktivite süresi belirlenmesine Y.16.060/07 poz numarası ile tarif edilen 80 cm çapında fore kazık imal edilmesi pozu üzerinden örnek verilebilir. Poz tarifinde 1 metre fore kazık imalatı için iş makinesinin 0,31 saat çalışması gerektiği belirtilmiştir. Bir adet fore kazık boyu ile birim imalatın süresi çarpılarak bir fore kazık kuyusunun açılması için makinenin çalışması gereken süre hesaplanır. Eşitlik 2 kullanılarak bir günde kaç fore kazık imalatı yapabileceği hesaplanabilir. Günlük çalışma süresi içinde inşaatı yarım kalan fore kazık işinin bitirilmesi günlük 11 saat çalışma sınırını aşmadan gerçekleştirilebiliyorsa fazla mesai ile fore kazık imalatı tamamlanmakta, o gün içerisinde bitirilemiyorsa yarım kalacak fore kazık işine başlanmamaktadır. Bir aktivitenin inşası başka bir aktivitenin yapılmasını içeriyorsa, alt aktivitenin günlük adam.saat ihtiyacı ve kaynak sayısı sırası ile Eşitlik 3 ve 4’te belirtildiği gibi hesaplanır.

$$G_AS_l = IS_j * Metraj_{j,a} * POZ_{a,l} \quad (3)$$

$$P_{l,j} = \left[\frac{G_AS_l}{GCS} \right] \quad (4)$$

Eşitliklerde G_AS_l , l ’nci personel grubunun a alt aktivitesi için bir günde çalışması gereken adam.saat miktarını, $Metraj_{j,a}$ birim miktardaki j ’nci aktivitenin inşa edilebilmesi için yapılması gereken a alt aktivitesinin miktarını, $POZ_{a,l}$ ise birim a aktivitesinin tamamlanabilmesi için gereken l personel sınıfının çalışma miktarını, $P_{l,j}$ l personel sınıfından j aktivitesi için tayin edilen çalışan sayısını ifade etmektedir. Günlük fore kazık imalat sayısının belirlenmesi ile bir gün içerisinde fore kazıkların her biri için gereken donatı miktarı metraj verilerinden hesaplanmaktadır. Donatı işçiliğinin belirlenmesi Y.23.014 poz numaralı Ø8-Ø12 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine

konulması ve Y.23.014 poz numaralı Ø14- Ø28 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması poz tarifleri ile gerçekleştirilmiştir. Günlük imal edilecek donatı miktarı ile belirtilen poz tariflerindeki işçilik miktarları çarpılarak gereken işçilik miktarı adam.saat biriminde Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır. Bu iş için gereken donatı ekibi günlük çalışma saati göz önüne alınarak Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

3.3.2. Süre kısıtına göre planlama

Aktivitenin istenilen sürede tamamlanabilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak kullanımını sağlayacak personel ve makine miktarları Eşitlik 5'te ifade edilmiştir.

$$P_{l,b,j} = \left[\frac{AS_{j,b,l}}{GCS * Süre_j} \right] \quad IM_{m,b,j} = \left[\frac{MS_{j,b,m}}{GCS * Süre_j} \right] \quad (5)$$

Eşitlik 5'te yer alan $Süre_j$ ifadesi j 'nci aktivitenin çalışma günü birimindeki süresini, $AS_{j,b,l}$ ve $MS_{j,b,m}$ b 'nci kattaki j 'nci aktivitenin l 'nci personel sınıfındaki adam.saat ve m 'nci iş makinesi grubundaki makine.saat birimindeki kaynak ihtiyacını belirtmektedir. Kaynak miktarı tam sayı olacağı için bulunan küsurat yukarı yuvarlanacaktır.

3.4. Takvimli İş Programının Oluşturulması

İş programları genel olarak iş günü dikkate alınarak hazırlandığı için bu kısımda önce iş gününe göre iş programının, ardından takvimli iş programının hazırlanış yöntemi açıklanmıştır. Çok katlı bir bina inşaatı her katta tekrar eden işlerden oluşacağı için doğrusal iş programı ile iş programının hazırlanması tercih edilmiştir. Bu sayede optimizasyon sürecine dâhil olan parametre sayısı kritik yol yöntemi ile kıyaslandığında önemli ölçüde azalacaktır. Tekrarı olmayan kazı, su yalıtımı, temel donatı, temel kalıp, temel betonu ve temel betonu priz alma iş kalemleri başlayınca biter ilişkisi ile doğrusal iş programı dışında çizelgelenmiştir. Bodrum katların kalıp ve donatı iş kalemleri temel betonunun priz alma süresi tamamlanınca başlamaktadır. Bir katın kaba inşaat süresi, kalıp ve donatı inşaat süresinin uzun olanına beton döküm süresi ve beton priz alma süresi eklenerek hesaplanmaktadır. Belirtilen aktiviteler iş grubu olarak gruplanıp doğrusal iş programı ile iş çizelgesi hazırlanmıştır. Bir kat kaba inşaatının ok diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1 - Bir kat kaba inşaatının ok şebeke diyagramının gösterimi

Binanın kaba inşaatının iş günü birimindeki tamamlanma süresi bir kat kaba inşaat süresinin toplam kat sayısı ile çarpılması ile hesaplanır. Kaba inşaat işinden sonra başlayacak

aktivitenin başlangıç zamanı kaba inşaatın başlangıç zamanından daha erken, bitiş zamanı ise kaba inşaat işinin bitiş zamanından daha erken olamaz. Belirtilen kısıtlara ek olarak iş güvenliği ve mekânsal çakışma olmaması için birbirini takip eden aktiviteler arasında en az 1 kat aralık olması gereklidir. Belirtilen koşul Eşitlik 6'da ifade edildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$BZ_j = \text{MAK} \{BZ_{j_ard} + T + \text{Süre}_{j_ard}; TZ_{j_ard} + T - \text{Süre}_j * (KS - 1)\} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da BZ_j j aktivitesinin zemin kattaki başlangıç zamanını, TZ ilgili aktivitenin son kattaki tamamlanma zamanını, T tampon süreyi, j incelenen aktiviteyi, j_ard , j aktivitesinin ardıl aktivitesini tanımlamaktadır. İlk iş kalemi olarak kaba inşaat tanımlanmıştır, bu işin ardından sırası ile duvar, tesisat, sıva, parke fayans, kapı pencere doğramaları ve son olarak boya işleri gelmektedir. İş gününe göre yapılan planlamada iş kalemlerinin başlangıç ve bitiş zamanları doğrusal iş programına göre belirlenerek çalışma günleri, mevsimsel koşullar ve çalışmanın yer seviyesinden yüksekliği dikkate alınmadan iş programı oluşturulur. Eşitlik 6 imalat miktarlarının ve iş verimlerinin tüm katlarda sabit kaldığını varsaydığı için revize edilerek imalat miktarlarının ve iş verimlerinin sabit olma kabulü kaldırılmıştır.

Doğrusal iş programı oluşturulurken aktivitelerin birbirleri ile aynı hızda ilerlemeleri sağlanarak inşaat en uygun sürede tamamlanır. Bu şekilde oluşturulan iş programı ise denge diyagramı olarak adlandırılır. Bu çalışmada her katta yapılan iş miktarının aynı olmaması ve işin yürütülmesi boyunca iş veriminin sabit kalmaması nedeniyle denge diyagramı oluşturulamamaktadır. Aktivitelerin ilerleme hızları her katta aynı olmadığı için Eşitlik 6 kullanılarak aktivitelerin başlangıç zamanları hesaplanamamaktadır. Optimizasyon sürecinde aktivitelere atanan süreye, metraj değerlerine ve iş verimine bağlı olarak ardıl aktivite üst katlarda öncel aktiviteye yetişebilmektedir. Bu durum optimizasyon sürecinin yönetilmesini güçleştirdiği için hesap yükünü düşürmek için ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetişme durumunda ardıl aktivitenin inşasına ara verilmesi çözümüne gidilmiştir. Bu yaklaşım yakınsama ile ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetişemeyeceği başlangıç zamanının hesaplanmasına göre daha az hesap yükü gerektirmektedir. Buna ek olarak Şekil 2 ve 3'te sunulan sırası ile aktivitelere ara vermeden oluşturulan doğrusal iş programı ile aktivitelere ara verilerek oluşturulan iş programları arasında tamamlanma süreleri karşılaştırıldığında ara verilerek yapılan iş programının daha kısa sürede tamamlandığı görülecektir. Bu nedenle doğrusal iş programında aktivitelere ara verebilme seçeneği eklenmiştir.

Ardıl aktivitenin inşaat süresinin öncel aktiviteden daha kısa olması durumunda ardıl aktivitenin iş ortasındaki ara süresi Eşitlik 7'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

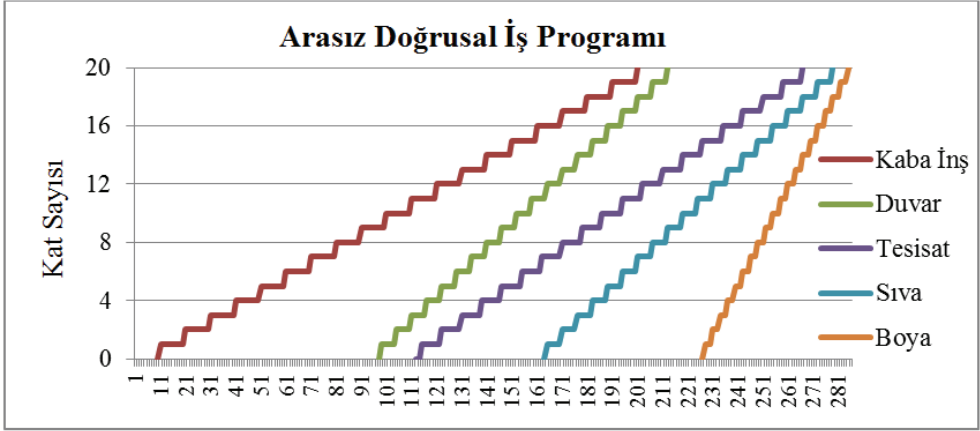
$$ARA_{j_ard} = (KS - A) * (SÜRE_j - SÜRE_{j_ard}) \quad (7)$$

Eşitlik 7'de KS kat sayısı A , binanın kat sayısı değerinin yarısının yuvarlanmış değerini ifade etmektedir.

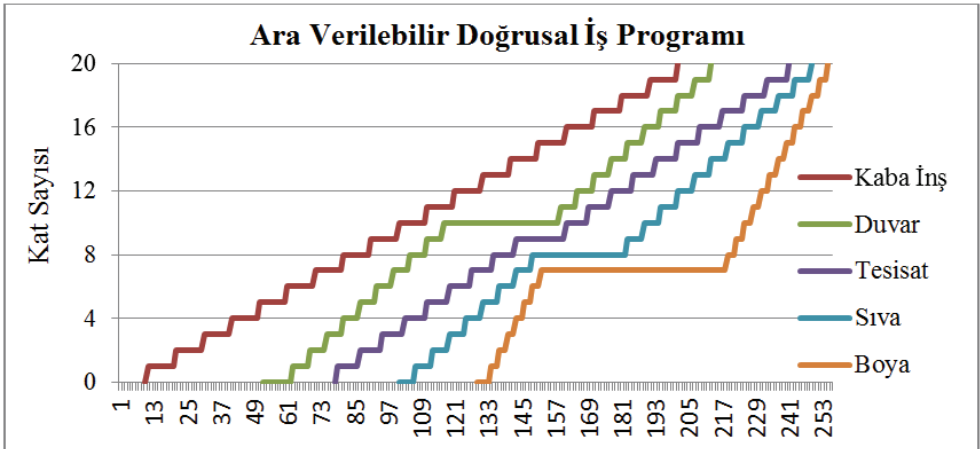
Ara verilerek başlangıç ve tamamlanma zamanı hesaplanmış bir aktivitenin ardılının süresi öncelden daha kısa ise ardıl aktivitenin ara süresi Eşitlik 8'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$ARA_{ard2} = KS * (SÜRE_{ard1} - SÜRE_{ard2}) \quad (8)$$

Eşitlik 8’de ard1 ara verilerek sürdürülen ard1 aktiviteyi, ard2 ise ard1 aktivitesinin ardını ifade etmektedir. Aktivitelere ara verilebildiği doğrusal iş programı Şekil 3’te sunulmuştur. Eşitlik 7 ve 8’de hesaplanan ARA değerleri kadar aktiviteler arası doğrusal iş programına göre daha erken başlatılabilmektedir.



Şekil 2 - Aktivitelere ara verilmeden oluşturulan doğrusal iş programı



Şekil 3 - Aktivitelere 1 kere ara verilebilir doğrusal iş programı

Tüm aktivitelerin her kat için başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenmesinin ardından aktivitelerin gerçekleştirildiği günleri tanımlayan değişkenin değerleri Eşitlik 9’da ifade edildiği gibi belirlenir.

$$\begin{aligned} isg \leq BAS_{j,b} \text{ ve } isg > TAM_{j,b} \text{ ise} & CD_{j,b, isg} = 1 \\ \text{değilse} & CD_{j,b, isg} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Eşitlik 9'da isg iş günü biriminde inşaatın kaçınıcı günde olduğunu, $CD_{j,b, isg}$ ise j aktivitesinin b 'nci kattaki isg iş günü için çalışma durumunu ifade etmektedir. İş kaleminin belirli bir gün içerisinde yürütülmesi durumunda iş kalemi ve günü temsil eden hücreye "1" değeri, işin yürütülmemesi durumunda ise "0" değeri atanır.

Belirtilen iş programı çalışma günlerinin mevsimsel etkilerinin ve çalışma yüksekliğinin dikkate alınmadığı klasik yaklaşımla oluşturulan takvimli iş programıdır. Sözleşmelerde iş bitirme süresi çalışılan gün sayısı değil takvim günü sayısı olarak tanımlanır. Buna ek olarak, inşaat sürecinde taşeronlarla iş yapılması çok yaygın bir durumdur. Taşeronların tatil günleri farklılık gösterebilir veya aynı anda başka şantiyelerde de çalışabilecekleri için haftanın sınırlı günlerinde şantiyede görev alabilirler. Ayrıca şehir merkezinde beton dökümü veya ağır iş makineleri kullanılarak gerçekleştirilmesi gereken iş kalemlerinin yürütülebilmesi belirli günlerle sınırlandırılmış olabilir. Bu tür iş kalemlerinin iş programı hazırlanırken haftanın hangi günlerinde çalışılabileceği dikkate alınmalıdır. Aktivitenin belirtilen takvim gününde yürütülmesine yönelik sorgulama Eşitlik 10'da gösterildiği gibi yapılmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Haftanın günü}(i) \in ACG_j \text{ ve } CD_{j,b, isg} = 1 \text{ ise} & TCD_{j,b,i} = 1 \\ \text{değilse} & TCD_{j,b,i} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da i , inşaatın takvimli çalışma gününü ACG_j j aktivitesinin çalışma günlerini, $TCD_{j,b,i}$ j aktivitesinin b 'nci katta i 'nci takvim günü için takvimli çalışma durumunu ifade etmektedir. İnşaatın yürütülebilir dönemde olması inşaat işlerinin tam verimde gerçekleştirileceği anlamına gelmez. İnşaatın sürdürülebilir olduğu dönemlerde hava koşullarının elverişsiz olması, Ramazan ayı dolayısı ile çalışanların oruç tutması ve binanın zemin seviyesinden yüksekliği iş verimini etkilemektedir. Hava koşullarından iş veriminin ne ölçüde etkileceğini Koehn ve Brown soğuk ve sıcak hava koşulları için sırası ile Eşitlik 11 ve 12'de sunulan formüllerle ifade etmiştir [29].

$$P_{so} = 0,0144T - 0,00313H - 0,000107T^2 - 0,000029H^2 - 0,0000357T * H + 0,647 \quad (11)$$

$$P_{si} = 0,0517T + 0,0173H - 0,00032T^2 - 0,0000985H^2 - 0,0000911T * H - 1,459 \quad (12)$$

Eşitlik 11 hava sıcaklığının 50 fahrenheitten daha düşük olduğu, eşitlik 12 ise daha yüksek olduğu durumlarda geçerlidir. Eşitlik 11 ve 12'de T Fahrenheit biriminde hissedilen sıcaklığı, H ise bağıl nemi vermektedir. Ölçülen sıcaklık 10 santigrat derecenin altında ise hissedilen sıcaklık rüzgârın etkisiyle düşmektedir. Soğuk havalarda hissedilen sıcaklığı ölçmek için Koehn ve Brown tarafından sunulan tablo kullanılmıştır [29]. Sıcak havalarda doğrudan güneş altında yapılan çalışmalarda ABD ulusal iş güvenliği ve sağlığı enstitüsü hissedilen sıcaklığın gölgede ölçülen sıcaklıktan 13 Fahrenheit daha fazla olduğunu belirtmiştir [57]. Belirtilen koşullara göre hissedilen sıcaklık, T hesaplanıp Eşitlik 11 veya 12 uygulanır. Çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisi Jung vd. tarafından hesaplanan iş veriminin çalışılan kata göre değişimini sunan denklem Eşitlik 13'te sunulmuştur [30].

$$\begin{aligned} b \leq 14 \quad & \text{ise} \quad E_Y = 1 \\ b > 14 \quad & \text{ise} \quad E_Y = 1 - (b - 14)^{0,8} * 0,03 \end{aligned} \quad (13)$$

Ramazan ayı boyunca yürütülen işlerin diğer dönemlere kıyasla daha yavaş ilerlemesi beklenir. Plancının öngörüsü doğrultusunda ne kadar verim kaybı olacağı E_K parametresi ile tanımlanabilir. Ramazan ayında verim kaybı olmayacağı düşünülürse E_K 1 olur. Sıcaklık E_S , yükseklik E_Y ve kültürel E_K verimleri i 'nci takvim günü, j 'nci aktivite ve b 'nci kat için çarpılarak Eşitlik 14'te sunulduğu gibi iş verimi hesaplanır.

$$E_{i,j,b} = E_{S,i,j,b} * E_{Y,i,j,b} * E_{K,i,j,b} \quad (14)$$

Hava koşulları, çalışma yüksekliği ve tatil günleri dikkate alındığında aktivitelerin başlangıç ve bitiş zamanları doğrusal iş programına göre sapacaktır. İş verimi zamana göre değişeceği için sabit bir katsayı ile süre uzatılması mümkün değildir. İş günü biriminde hesaplanan iş kalemlerinin takvimli gün biriminden hesaplanması aktivitenin başlangıcından bitişine kadar takvim günü sayılarak yapılır. İş veriminin dikkate alındığı takvimli iş programında aktivitelerin uygulanıyor olması veya olmaması kararı Eşitlik 15'te belirtildiği gibi alınır.

$$\left\{ (i \geq TAM_{j-\delta}) \vee \left(Süre_j > \sum_{X=TAM_{j-\delta}}^{i-1} E'_{X,j,b} \right) \vee (TCD_{j,b,i} = 1) \right\} \quad \text{ise} \quad E'_{i,j,b} = \min \left(E_{i,j,b}; 1 - \sum_{X=TAM_{j-\delta}}^{i-1} E'_{X,j,b} \right) \quad (15)$$

tersi ise $E'_{i,j,b} = 0$

Eşitlik 15'te $TAM_{j-\delta}$ j 'nci aktivitenin öncelinin tamamlandığı takvim gününü, i inşaatın kaçınıcı takvim gününde olduğunu ifade etmektedir. Aktivitenin i 'nci takvim gününe kadar gerçekleştirilen tamamlanma miktarı iş gününe göre bulunan süreden küçükse o gün aktivitenin yürütüleceği belirlenir ve i 'nci gündeki iş verimi olan $E'_{i,j,b}$ kadarlık kısmı gerçekleştirilir. Aktivitenin son günü $E'_{i,j,b}$ 'den daha az bir kısım kalmışsa sadece kalan kısım kadar iş yapılır.

Aynı aktivitenin verimi hem hava koşullarına hem de çalışma yüksekliğine bağlı olarak değişebileceği için bir iş kaleminin bir kattaki tamamlanma süresi katlara göre değişebilmektedir. Bu nedenle ilk aktiviteden başlayıp tüm aktiviteler için Eşitlik 15 uygulanarak her aktivite için hangi katta ne zaman başlayıp tamamlandığı hesaplanır. Aktivitelerin verim değeri sabit olmadığı için tamamlanma durumları her kat için sayısal integrasyonla belirlenmektedir. İş programının oluşturulması sürecinde verim değerlerinin aktivite ilerleme hızına etkisi ancak Eşitlik 15 uygulandıktan sonra belirlenebildiği için ardıl aktivitelerin öncel aktiviteye yetiştirme durumunun kontrolü ancak aktivitelerin yürütüldüğü günlerin tayin edilip iş programının oluşturulmasından sonra gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum Eşitlik 15'in büyük ölçekli işlerde binlerce defa uygulanmasını gerektirmektedir.

3.5. Günlük Malzeme Kullanımı

Gün içinde kullanılan bir malzeme cinsinin miktarı paralel yürütülen ve aynı malzemeye ihtiyaç duyan iş kalemlerinin günlük malzeme taleplerinin toplanması ile elde edilmektedir. İlgili gündeki iş veriminin, iş günü birimindeki aktivite süresine bölümü o gün için aktivitenin

gerçekleştirilme oranını vermektedir. Bu değerin aktivitenin gerçekleştirilmesi için gereken malzeme miktarı ile çarpımı ilgili aktivitenin yapımı sırasında o gün için kullanılacak malzeme miktarlarını verecektir. Eşitlik 16'da i 'nci günde j aktivitesinin yapımı için kullanılacak k sınıfı malzeme miktarını hesaplayan formül gösterilmektedir.

$$MK_{j,b,k,i} = \frac{M_{j,b,k} * E'_{i,j,b}}{Süre_j} \quad (k = 1, \dots, m_j) \quad (16)$$

Eşitlik 16'da $MK_{j,b,k,i}$ k 'nci malzeme türünün, b 'nci kattaki, j 'nci aktivite için i 'nci günde kullanılması gereken miktarını, m_j j aktivitesi için tanımlanmış malzeme sınıfı sayısını, $E'_{i,j,b}$ b 'nci kattaki, j aktivitesinin i 'nci takvim günündeki iş verimini ifade etmektedir. Eşitlik 16 j aktivitesi için ilişkilendirilmiş tüm malzeme türleri için uygulanır. Aktivitelerin ihtiyaç duyduğu k türü malzemeler toplandığında belirtilen sınıftaki malzeme için günlük toplam malzeme miktarı elde edilir. Malzeme miktarının hesabında kalıp tahtası hariç ihtiyaç duyulan malzeme toplanarak belirlenir. İstisna olarak kalıp tahtası beton prizini aldıktan sonra sökülüp tekrar kullanılacağı için sökülmüş olan kalıp imalatları ile toplanmaz. İnşaatın i 'nci takvim gününde k sınıfı malzeme için günlük malzeme kullanımı Eşitlik 17'de belirtildiği gibi hesaplanır. Eşitlik 17'de n , aktivite sayısını ifade etmektedir.

$$GMK_{k,i} = \sum_{j=1}^n \sum_{b=1}^{KS} MK_{j,b,k,i} \quad (17)$$

3.6. Günlük Personel İhtiyacı

Şantiyede çalışan personel sayısı belirlenirken gün içinde yürütülmekte olan aktivitelerde görev alan personel sınıflarında çalışan personel sayılarının tamamı toplanır. İnşaatın i 'nci takvim gününde çalışacak l 'nci sınıfa ait personel sayısı Eşitlik 18 ile hesaplanır.

$$GP_{l,i} = \sum_{j=1}^n \sum_{b=1}^{KS} [E'_{i,j,b}] * P_{l,b,j} \quad (18)$$

Eşitlik 18'de $P_{l,b,j}$ i 'nci günde b 'nci katta çalışan l 'nci personel sınıfını ifade etmektedir. Formülde yer alan verim faktörü $E'_{i,j,b}$ sıfırdan büyük ise yukarı yuvarlanarak 1 değerine sahip olacaktır. Böylece ilgili aktivitenin personel sayısı 1 ile çarpılıp i 'nci günde çalışan personel sayısına eklenecektir. Şantiyenin i 'nci gününde çalışan toplam personel sayısının belirlenmesi i 'nci günde çalışan tüm personel sınıflarına ait ekip sayılarının toplanması ile Eşitlik 19'da belirtildiği gibi hesaplanır.

$$GTP_i = \sum_{l=1}^z GP_{l,i} \quad (19)$$

Eşitlik 19'da, z düz işçi, marangoz, boyacı ustası vb. uygulamaya tanımlanmış personel sınıfı sayısını ifade etmektedir.

3.7. Günlük Doğrudan Maliyet

Şantiyede gerçekleştirilen işlerin doğrudan maliyeti malzeme, işçilik, iş makinesi ve ekipman giderlerinin toplanması ile elde edilir. Rayiç verileri olarak Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınladığı birim fiyat listesi kullanılmıştır. Bir aktivitenin inşaatın i 'nci takvim günündeki günlük doğrudan maliyetinin (AGDM) hesaplanması Eşitlik 20'de ifade edilmiştir.

$$AGDM_{j,b,i} = \sum_{k=1}^y (MK_{j,b,k,i} * BF_{k,y} * E'_{i,j,b}) + \sum_{l=1}^z (P_{l,b,j} * BF_{l,y} * [E'_{i,j,b}]) + \sum_{m=1}^x (IM_{m,b,j} * BF_{l,y} * [E'_{i,j,b}]) \quad (20)$$

Eşitlik 20'de $AGDM_{j,b,i}$ j 'nci aktivitenin, b 'nci katta i 'nci takvim günündeki günlük doğrudan maliyetini, $BF_{k,y}$ k 'ncinci malzeme türünün ilgili yıldaki birim fiyatını, $P_{l,j}$ j aktivitesinin inşaatı için tayin edilen l 'ncinci personel sınıfına ait personel sayısını, $BF_{l,y}$, l 'ncinci personel sınıfına ilgili yılda ödenen birim ücreti, $IM_{m,b,j}$ j aktivitesinin inşaatı için tayin edilen m türü iş makinesinin sayısını, $BF_{m,y}$ m 'ncinci tür iş makinesinin ilgili yıldaki birim fiyatını belirtmektedir. İnşaatın i 'nci takvim gününde inşaat için kullanılan kaynak ve malzemenin belirlenip o yılki rayiç değeri veritabanından getirilir. Rayiçler ile kaynak miktarının çarpılması sonucu ilgili kaynak için gerçekleştirilen günlük maliyet hesaplanır. Tüm aktivite maliyetlerinin toplanması ile şantiyedeki günlük doğrudan maliyet Eşitlik 21'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$GDM_i = \sum_{b=1}^{KS} \sum_{j=1}^n AGDM_{j,b,i} \quad (21)$$

Eşitlik 21'de n toplam aktivite sayısını, GDM_i i 'nci günün toplam doğrudan maliyetini ifade etmektedir. Eşitlik 21 kullanılmadan GDM_i şantiyede harcanan toplam malzeme miktarı ile, kullanılan iş makinesi ve çalışan işçi sayılarından hesaplanabilmektedir. Fakat $AGDM_{j,b,i}$ 'nin hesaplanması ile olası maliyet aşımalarının hangi aktivite veya aktivitelerden kaynaklandığı belirlenebileceği için daha etkin maliyet kontrolü uygulanabilecektir. İnşaatın başlangıcından i 'nci takvim gününe kadar gerçekleşen toplam doğrudan maliyet (TDM) Eşitlik 22'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$TDM_i = \sum_{gün=1}^i GDM_{gün} \quad (22)$$

Doğrudan maliyete ek olarak şantiyede çalışanlara verilen yemek, temizlik, aydınlatma, ısıtma, yapılan işlerin kalite kontrolü ve diğer giderlerden oluşan genel giderler kalemi de bulunmaktadır. Genel giderlerin önceden yüksek doğrulukta kestirilmesi çok güçtür. İnşaat sektöründe genel giderler genellikle geçmişte gerçekleştirilen benzer büyüklükteki işlerde ortaya çıkan genel giderler göz önüne alınarak tahmin edilir. Genel gider değerindeki belirsizliğin yüksek olması nedeniyle inşaat süresi boyunca sabit bir değer alma eğilimi yüksektir. Genel giderler Eşitlik 23'te sunulduğu gibi toplam doğrudan maliyete eklenerek toplam maliyet elde edilir.

$$TM_i = \sum_{gün=1}^i (TDM_{gün}) + GG * i \quad (23)$$

Eşitlik 23'te TM_i inşaatın başından i 'nci takvim gününe kadar olan süredeki toplam maliyeti, GG sabit günlük genel gider tutarını ifade etmektedir. Kontrolörler tarafından kabulü gerçekleştirilen işlerin maddi karşılığının sözleşmede belirtilen şartlara göre yükleniciye ödenmesi hak ediş ödemesi olarak tanımlanır. Hak ediş ve ihzarat ödemeleri sözleşmede belirtilen dönemlerde yapılır. Nakit akışının günlük oluşturulabilmesi için Eşitlik 24'te hak ediş ödemeleri her gün için tanımlı bir ayrık fonksiyon olarak ifade edilmiştir.

$$THE_i = \sum_{gün=1}^i HE_{gün} \quad (24)$$

$$NA_i = THE_i - TM_i \quad (25)$$

$HE_{gün}$ ifadesi ilgili günde elde edilen hak ediş veya ihzarat ödeme miktarını, NA_i ise inşaatın i 'nci takvim günündeki nakit akış durumunu ifade etmektedir.

3.8. Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma ile iş programı optimizasyonu

Temin güçlüğü, ekonomik kısıtlar veya pandemi sürecinde olduğu gibi sağlık tedbirlerinden dolayı inşaatçı çalışan personel sayısı üzerinde kısıtlamalar bulunabilir. Personel sayısının düşürülmesi inşaat süresinin uzamasına neden olacaktır. Ayrıca inşaatın genel giderleri ile inşa edilecek tesisten elde edilecek fayda dikkate alınarak en uygun proje süresinin belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle gelişmiş bir optimizasyon algoritması uygulanmalıdır. Genetik Algoritma (GA) optimizasyon için oldukça yaygın biçimde kullanılmış bir algoritmadır. GA tarama alanını çaprazlama operatörü ile başarılı biçimde tarayabilmektedir. Fakat yerel aramada çok başarılı değildir. Başarılı biçimde yerel arama yapan tavlama benzetimi ile birleştirilerek tavlama benzetimli genetik algoritma geliştirilmiştir [58]. Daha iyi yerel arama yeteneğine sahip olduğu için bu çalışmada TBGA uygulanarak kaynak kısıtlı zaman-maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuş ve TBGA ile iş programı optimize edilmiştir.

Genetik algoritma mayoz bölünme ve doğal seleksiyondan esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır [59]. Başlangıçta uygulanabilir çözümlerden oluşan bir popülasyon rastgele sayılardan üretilir ve yeni bireyler oluşturularak daha iyi çözümler aranır. Popülasyonu oluşturan bireyler rastgelelik içerecek şekilde eşleştirilir ve çaprazlama yapılarak yeni oğul bireyler oluşturulur. Çaprazlama gerçekleştirilirken iyi sonuç veren bireylerin daha yüksek eşleşme ihtimalinin olması oğul bireylerin kalitesini artırır. Çaprazlamaya tabi tutulacak bireylerin belirlenmesi Eşitlik 26'da belirtilen formülle gerçekleştirilir.

$$Ç_i = (1,5 * Pop - Sıra_i) * (2 + rand(1)) \quad (26)$$

Eşitlik 26'da ζ_i 'ninci bireyin çaprazlama uyum değerini, $S_{i,r}$ 'ninci bireyin amaç fonksiyonu değerine göre küçükten büyüğe sıralanmış halde kaçınıcı sırada olduğunu, $rand(1)$ ise 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayıyı ifade etmektedir. Bireyler sahip oldukları uyum değerine göre artan sıralanırlar ve çaprazlama oranı * popülasyon boyutu kadar birey çaprazlama için seçilir ve çaprazlanırlar. Tek noktalı çaprazlama yapıldığı için çaprazlama konumunun belirlenmesi için 1 ile parametre sayısı arasında değer alacak şekilde rastgele sayı üretilir ve parametre kümeleri üretilen sayının belirttiği konumdan parçalanıp çaprazlanırlar.

Çaprazlama için eşleşen bireyler çaprazlama noktasında taşıdıkları genleri değiştirirler ve 2 yeni oğul oluşur. Çaprazlama operatörü sayesinde popülasyonda bulunmayan yeni bireyler oluşturulur ve daha iyi çözümler aranır. Çaprazlama operatörü bireylerin taşıdıkları bilgiyi değiştirmeden yeni bireyler oluşturduğu için popülasyonda bulunmayan bir geni üretemez. Bu nedenle mutasyon operatörü bireylerin taşıdıkları bilgiyi değiştirerek popülasyonda bulunmayan yeni genleri oluşturmak için kullanılır. Mutasyon bireyin taşıdığı genleri rastgele değiştirerek daha iyi birey oluşturmayı amaçlar. Mutasyon operatörünün rastgele değişim yaptığı durumda amaç fonksiyonu iyi olan bireyler üzerinde olumsuz etki etme olasılığı yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada mutasyon operatörü tavlama benzetimi ile birleştirilerek hibrit bir yöntem uygulanmıştır [60]. Mutasyona tabi tutulacak bireylerin seçiminde her birey için rastgele sayılar üretilir ve bireyler kendisine isabet eden sayılara göre artan biçimde sıralanır. Sıralamada ilk "mutasyon oranı * popülasyon boyutu" arasına giren bireyler mutasyona tabi tutulur. Mutasyonun gerçekleşeceği konumu belirlemek için 1 ile parametre sayısı arasında değer alacak şekilde rastgele sayı üretilir. Mutasyona tabi tutulacak genin değeri rastgele azaltılır veya artırılır ve amaç fonksiyonu yeniden hesaplanır. Mutasyonun kabul edilme kararı Eşitlik 27'de belirtildiği gibi verilir.

$$Karar \begin{cases} kabul & rand(1) \leq e^{-\frac{(f_0 - f_m)t}{f_e BC}} & ise \\ red & rand(1) > e^{-\frac{(f_0 - f_m)t}{f_e BC}} & ise \end{cases} \quad (27)$$

Eşitlik 27'de f_m ve f_0 sırası ile mutasyona uğramış birey ile mutasyon öncesi bireyin amaç fonksiyon değerlerini, f_e popülasyondaki bireyler arasında en iyi ve en kötü amaç değerleri arasındaki farka eşittir. BC Boltzmann sabiti, t ise süreyi belirtir. Süre genetik algoritma çevrim sayısına eşitlenir.

TBGA tarafından en son uygulanan operatör ise doğal seleksiyondur. Bu çalışmada rulet tekerleği yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde her bireyin uygunluk değeri Eşitlik 26'da belirtilen denklem ile hesaplanır. Bireyler uygunluk değerlerine göre artan biçimde sıralanır ve sıralamanın üst sırasında popülasyon boyutu kadar birey hayatta kalır, diğer bireyler ise yok edilir. Doğal seleksiyon ile popülasyonun büyümesi engellenerek optimizasyon yönteminin hesap yükü makul düzeyde tutulur.

Problemi oluşturmak için şantiyede görev alabilecek en yüksek işçi sayısı ve projenin tamamlanması için izin verilen süre ile genel giderler tanımlanır. Uygulamada kısıtların ihlal edilmemesi esastır fakat optimizasyon sürecinde kısıtları ihlal etmeden rastgele sayılarla başlangıç çözümünün üretilmesi genelde çok mümkün değildir. Bu nedenle kısıtların ihlali durumunda bir ceza fonksiyonu tanımlanır. Verilen ceza ile kısıt ihlal eden çözümler

uygulanabilir çözümlere göre daha yüksek maliyetli olacağı için daha düşük hayatta kalma olasılığına sahip olacaklar ve optimizasyon sürecinin ilerleyen yinelemelerinde yerlerini daha iyi çözümlere bırakacaklardır. Ceza değerlerinin makul büyüklükte olması önemlidir. Proje teslim süresinin aşılması durumunda gün başına ödenecek ceza bedeli süre kısıtının ihlalinde uygulanacak ceza fonksiyonuna eşitlenebilir. Ceza fonksiyonlarının dâhil edildiği amaç fonksiyonu Eşitlik 28'de gösterilmiştir.

$$\min f(\mathbf{X}) = GC * \text{Süre}(\mathbf{X}) + PC * \text{Personel}(\mathbf{X}) + TM_{psür} \quad (28)$$

Eşitlik 28'de \mathbf{X} aktivite sürelerini ifade eden parametre vektörünü, GC gecikme için gün başına ödenecek ceza miktarını, PC izin verilen personel sayısının aşımı durumunda personel başına ödenecek ceza miktarını, $TM_{psür}$ ise Eşitlik 23 uygulanarak hesaplanan ceza fonksiyonları hariç toplam proje maliyetini belirtir. $\text{Süre}(\mathbf{X})$ ve $\text{Personel}(\mathbf{X})$ sırası ile Eşitlik 29 ve 30'da tanımlanmıştır.

$$\text{Süre}(\mathbf{X}) = \begin{cases} psür \leq TS & \text{ise} & 0 \\ psür > TS & \text{ise} & psür - TS \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{Personel}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{psür} \lambda_i \begin{cases} P_i \leq P_{mak} & \text{ise} & \lambda_i = 0 \\ P_i > P_{mak} & \text{ise} & \lambda_i = P_i - P_{mak} \end{cases} \quad (30)$$

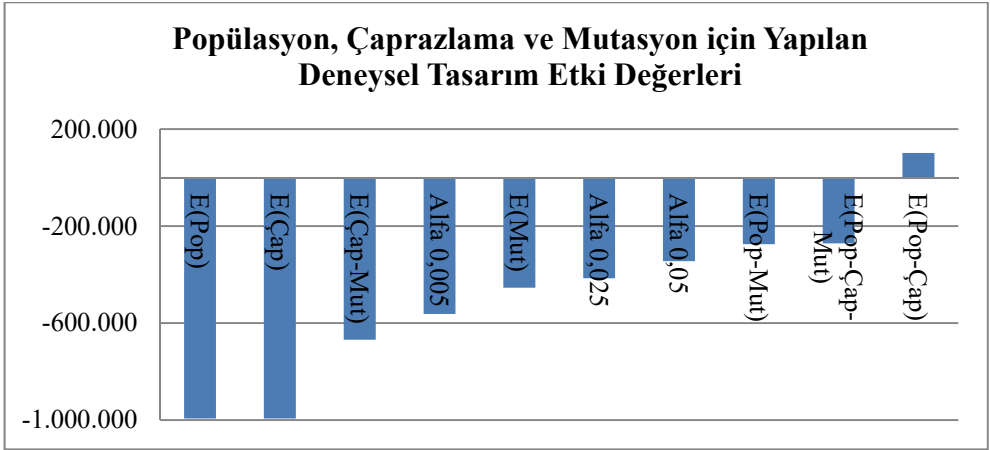
Eşitlik 29 ve 30'da $psür$ aktiviteler için atanan süreler sonucunda elde edilen projenin tamamlanma süresini, TS ise taahhüt edilen proje tamamlanma süresini, P_i i'ninci günde şantiyede gerçekleşen toplam personel görevlendirmesini, P_{mak} ise şantiyede aynı anda çalışmasına izin verilen maksimum personel sayısını ifade etmektedir. Personel kısıtının aşımında ceza fonksiyonunun sadece personel aşımını değil, kaç personelle aşıldığının da dikkate alınması gereklidir. Aksi halde kısıtları aşırı ihlal eden çok kalabalık personel istihdamına yol açan iş programlarına yakınsama eğilimi oluşmaktadır. Aktivite süreleri TBGA algoritması ile değiştirilerek amaç fonksiyonunun en düşük değeri aranmaktadır.

Makul düzeyde hesap yükü ile en uygun çözüme ulaşmak için popülasyon, çaprazlama ve mutasyon oranları dikkate alınarak deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Deneme sayısı toplam 1000 adet olacak şekilde popülasyon boyutu [25; 50] birey, çaprazlama [0,52; 0,72] ve mutasyon [0,40; 0,80] arasında değişecek şekilde deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Popülasyon, çaprazlama ve mutasyon için belirtilen alt ve üst sınır değerleri atanarak toplam 8 adet kombinasyon oluşturulmuştur. Rastgeleliği ortadan kaldırmak için her kombinasyon 4'er kere çalıştırılarak toplamda 32 defa optimizasyon süreci tekrar edilmiştir. İncelenen parametrelerin sonuca etkileri Eşitlik 31'de ifade edilen formülle hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} E(A) &= \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-} \\ E(AB) &= 0,5 * [(\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-}] \\ E(ABC) &= 0,25 * [((\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-})_{C+} - ((\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-})_{C-}] \end{aligned} \quad (31)$$

Eşitlik 31’de $E(A)$, $E(AB)$ ve $E(ABC)$ sırası ile bir, iki ve üç bağımlı değişkenin sonuca etkisini ifade etmektedir. A^+ , A bağımlı değişkenine üst değer; A^- , A bağımlı değişkenine alt değer atandığı durumu belirtmektedir. \bar{Y} ifadesi ise ortalama değeri ifade etmektedir. Hesaplamalar sonucunda parametreler arasında Şekil 4’te sunulan ilişkiler belirlenmiştir.

Deneysel tasarım sonuçlarına göre girdi parametreleri ile toplam proje maliyeti arasında negatif korelasyon bulunmaktadır. Özellikle popülasyon ve çaprazlama parametreleri $\alpha = 0,05$; $0,025$ ve $0,005$ değerleri ile yapılan hipotez testlerine göre üst sınır değerinin atanması anlamlı bulunmuştur. Mutasyon oranının arttırılması ise sadece $0,005$ alfa değerine göre anlamlı sonuç verememiştir. Girdi parametreleri arasında sadece popülasyon ile çaprazlama değerlerinin eş zamanlı arttırılması toplam proje maliyetini arttırmaktadır, fakat artış miktarı anlamlı değer eşliğinin altında kalmaktadır. Diğer ikili ve üçlü parametre değeri arttırma eşleşmeleri ise toplam proje maliyetini düşürme eğilimindedir.



Şekil 4 - Popülasyon, çaprazlama ve mutasyon oranlarının toplam maliyet ile etki değerleri

Elde edilen değerler sonucunda popülasyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri için üst sınır değerlerinin atanması sonucunda daha düşük toplam proje maliyetinin elde edileceği belirlenmiştir. Hesaplama sayısını 1000’in çok üzerine çıkarmadan popülasyon boyutu 50 çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin oranı sırası ile %72 ve %80 olarak tayin edilmiştir. Toplam 15 çevrim yapıldığında optimizasyon süreci sonlanmaktadır. Bu şekilde 1190 deneme yaparak en iyi sonuç alınabilecek parametre değerleri tespit edilmiştir.

4. VAKA ANALİZİ

Önerilen proje yönetim sürecinin uygulanması kat kalıp planı Şekil 5’te sunulan 30 katlı bir inşaat projesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Projenin yapısal ve mimari elemanlarının düğüm noktalarıyla tanımlanmasıyla komşuluk ilişkileri kurulmuş ve metraj hesaplamaları yüksek

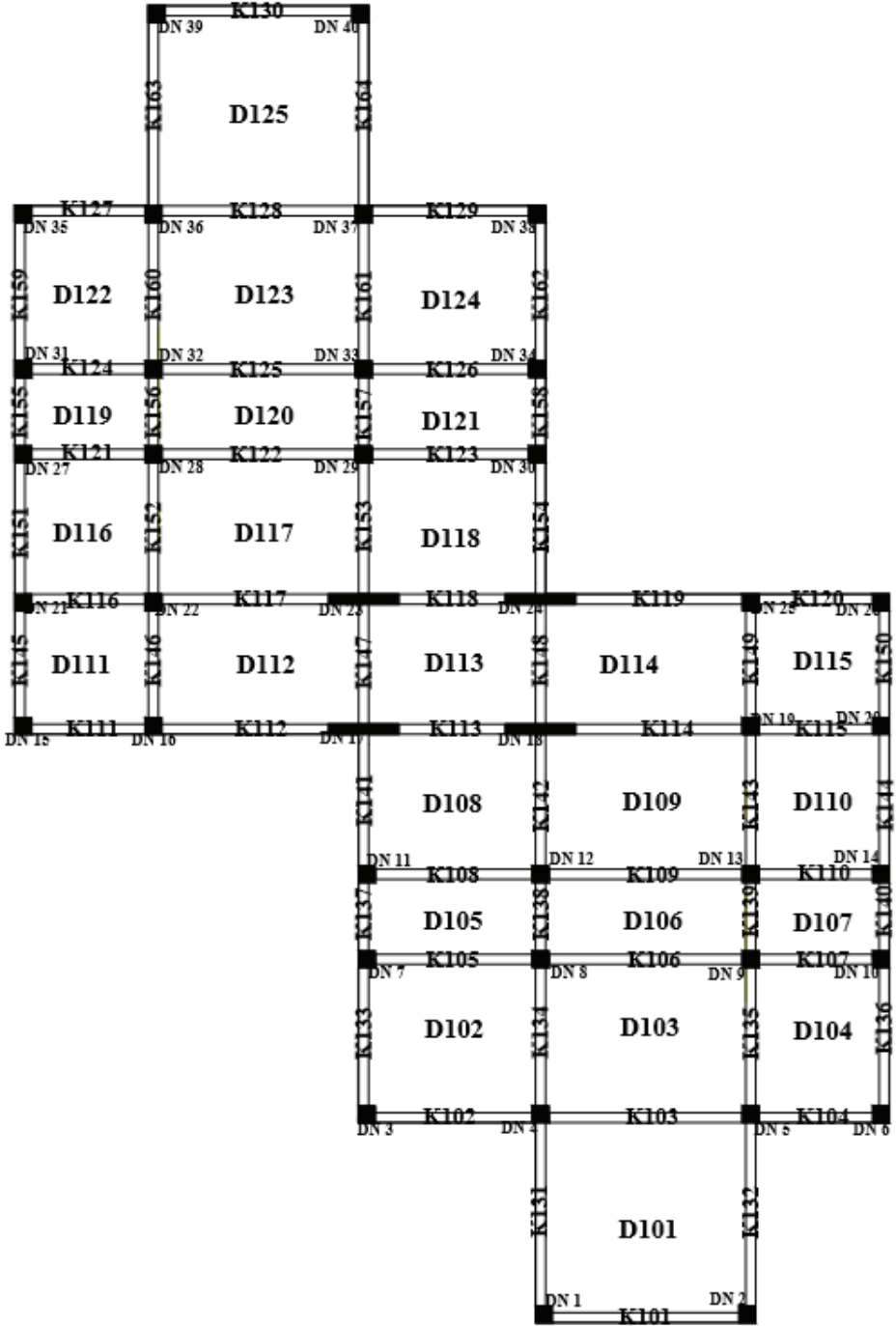
doğrulukta gerçekleştirilmiştir. Aks açıklıkları ile yapısal ve mimari elemanların boyutlarının tanıtılmasıyla Tablo 1’de sunulan metraj değerleri elde edilmiştir.

Aktivitelerin işçilik, iş makinesi ve malzeme gereksinimleri Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır. İlgili imalatların metraj değeri imalat türünden bağımsız biçimde hesaplanır. Elde edilen değer tanımlanmış poz tarifleri ile çarpılır. İmalatın uygulanması kullanıcı tarafından tercih edilmişse ilgili imalar için δ değeri 1, aksi durumda 0 olur. Şekil 6’da temsili olarak döşeme imalatı için işçilik ve malzeme gereksinimi hesaplama süreci gösterilmiştir. Şekil 5’te sunulan kat kalıp planında x doğrultusunda 5, y doğrultusunda 9 adet açıklık bulunmaktadır. Yapıda bulunan döşemelerin yer kaplama malzemelerinin tanımlanabilmesi için Şekil 6’da sunulduğu gibi 9 satır ve 5 sütundan oluşan tablo hazırlanmıştır. Yer döşemesi için granit, mermer, meşe ağacı, karo ve kauçuk malzemeleri kullanılarak yapılan imalatlar hazırlanan uygulamaya tanımlanmıştır. Tabloda bulunan bir döşeme konumu için seçilen imalat türünü tarif eden δ değeri 1, diğer imalat türlerinin δ değerleri 0 olacaktır. Bu şekilde imalat tanımları için parametrelerin değerleri belirlenip Eşitlik 1’de yerine konup ilgili imalat için işçilik ve malzeme gereksinimleri hesaplanmaktadır.

Tablo 1 - Kat kalıp planı Şekil 5’te sunulan yapının zemin kat için hesaplanan metraj değerleri

İnşaat Kalemi	Miktar	Birim	İnşaat Kalemi	Miktar	Birim
Kalıp	1036,71	m ²	Yer Döşemesi		
İnce donatı(8-12)	6,7887	Ton	Doğaltaş	0	m ²
Kalın donatı(14-28)	12,466	Ton	Granit	68,24	m ²
Beton	151,5915	m ³	Mermer	84,625	m ²
Kalıp İskelesi	1419,263	m ³	Meşe Ağacı	128,4	m ²
Dış Duvar	221,97	m ²	Karo	159,595	m ²
İç Duvar	191,48	m ²	Kauçuk	35,015	m ²
Kılıcına Duvar	74,855	m ²	Laminant Parke	0	m ²
Cephe İskelesi	418,2	m ²	Duvar Kaplama		
Dış Cephe Mantolama	293,01	m ²	Boya	1216,63	m ²
Dış Cephe Sıva	304,96	m ²	Traverten	103,8	m ²
Dış Cephe Boya	304,96	m ²	Ahşap	23,69	m ²
İç Cephe Duvar Alçı Sıva	1126,19	m ²	Mermer	81,6	m ²
İç Cephe Kaba Sıva	475,875	m ²	Duvar Fayansı	134,88	m ²

Şekil 6’da sunulan yer kaplaması seçimi veri doğrulaması ile sadece sisteme tanımlı iş tariflerinin seçiminin yapılabileceği bir ara yüz sunmaktadır. Bu sayede analizi yapılamayacak olan bir imalatın seçimi önlenmektedir. Farklı iş sınıfı iç ve dış cephe kaplaması, duvar örülmesi iş kalemlerinde de bulunmaktadır. Belirtilen iş tanımları Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca hazırlanmış olan poz tarifleri kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 5 - Örnek projenin kat kalıp planı

Döşemelerin Kaplama Türü					
	1	2	3	4	5
1		Granit			
2	Kauçuk	Meşe Ağacı	Karo		
3	Karo	Meşe Ağacı	Karo		
4	Karo	Meşe Ağacı	Karo		
5	Mermer	Mermer	Mermer	Mermer	Mermer
6			Karo	Meşe Ağacı	
7			Karo	Meşe Ağacı	
8			Karo	Meşe Ağacı	
9				Granit	

Şekil 6 - Döşeme için farklı kaplama türünün seçilebilmesi

Aktivite süresi ve kaynak temini hesaplamaları gün içinde tamamlanması gereken aktivitelerde Eşitlik 3 ve 4 uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Gün içinde tamamlanma koşulu iş makinesinin gerçekleştirdiği işlere paralel yürüyen işlerin analizini gerçekleştirebilmek için getirilmiştir. Vaka analizinde derinliği 15,75 metre olan fore kazık imalatları 1 metre delme işini 0,32 saatte gerçekleştirebilen iş makineleri ile yürütülmektedir. Eşitlik 2 ile belirtilen imalat için bir iş makinesinin fazla mesai yaparak günde 2 adet kazık kuyusu delebileceği belirlenmiştir. Bu iş için 3 adet aynı iş makinesi tahsis edildiğinde günde 6 adet fore kazık imalatı gerçekleştirilecektir. Fore kazık işinin iş tarifi delmeyi ve betonlamayı içermektedir. Fakat donatı işini içermemektedir. Bir adet fore kazık için yerleştirilmesi gereken donatı miktarı günlük inşa edilen fore kazık sayısı ile çarpılarak günlük gereken donatı miktarı hesaplanır. Belirtilen hesaplama Eşitlik 3 ile tanımlanmıştır. Donatı miktarının hazırlanması için çalışması gereken personel sayısı ise Eşitlik 4 ile hesaplanır. Belirtilen işlemlerin özeti Tablo 2’de sunulmuştur. İlgili adam.saat hesaplamaları parametre tayin ederek birbirini arasında ilişkilendirildiği için iş makinesi sayısının veya imalat türünün değişimi durumlarında tüm hesaplamalar insan müdahalesi olmadan gerçekleştirilmektedir.

Tablo 2’nin 7 ve 8. satırlarında bir adet fore kazık için kullanılacak fret ve boyuna donatı miktarı ton biriminde belirtilmektedir. Tablonun dokuz ve onuncu satırlarında ise günde 6 adet kazık yapılacak olması nedeniyle günlük kullanılacak donatı miktarları yer almaktadır. Günlük kullanılacak donatı miktarları Ø8-12 ve Ø14-28 ebatlı donatı yerleştirme işlerine ait pozlarda yer alan birim iş için gereken makine kullanımı ve işçilik değerleri ile çarpılarak günlük gereken işçilik değerleri hesaplanır. Belirtilen donatı işleri birim iş için farklı çalışma süresi gerektirmektedir. Bu nedenle her iki iş için gereken iş makinesi ve işçilik değerleri ilgili metraj değerinin iş tarifi ile çarpılır ve çarpım değerleri toplanır. İşçiler için adam.saat, iş makineleri için makine.saat olarak tanımlanan değerler tablonun son dört satırında sunulmaktadır. Sunulan rakamlar bir günde gerçekleştirilen fore kazık imalatları için ihtiyaç duyulan donatının yerleştirilmesi için kaç saat makine ve personelin çalıştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Değerlerin yanında parantez içinde sunulan rakamlar ise gereken çalışmayı günlük mesai saati içinde veya 11 saati aşmadan fazla mesai yapılarak kaç işçi veya iş makinesi ile tamamlanabileceğini ifade etmektedir. Belirtilen donatı işi mutlaka 1 günde tamamlanması gerektiği için personel ve makine sayıları işin belirtilen sürede yapılabilmesini sağlayacak şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 2 - Fore kazık işinin adam.saat ve metraj hesaplama detayı

İşin Tanımı	Birimi	Miktar
Delgi makinesi	adet	3
Makine Başına Yapılan İmalat	adet	2
Fore Kazık	adet	6
Delgi makinası yakıtı	litre	517,1
Erbab işçi	adam.saat	15,12 (2 işçi)
Düz işçi	adam.saat	15,12 (2 işçi)
Bir fore kazık için gereken (8-12) donatı	Ton	0,058
Bir fore kazık için gereken (14-28) donatı	Ton	0,664
Günlük gereken (8-12) donatı	Ton	0,366
Günlük gereken (14-28) donatı	Ton	4,263
Demir kesme makinesi	saat	8,664 (1 makine)
S.D.U	saat	17,676 (2 işçi)
S.D.U.Y	saat	26,515 (3 işçi)
Düz işçi	saat	48,175 (4 işçi)

Tablo 1’de metraj değerleri sunulan donatı, kalıp, duvar, yer döşemesi gibi iş kalemlerinin süre tayini fore kazık donatı işine göre daha serbest biçimde gerçekleştirilir. Belirtilen işlerin belirli bir süre içinde mutlaka tamamlanma zorunluluğu ancak özel durumlarda oluşabilir. Önce Eşitlik 1 kullanılarak metraj değerleri ile ilgili poz tarifleri çarpılarak adam.saat ve makine.saat değerleri elde edilir. Hesaplanan işçilik değerleri göz önüne alınarak makul bir aktivite süresi tayin edilir ve Eşitlik 5 uygulanarak işin gerçekleştirilmesi için kaç personel ve kaç ekipmanın temin edilmesi gerektiği hesaplanır. Hesaplanan ekip boyutları çok kalabalık veya az olursa aktivite süresi deneme yanılma ile ayarlanarak daha makul büyüklükte ekiplerin oluşturulması sağlanabilir.

Tüm aktivite sürelerinin belirlenmesinin ardından doğrusal iş programına göre iş programı oluşturulur ve Eşitlik 6 uygulanarak iş günü biriminde inşaat süresi belirlenir. Bu aşamada inşaatın kaç iş gününde tamamlanacağı işçilerin farklı tatil günlerine sahip olmayacağı, çalışma veriminin sürekli en üst düzeyde olacağı ve temin edilmesi gereken kaynaklar üzerinde bir kısıt olmadığı varsayılarak belirlenmektedir. Vaka çalışması için kalıp ve donatı işlerinin 9 gün, beton dökümünün 1 gün ve priz süresinin 5 gün olacağı varsayılarak bir kat kaba inşaatın 15 günde tamamlanacağı varsayılmıştır. İnce iş kalemleri olan duvar işinin 10 gün, tesisatın 2 gün, iç cephe sıvasının 3 gün, yer döşemesinin 3 gün, kapı ve pencere doğramalarının 4 gün, cephe iskelesinin kat başına 1 gün, dış cephe mantolama işinin kat başına 6 gün, dış cephe sıva işinin 6 gün, dış cephe boya işinin 7 günde tamamlandığı durumda inşaatın 915 iş gününde tamamlanacağı hesaplanmıştır.

Belirtilen süre hesaplaması hiç tatil yapılmadan çalışıldığı, kaynak temininde hiçbir kısıtın olmadığı ve iş veriminin her zaman en üst düzeyde olduğu varsayımlarına dayanmaktadır.

Belirtilen varsayımlar nedeniyle inşaat süresinin hesaplanan süreden daha uzun sürmesi yüksek olasılıktadır. Bu sebeple iş günü olarak hesaplanan sürede işin tamamlanmasını taahhüt etmek çok risklidir. Tatil günlerini dikkate alarak takvimli iş programını oluşturmak için ilgili aktivitelere Tablo 3'te sunulan ekiplerin tatil günleri atanmıştır. Takvimli iş programı her aktivite 1 gün bile tatil yapsa doğrusallıktan ayrılmaktadır. Çünkü 2 gün süren tesisat işi 3 kat ilerledikten sonra 1 gün tatil yaparken 9 gün süren kalıp ve donatı işleri 1 kat bitmeden tatil yapmaktadır. Bu durum doğrusal hesaplamayı bozduğu için Eşitlik 9 ve 10 uygulanarak iş programı oluşturulabilmektedir.

Tablo 3 - Aktiviteleri yürüten taşeronların izin günleri

İş Adı	İzin Günü
Kalıp	Pazar
Donatı	Cumartesi
Beton Dökümü	Pazar
Priz	YOK
Duvar	Pazar
Tesisat	Cumartesi
İç cephe sıva	Cuma
Yer döşemesi	Perşembe
Doğrama	Perşembe
İç cephe kaplama	Cuma
Cephe iskelesi	Cumartesi
Mantolama	Pazar
Dış cephe sıva	Pazar
Dış cephe boya	Pazar

Tablo 4'te sunulan her 2 iş çizelgesinde aktivitelerin inşaat boyunca aynı iş hızında ilerlediği ve kaynaklar üzerinde bir kısıt bulunmadığı varsayılmıştır. Aktivite süreleri ve ekip büyüklükleri belirlenirken diğer aktivitelerle olan kaynak çakışması durumu incelenmeden iş programı oluşturulmuştur. İnşaat süresince şantiyenin aşırı kalabalık olması salgın hastalık riski artırıp malzeme tedarikini de zorlaştırabilecektir. Buna ek olarak inşaatların yoğunlaştığı dönemlerde kalıpcı, demirci, doğramacı, kaynakçı gibi iş gruplarının yevmiyeleri yükselmektedir. Personel giderlerini çok arttırmamak için istihdam edilecek işçi sayısı üzerinde kısıt uygulamak gerekebilmektedir. Deneme yanılma ile işçi sayısı üzerindeki kısıtların çözülmesi durumunda yüksek maliyetli bir çözüme ulaşılması olasıdır. Çünkü gerçekleştirilebilecek iş programı sayısı trilyonları geçebilmekte ve birkaç deneme sonrası elde edilecek iş programının en iyi çözüme göre daha yüksek maliyetli olması beklenmektedir.

Tablo 4 - İş günü ve takvim gününe göre belirlenmiş aktivite başlangıç ve bitiş günleri

Aktivite	İş Günü		Takvim Günü	
	Başlama	Bitiş	Başlama	Bitiş
Kaba İnş	239	704	241	746
Duvar	409	719	398	760
Tesisat	664	726	693	765
İç cephe sıva	671	764	699	807
Yer döşemesi	676	769	705	813
Doğrama	684	808	710	854
İç cephe kaplama	719	812	755	863
Cephe iskelesi	676	707	710	746
Mantolama	682	868	756	973
Dış cephe sıva	687	873	760	977
Dış Cephe Kaplama	698	915	763	1016

Kaynaklar üzerindeki kısıtların ihlal edilmeden en kısa sürede inşaatı tamamlanmasını sağlayan iş programının belirlenmesi kaynak kısıtlı iş programı problemi olarak tanımlanmaktadır. Bu problemin dışında inşa edilecek binanın kullanımından elde edilecek gelir inşaat süresi tamamlandıktan sonra elde edilmeye başlanacağı için inşaat süresi de belirleyici bir etkidir. İnşaat süresinin uzaması tesisin açılmasını geciktireceği için beklenen gelirden mahrum kalacaktır. Ayrıca inşaatın yürütüldüğü sırada şantiyenin temizlenmesi, aydınlatılması, güvenliği, işçilerin beslenmesi, barındırılması gibi masraflar da ortaya çıkacaktır. İnşaat süresi ile alakalı maliyetleri ve inşaat maliyetleri toplamını en aza indirmeyi amaçlayan problem zaman-maliyet ödünleşim problemi olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen iki problemde birbirleri ile çakışan kısımlar bulunmaktadır. KKİPP’de personel giderlerini en aza indirmek için personel sayılarında kısıtlar bulunurken ZMÖP’te personel veya iş makinesi giderleri süre kısalmasından elde edilecek kazanımlardan daha az arttığı durumda personel ve iş makinesi sayıları artırılarak aktivite süresi kısaltılmaktadır. Bu çalışmada her iki problem birlikte ele alınarak kaynaklar üzerine kısıtlar tanımlanmış ve inşaat süresinin aşırı uzayıp işin gecikmesi sonucu tesisten elde edilecek gelirden mahrum kalmamak için kaynak kısıtlarının gevşetilebileceği kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuştur.

Zaman maliyet ödünleşim ile çok modlu kaynak kısıtlı iş problemlerini oluşturmak plancılara önemli miktarda iş yükü getirmektedir. Bu nedenle uygulamada her iki problem de iş yükünü azaltmak için yüzeysel olarak ele alınmaktadır. Vaka analizinde de görüleceği üzere bu çalışmada metraj verilerini kullanarak adam.saat ve malzeme gereksinimi hesaplayıp aktivitelerin başlangıç zamanına göre ekip sayısı ve iş verimini dikkate alarak aktivitenin bitiş zamanını hesaplayan bütünsel bir yaklaşım getirilmiştir. Bu sayede optimizasyon sürecinde aktivitelere atanan süre değerlerine göre inşaat süresi hesaplanmış ve kaynak kısıtlarının ihlalleri varsa belirlenip amaç fonksiyonu hesaplanmıştır. Böylece ZMÖP ve KKİPP birlikte detaylı biçimde analiz edilerek inşaattan elde edilecek fayda ve işçi kısıtlarının aşım maliyetleri birlikte ele alınmış ve detaylı bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur.

Literatürde KKİPP iş günü temel alınarak oluşturulmaktadır. Fakat şantiye genel giderleri ve tesisten elde edilecek kira geliri iş gününün yanı sıra tatil günlerinde de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca mevsimsel etkenlerden dolayı aşırı sıcak ve soğuk havalar nedeniyle ve inşaatın yer seviyesinden yükselmesi sonucu iş veriminde düşüşlerin gözlemlendiği literatür taramasında belirlenmiştir. İş veriminin az olduğu mekânda ve günlerde kalabalık ekipler oluşturmak hatalı sonuçlar verecektir. Çünkü literatürdeki problemler her zaman personel veriminin sabit kaldığını kabul etmektedir. Belirtilen kabul ile verimin düşük olduğu dönemlerde yüksek sayıda personelle çalışmak aynı maliyet artışına neden olacaktır fakat gerçek durumda verimin yüksek olduğu dönemdekine eş miktarda süre kısalması sağlamayacaktır. Belirtilen olumsuzluğu gidermek için inşaatın yürütülmesi sırasında uzun yıllar meteorolojik değerlerin ortalaması dikkate alınarak hava durumu simüle edilerek Eşitlik 11 ve 12 uygulanarak çalışma verimi hesaplanmıştır.

Problemin tanımlanması için inşaatın fırsat maliyeti ve genel giderleri toplamının 15.000 TL/gün olduğu kabul edilmiştir. İnşaatla aynı anda en fazla 40 işçinin çalışabileceği ve bu kısıtı aşmanın günlük maliyetinin aşılma işçi başına 1000 TL olacağı varsayılmıştır. Aktivitelerin 1 ile 13 gün arasında tamamlanabileceği kabul edilmiş ve belirlenen değerler dikkate alınarak kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuştur.

İş programının en iyi duruma getirilmesi sürecinde su yalıtım membranı, geri dolgu, kaba inşaat, iç duvar, dış duvar, iç sıva, dış sıva, tesisat, iç cephe boyası, dış cephe boyası ve 5 adet yer kaplaması işleri olmak üzere toplam 12 aktivitenin süresi girdi parametresi olarak tayin edilmiştir. İş paketlerine atanabilecek süreler 1 ile 13 gün arasında belirlenmiştir. Bu durumda $13^{12} = 2,33 \cdot 10^{13}$ adet farklı iş programı kombinasyonu ortaya çıkacaktır. İnşaatın süresi hesaplanırken doğrusal iş programı uygulanarak arama uzayının büyüklüğü önemli ölçüde daraltılmıştır. Kritik Yol Yöntemi iş çizelgelemesinde çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Fakat yüksek katlı bina inşaatlarında çok sayıda aktivitenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada 10 adet aktivite optimizasyon sürecine dahil edilirken KYY ile iş programı oluşturulsaydı aktivite sayısı 300'e çıkacaktı. Her katta aktivite sürelerinin değişebileceği kabulü yerine doğrusal iş programı ile her katta aktivitelerin kesintisiz ve aynı ekiple yürütüleceği kabulü ile optimizasyon sürecinde bina üst yapısı ile ilgili parametre sayısı 10 ile sınırlandırılarak problemin arama uzayı önemli ölçüde daraltılarak optimum veya yakın-optimum sonuç alma olasılığı artırılmıştır.

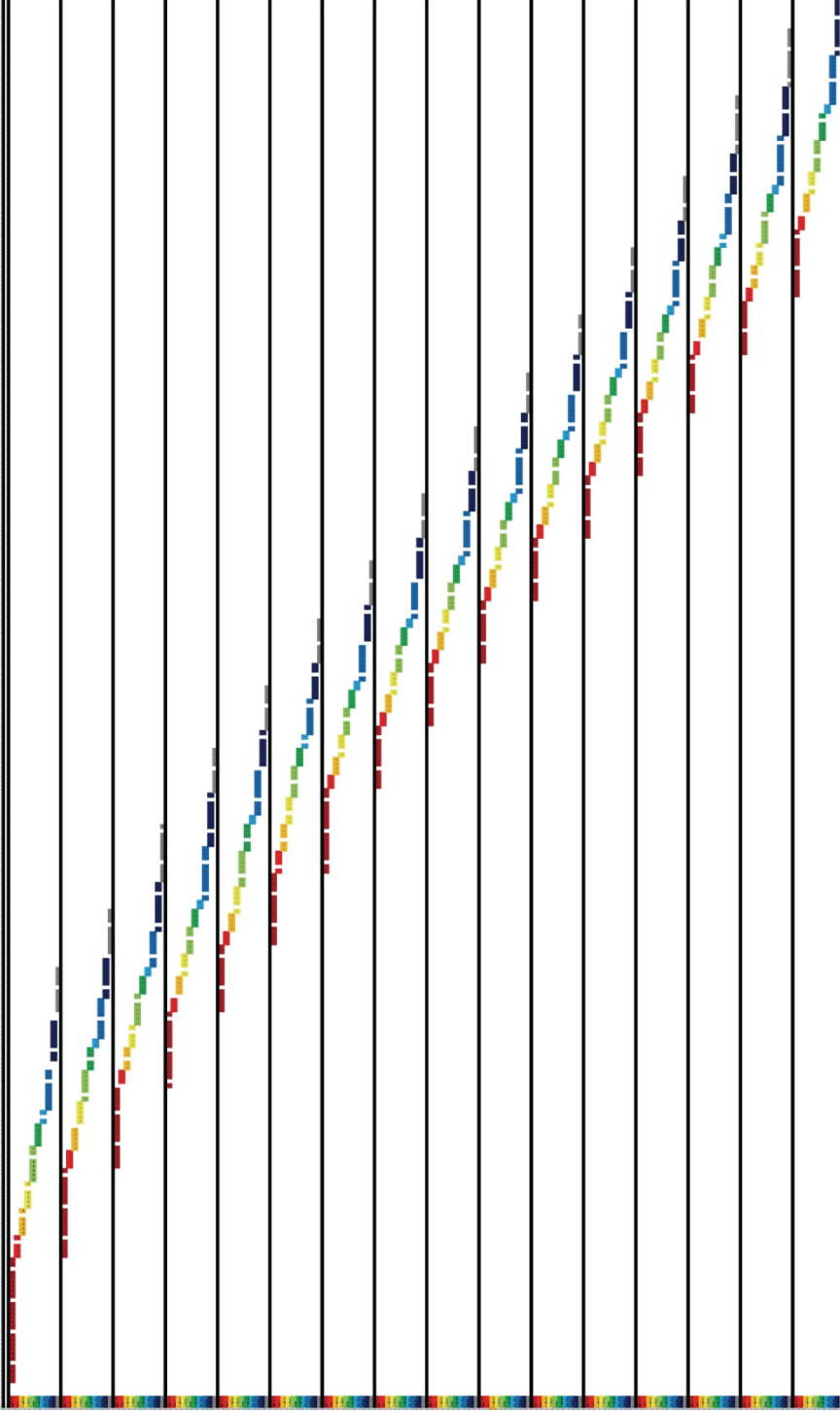
Doğrusal iş programı uygulanarak iş kalemleri için kurulan ekiplerin tüm katlarda değişmeden aynı işçi sayısı ile devam ettiği kabul edilmiştir. Bu kabul uygulamada yer bulmaktadır ve çok zorunlu haller dışında ekipler sabit kalmamaktadır. Doğrusal iş programının uygulanmasına rağmen aktivitelerin tatil günlerinin farklı olması, aktivitelerin iş verimlerinin farklı oranlarda etkilenmesi ve iş miktarlarının her katta aynı olmaması nedenlerinden dolayı ardıl aktiviteler öncel aktivitelere üst katlarda yetişebilmektedir. Eşitlik 7 ve 8 ile Şekil 2 ve 3'te ifade edildiği üzere ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetiştiği durumda ardıl aktiviteye ara verilmesi hiç ara verilmeden işin yürütülebileceği duruma göre başlangıç zamanının tayin edilmesine göre işin daha erken tamamlanabilmesini sağlamaktadır. Aktivitelerin iş veriminin sabit olmaması ve her katta aynı işin yapılmaması nedeniyle çakışma olmayacak şekilde aktivite başlangıç zamanlarının belirlenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle ara katlarda aktivitelerin başlayabilmesi için ilgili aktivitenin bir alt katta tamamlanması ve aktivite öncelinin aynı katta tamamlanmış olması koşullarının sağlanması

yeterlidir. Bir alt katta aktivite tamamlanmış fakat aynı kattaki öncel aktivite tamamlanmamış ise ilgili aktiviteye ara verilerek doğrusal iş programı yönteminden ayrışılmaktadır.

Vaka çalışmasının Malatya ilinde gerçekleştirileceği varsayılarak Tablo 6'da sunulan Malatya ilinin meteorolojik verileri girilerek inşaat süresince gerçekleşmesi beklenen çalışma verimleri Eşitlik 11 ve 12 ile hesaplanmıştır. Aktivitenin yürütülmesi sırasında gerçekleşen verim aktivitenin yerden yüksekliğine de bağlı olacağı için yükseklikten kaynaklı verim değişimi Eşitlik 13 ile hesaplanmıştır. Buna ek olarak Ramazan ayında işçilerin oruç tutması durumunda oluşabilecek verim kaybının dikkate alınması Eşitlik 14'te sunulan denklemlerle gerçekleştirilir. Belirtilen aktivite süreleri ile verim dikkate alınmadan 915 iş gününde, taşeronların tatil günleri dikkate alınarak hazırlanan iş çizelgesine göre ise 1016 takvim gününde tamamlanan inşaat, mevsimsel etkilerin ve çalışma yüksekliğinin dikkate alınması ile 1320 takvim gününde tamamlandığı hesaplanmıştır.

Tanımlanan veriler ile Eşitlik 9-30 uygulanarak optimize edilmiş biçimde takvimli iş programı elde edilir. Geliştirilen uygulama takvimli iş programını Gantt şeması biçiminde Şekil 7'de gösterildiği gibi sunmaktadır. Şekil 7'deki şemada bordo renk duvar, kırmızı renk tesisat, turuncu renk iç cephe sıvası, sarı renk yer döşemesi, açık yeşil renk doğrama, koyu yeşil renk iç cephe kaplaması, açık mavi renk dış cephe iskelesi kurulumu, mavi renk ısı yalıtım mantolaması, koyu mavi renk dış cephe sıvası ve gri renk dış cephe boyası işlerini ifade etmektedir. Şemanın x eksenini takvim gününü, y eksenini ise imalatların hangi katta yürütüldüğünü belirtmektedir. Birinci kat y ekseninin en üstünde temsil edilmektedir ve y ekseninde aşağı inildikçe kat sayısı artmaktadır. Aktivitelerin tatil gününe denk geldiği takvim günlerinde aktivitenin temsil edildiği kısım renklendirilmemiştir. Şekil 7 incelendiğinde ekiplerin tatil günlerine denk gelen günlerde aktiviteleri gösteren çizgilerin kesildiği görülecektir. Bu şekilde çalışılan ve çalışılmayan günler şema üzerinde kolaylıkla belirlenebilecektir.

Şekil 8'de Şekil 7'de sunulan Gantt şemasının 1. Kat için büyültülmüş hali sunulmaktadır. Aktivitelerin tatil günleri Şekil 8'de daha net görülmektedir. İnce iş grubunda ilk başlayan iş birinci katın duvar işidir. İşin sürdürüldüğü zamanı temsil eden hücrelerin içinde yazan değer Eşitlik 11-14 uygulanarak hesaplanan çalışma verimidir. Çalışma verim değerlerinin toplamı iş günü biriminde aktivite süresine eşit olduğu durumda aktivite tamamlanmış olacaktır. Şekil 8'de duvar işinin son gününde verim değeri Eşitlik 15 ile hesaplanan aktivitenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken iş günü birimindeki iş miktarını ifade etmektedir. Son gün duvar işi mesai bitiminden önce tamamlanacağı için son gün 0,210 birim günde gerçekleştirilebilecek miktarda iş yapılacaktır. Duvar iş kaleminin süresi 10 iş günü olarak belirlenmesine rağmen tatil günleri ve iş veriminin mevsimsel etkilere bağlı olarak azalabilmesinden dolayı duvar işi 28 takvim günü süreceği tahmin edilmiştir. Sekizinci katta ise mevsim koşulları daha elverişli olduğu için 14 takvim gününde duvar işi tamamlanabilmektedir. Bu çalışmada uygulanan çalışma verimi tahmin denklemleri R^2 değeri 0.64 olan polinomlardır. Belirtilen değer oluşturulan denklemin deneyler esnasında yapılan çalışma verimi ölçümleri sonucu elde edilen veri setindeki varyasyonun %64'ünü ifade edebilmektedir. Bir başka deyişle çalışma verimindeki değişimin tamamını kapsayamadığını ifade etmektedir. Bu nedenle takvimli iş programı ile elde edilen tamamlanma zamanları tam doğru değerler olmayabilir. Gantt şemasına ek olarak Eşitlik 16 ve 17 uygulanarak şantiyede günlük harcanan malzeme miktarı, Eşitlik 18 ve 19 uygulanarak şantiyede çalışan günlük personel sayıları hesaplanmaktadır.



Şekil 7 - Çalışma takvimi, hava koşulları ve çalışma yükünlüğü dikkate alınarak oluşturulan Gantt şeması

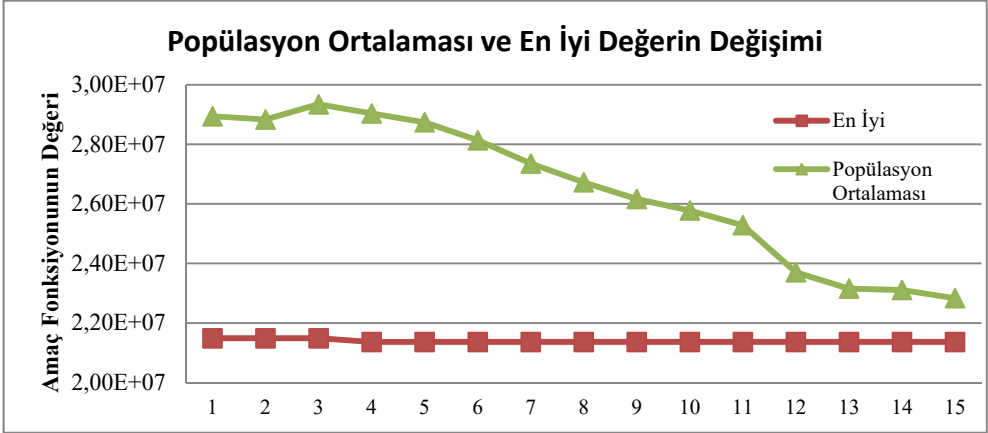
İnşa edilen imalatın çalışma verimi inşaat süresince farklılaşsa da işi yürüten ekiplerin aynı büyüklükte kaldığı, aktivitenin süresinin uzadığı kabulü ile günlük çalışan personel sayıları belirlenmiştir. Personele ödenecek ücret ise yapılan sözleşme ile tarif edilmektedir. Götürü bedel bir sözleşme imzalanmışsa sözleşmedeki bedel üzerinden gerçekleştirilen işin yüzdesi karşılığında ödeme yapılır. Çalışan personel sabit ücret karşılığı istihdam edilmişse takvimli iş programında oluşan aktivite süresi temel alınarak ödenecek tutar hesaplanır. Aktivitenin gerçekleştirilmesi için kullanılması gereken malzeme miktarı Eşitlik 16 ile hesaplanmaktadır. Kullanılan malzeme miktarı işin gerçekleştirilme hızı ile orantılı biçimde değişmektedir. Duvar işi için tuğla, su, kum, çimento, kum ve sönmüş kirecin kullanılması gereklidir. O gün içinde kullanılacak malzeme miktarı, tüm işin gerçekleştirilmesi için gereken miktarın çalışma verimi ile çarpılıp aktivitenin iş günü birimindeki süresine bölünmesi ile elde edilir. Çimento duvar işinin dışında yer döşemesi, sıva işlerinde de kullanılmaktadır. Aynı gün içerisinde farklı katlarda aynı malzemeye ihtiyaç duyan işlerin yürütülmesi durumunda günlük kullanılan malzeme miktarı Eşitlik 17 ile hesaplanır. Poz tariflerinde malzemenin bir miktar zayı olabileceği göz önüne alınarak gereken malzeme miktarı belirtildiği için günlük harcanan malzeme miktarına zayıatlar da dâhildir. Duvar işi ile ilgili ilk sekiz takvim gününün malzeme kullanım detayı Tablo 5'te sunulmuştur.

Eşitlik 20-25 uygulanarak inşaat süresince oluşan nakit akışı hesaplanmaktadır. Eşitlik 28'de sunulan amaç fonksiyonunun minimum değerini elde etmek için optimizasyon süreci başlatılır. Kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulurken P_{mak} ve TS parametreleri sırasıyla en fazla 40 işçinin aynı anda şantiyede çalışmasına izin verildiği ve işe 01.07.2017 tarihinde başlanıp 01.05.2019'da işin tamamlanması taahhüt edilecek şekilde sözleşme imzalandığı varsayılmıştır.

Tablo 5 - Duvar işi için günlük malzeme kullanımı

Tarih	31.1.18	1.2.18	1.2.18	2.2.18	2.2.18	3.2.18	3.2.18	4.2.18	4.2.18
Çalışma Verimi	0,383	0,428	0,428	0,428	0	0,428	0,428	0,428	0,428
Tuğla (adet)	191	213	213	213	0	213	213	213	213
Su (m3)	0,103	0,115	0,115	0,115	0	0,115	0,115	0,115	0,115
Kum (m3)	0,117	0,131	0,131	0,131	0	0,131	0,131	0,131	0,131
Çimento (ton)	0,029	0,033	0,033	0,033	0	0,033	0,033	0,033	0,033
Sön Kir ton	0,009	0,010	0,010	0,010	0	0,010	0,010	0,010	0,010

Problem tanımlanırken PC ve GC parametreleri için sırası ile 1.000 ve 15.000 değerleri atanmıştır. TBGA ile 15 yinleme yapılmış ve Şekil 9'da gösterilen yakınsama grafiği $2,33 \cdot 10^{13}$ adet çözüm arasından 1190 deneme yapılarak elde edilmiştir. Kısıt ihlalleri azaltılarak başlangıç çözümüne göre oldukça önemli iyileşme sağlanmıştır. Küçük ve orta ölçekli bir müteahhidin deneme yanılma ile süre ve kaynak üzerinde kısıtlar bulunan iş programını düşük maliyetli bir sonuç sunacak şekilde çözebilmesi oldukça düşük bir olasılık olduğu göz önüne alındığında geliştirilen uygulamanın müteahhitler için faydalı olma potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 9 - TBGA ile gerçekleştirilen optimizasyon sürecinin yakınsama grafiği

Nakit akışı diyagramını hazırlayan, çalışacak personel sayılarını hesaplayan ve takvimli iş programını oluşturan birçok ticari yazılım bulunmaktadır, fakat hiçbir ticari yazılım mevsimsel etkileri dikkate almamaktadır. Mevcut ticari yazılımlar iş programı oluştururken hava koşullarından dolayı iş veriminin değişebileceğini göz ardı etmekte ve iş verimini her ortamda sabit kabul etmektedirler. Bu çalışmada önerilen yöntemi uygulamak için Dubai, Malatya, Moskova ve Londra şehirlerinin yıllık ortalama iklim verileri derlenerek Tablo 6’da sunulmuştur. Belirtilen veriler geliştirilen uygulamaya girilerek Tablo 7’de sunulan değerler elde edilmiştir.

Tablo 6 - Mevsimsel koşulların inşaat süresine etkisini simülasyonla ölçmek için toplanan meteorolojik veriler

Şehir	Parametre	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A
Dubai	Sıcaklık °F	75	78	84	93	101	104	106	106	101	95	87	78
	Rüzgar mph	8,6	9,1	9,2	8,6	8,5	8,1	7,7	7,6	7,1	7	7,4	7,9
	Bağıl nem	65	65	63	55	53	58	55	58	60	60	62	65
Malatya	Sıcaklık °F	39	43	53	64	74	85	92	92	83	69	53	42
	Rüzgar mph	6	6,5	6,8	6,6	6,5	8	8,6	7,7	6,6	5,7	5,6	5,6
	Bağıl nem	77	73	63	53	47	39	35	32	34	44	54	70
Moskova	Sıcaklık °F	24	25	36	51	65	71	75	70	59	46	33	26
	Rüzgar mph	11,9	11,7	10,8	9,8	9,3	8,6	8	8,5	9,5	10,5	11	11,7
	Bağıl nem	84	82	77	67	66	72	75	77	81	83	86	85
Londra	Sıcaklık °F	47	48	52	58	63	69	73	72	67	60	53	49
	Rüzgar mph	13,1	12,6	12,1	11	10,5	9,9	9,8	9,9	10,6	11,5	11,8	12,5
	Bağıl nem	82	79	75	63	64	64	66	63	74	79	83	84

Tablo 6’da yer alan veriler weatherspark.com, worldweatheronline.com ve weather-and-climate.com web sayfalarından elde edilmiştir.

Tablo 7 - Aynı inşaatın aynı sayıdaki personelle farklı coğrafi konumlarda yapılmasının tamamlanma süresine etkisi

Konum	Başlangıç	Bitiş	Süre
Dubai	01.07.2016	02.04.2020	1371
Malatya	01.07.2016	11.02.2020	1320
Moskova	01.07.2016	15.10.2020	1568
Londra	01.07.2016	19.04.2020	1388

Tablo 7’de sunulan süreler hava koşulları ve çalışma yüksekliği dikkate alınarak elde edilmiştir. Tedarikçilerin teslimatları düzenli yapması, işçi hakları ve sendikalarla olan ilişkiler, denetçilerin imalatları denetleme konusundaki katılımı, inşaat bölgesinde uygulanan çevre kanunları gibi etkenler inşaat süresini etkileyecektir. Belirtilen etkenler çalışmanın kapsamı dışında olduğu için analize dâhil edilmemiştir. İnşaat süresinde gözlenen değişim Eşitlik 11-14’te hesaplanan iş veriminden kaynaklanmaktadır ve mevsim koşulları ile çalışma yüksekliğinin inşaat süresine etkisini göz önüne sunmaktadır. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan Primavera ve MS Project yazılımları mevsim koşullarını dikkate almadığı için 4 şehir için aynı inşaat süresini sunacaktır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada çok katlı bina inşaatlarının metraj hesaplaması, kaynak ihtiyacının belirlenmesi, kaynak tahsisinin yapılması, iş programının hazırlanması ve nakit akış diyagramının oluşturulması adımları formülleştirilerek en az insan emeği ile gerçekleştirilmesini sağlayan bir süreç geliştirilmiş ve hesap tablosu uygulaması olarak programlanmıştır. Tüm metraj kalemleri bina boyutları ve geometrisine göre formülleştirilerek hesaplanmıştır. Bu sayede bina boyutlarının değiştirilmesi sonucu sadece ilgili veri hücrelerindeki verinin güncellenmesi ile metraj değerleri tekrar hesaplanmakta ve nakit akış diyagramının oluşturulmasına kadar uzanan süreçteki tüm aşamalar hiçbir insan müdahalesi olmadan tekrar hesaplanmaktadır.

Geliştirilen uygulamada doğrusal iş programının seçilme nedeni optimizasyon sürecine dahil olacak parametre sayısının düşürülmesidir. Doğrusal iş programı birbirini tekrar eden işlerden oluşan çok katlı bina inşaatları için oldukça uygun bir iş çizelgeleme yöntemidir. Doğrusal iş programında her aktivitenin inşası için oluşturulan ekiplerin en alt kattan en üst kata kadar ekip büyüklüğü değişmeden çalıştığı kabul edilmiştir. Bu sayede parametre sayısı sadece yürütülmekte olan iş kalemi sayısına eşit olmakta ve optimizasyon süreci kolaylaşmaktadır. Kritik yol yönteminde ise kaynak kısıtlı iş programı ve zaman maliyet ödünleşim problemlerinin çözümünde her aktivite için aktivite süresi ve aktivitenin ertelenme süresi veya aktivite önceliği atanması gerekmektedir. Bu durumda parametre sayısı örnek problem olarak çözülen 30 katlı bir binada 300’ü geçebilmektedir. Doğrusal iş

programında ise optimize edilecek değişkenler iş kalemlerinin bir kat için iş günü birimindeki süreleridir.

İş makinelerinin ve dönemsel olarak bazı personel sınıflarının temininde zorluklar görülebilir. Bu durumda iş programının temin edilebilen kaynak sayısına göre oluşturulması gereklidir. Bu nedenle iş programı hazırlanırken temin edilebilen iş makinesi sayısına göre aktivite süreleri belirlenmektedir. Aktivitenin ihtiyaç duyduğu diğer kaynaklar ise tamamlanma süresi göz önüne alınarak tahsis edilmiştir. Bu sayede temin edilebilen kaynak miktarına göre en kısa sürede proje tamamlanabilecek ve en az sayıda kaynak boşa kalacak şekilde iş programı oluşturulabilecektir.

İnşaat süresi boyunca personelin birim zamanda yaptığı iş miktarı sabit kalmamakta, mevsim şartlarına ve mekâna göre değişiklik göstermektedir. Hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve bina kat sayısının iş verimi üzerindeki etkisi literatür çalışması ile derlenmiş ve formüle edilmiştir. İnşaatın yürütülmesi sırasında mevsimsel ve kültürel etkilerin, bayram ve resmi tatillerin, taşeronların çalışma günlerinin de dikkate alınabileceği bir iş programı oluşturularak inşaatın kaç iş günü ve kaç takvim gününde tamamlanacağı hesaplanmıştır. Bu sayede farklı çalışma takvimleri ve iş başlangıç tarihleri denenerek senaryo analizleri yapılabilecek ve taşeronların önerebileceği farklı çalışma günlerinin iş programını nasıl etkileyeceği kolaylıkla belirlenebilecektir. İnşaatın gerçekleştirileceği ilin meteoroloji verilerinin girilmesi ile takvimli iş programında ay boyunca aktivitelerin hangi verimde yürütüleceği tahmin edilmektedir. Personel verimlerinin hesaplanması literatürde kabul gören Koehn ve Brown tarafından önerilen formüllerle gerçekleştirilmiştir [29]. İş verimi dikkate alınarak farklı kentlerde inşaatın simüle edilmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 7’de sunulmuştur. İş veriminin inşaatın ilerlemesi boyunca değişiminin dikkate alınması mevcut ticari proje yönetim yazılımlarının hiçbirinde bulunmamaktadır. Bu çalışmada uygulanan verim hesaplaması literatürde gerçekleştirilmiş iş verimi çalışmalarının derlenmesi ile elde edilen verim hesaplamalarına dayanmaktadır. Rüzgâr, bağıl nem, sıcaklık ve çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisi literatürde yer alan denklemler kullanılarak modellenmiştir. İşçilerin fizyolojik ve psikolojik durumları iş verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca haftalarca aşırı sıcak veya soğuk koşulda bulunulması durumunda insan metabolizması koşullara adapte olarak verim kaybının bir kısmını telafi edebilmektedir. İş verimini çalışılan mekândaki işçi yoğunluğu, mekânsal çakışma, yapılan işin karmaşıklığı, tekrar eden iş sayısı, şantiye yöneticileri ile saha personeli arasındaki iletişim, işçi sendikası ile işveren arasındaki uyum gibi birçok etken etkilemektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen iş verimi hesaplamalarının iş verimini etkileyen tüm etkenleri dikkate almadığını belirtmek gerekir.

ZMÖP ve KKİPP literatürde yaygın olarak incelenen bir problem türüdür. Endüstri sektörü fabrika ortamında çalıştığı için işçi verimlerini tüm zamanlar için sabit alabilmektedir. Fakat, sabit personel verimi inşaat sektörüne uygun bir yaklaşım değildir. Bu çalışmada inşaat süreci boyunca hesaplanan günlük personel ve iş makineleri kullanımı KKİPP için gerekli verileri oluşturmuş ve genel giderlerin toplam maliyete eklenmesi ile ZMÖP tanımlanmıştır. Mevsimsel koşulların dikkate alınması ile ZMÖP ve KKİPP inşaat sektörü için literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandığında daha gerçekçi biçimde oluşturulmuştur.

İnşaat sektörü yaygın olarak iş programlarını MS Project ve Primavera yazılımlarını kullanarak hazırlamaktadır. Belirtilen yazılımlar hava koşullarının ve çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisini tamamen ihmal ederek iş programını hazırladığı için plancılar teklif süresini belirlerken sezgisel olarak ilave süre eklemektedir. Önerilen yaklaşımla teklif süresi

için iş verimi kaybından dolayı süre eklenmesine gerek kalmamaktadır. Toklu ve Bettemir tarafından yapılan karşılaştırmalarda Primavera ve MS Project yazılımlarının KKİPP'yi optimum çözümden çok uzak biçimde çözdüğünü göstermiştir [58, 61]. Bu çalışmada GA'nın yakınsama yeteneğini önemli ölçüde iyileştiren tavlama benzetimi ile hibritleştirilmesi ile oluşturulan TBGA kullanılarak optimum veya yakın-optimum çözümlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Gerçeğe daha yakın iş programı oluşturması ve daha yetkin bir optimizasyon algoritmasına sahip olması geliştirilen uygulamanın mevcut ticari yazılımlara karşı üstünlükleridir. Çalışmada sunulan yaklaşım şantiye yerleşim planlamasını ihmal etmektedir. Belirtilen planlama dolaylı giderlerin düşürülmesine önemli katkılar sağlamaktadır [62]. Ayrıca iş kazalarının önlenmesine yönelik hata ağacı analizi optimizasyon sürecine dahil edilerek iş kazalarının önlenmesi veya azaltılmasına yardımcı olabilir [63]. İleri çalışma olarak şantiye yerleşim planlamasının ve iş kazalarının gerçekleşmesine yönelik risk analizlerinin de optimizasyon sürecine dahil edilip geliştirilen yöntemle eklenmesi mevcut ticari yazılımlara göre daha geniş özellikli olmasını sağlayacaktır.

İş programının oluşturulması ile aktivitelerin yürütülmesi için kullanılacak malzeme miktarları tüm malzeme kalemleri için günlük hesaplanmaktadır. Bu sayede şantiyede stok takibinin yapılması oldukça kolaylaşmaktadır. Malzeme kullanımına ek olarak şantiyede günlük çalışan personel ve iş makinesi sayıları da hesaplanmaktadır. Malzeme, personel ve iş makinelerinin birim maliyetlerinin girilmesi ile gerçekleştirilen işlerin doğrudan maliyetleri hesaplanmakta ve nakit akış diyagramı oluşturulmaktadır. Geliştirilen hesaplama süreci ve yöntem sayesinde yüklenicinin mali durumuna göre inşaat hızının ayarlanması kolaylaşmaktadır. İnşaat süresinin uzun olması durumunda birim fiyatlardaki değişiklikler de dikkate alınmakta ve gerçek maliyet analizi yapılmaktadır.

Geliştirilen uygulama, tanımlanan veriler doğrultusunda metraj hazırlayıp, kaynak ve malzeme kullanım tahminlerinde bulunup iş programını oluşturmaktadır. Ayrıca inşaat süresince günlük kullanılan malzeme miktarları, çalışan personel ve gerçekleşen harcamalar hesaplanmaktadır. Bu sayede inşaat süresince oluşan kısıt aşımaları tespit edilip ZMÖP ve KKİPP optimizasyon sürecinin amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır. Metraj hesaplamaları kolonların boyutu ve konumunun değişmesi ile güncellenmektedir. Ayrıca yer döşemesi, duvar kaplaması gibi iş kalemlerinin de imalat cinsinin değiştirilmesi ile metraj değerleri insan müdahalesi olmadan yeniden hesaplanmakta ve benzer çalışmalara göre daha doğru sonuçlar sunmaktadır [64, 65]. Belirtilen özellik YBM yazılımlarının metraj hesaplama modüllerinde bulunmaktadır. Oluşturulan bütünsel hesaplama süreci görselleştirme içermeyen 5D YBM uygulamasına denk sayılabilir. Bu çalışmada uygulanan hesaplama yöntemini uygulayacak yükleniciler, YBM uygulaması önündeki en büyük engellerden biri olan YBM yazılımlarının ve hesaplama sürecinin karmaşıklığını bertaraf ederek YBM benzeri hesap süreci ile proje yönetimi uygulamalarında kendi verimlerini yükseltebileceklerdir. Fakat güncel YBM uygulamaları sadece inşaat aşamasını değil inşa edilen tesisin bakım ve işletme sürecini de içermektedir [66]. Ayrıca yeşil bina kriterlerinin gerçekleştirilme başarısı YBM yazılımları tarafından da incelenmektedir [67].

Geliştirilen uygulama optimizasyon sürecinde aktivitelere farklı süre değerleri atayarak iş programını en uygun hale getirmeyi amaçlamaktadır. Aktivite sürelerine göre atanması gereken personel sayıları ve iş programı uygulama tarafından yeniden hesaplanıp amaç fonksiyonunun değeri belirlenmektedir. Bu sayede hesap tablosu dışında hiçbir ek yazılıma

ihtiyaç duymadan iş programı optimize edilebilmiştir. Fakat, optimizasyon süreci 2,8 GHz i5 işlemcinin tek çekirdeğinde yaklaşık bir gün sürmüştür. Optimizasyon boyunca 1190 iş programının denenmesi hesap tablosu üzerinde yapıldığı için hesaplamalar uzun sürmektedir. Hesaplama süresi makul değildir fakat hesaplamaların tamamı C++ ile kodlanarak çalıştırılabilir dosya üzerinden yürütülmesi halinde analiz süresi önemli ölçüde kısaltılabilecektir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada bir bina inşaatının iş programı ekiplerin tatil günlerine, hava koşulları ve çalışma yüksekliğine bağlı olarak oluşturulmuştur. Ekonomik nedenler, iş güvenliği ve pandemi koşulları gereği ekip sayıları ve şantiyede çalışan toplam işçi sayısı üzerinde kısıtlamalar bulunabilmektedir. Ayrıca genel giderler ve tesisin işletmesinden beklenen gelirler nedeniyle inşaat süresinin makul düzeyde olması gereklidir. Bu çalışmada kaynak kısıtlı iş programı ile zaman-maliyet ödünleşim probleminin çalışma verimini etkileyen mevsimsel koşullarla beraber ele alınarak çözülmesi sağlanmıştır. Kaynaklar üzerindeki kısıtların inşaat süresini en az etkilemesi ve toplam proje maliyetinin en aza indirilebilmesi için Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma ile aktivite süreleri optimize edilmiştir. Bu sayede mümkün olan en kısa sürede ve en ekonomik biçimde inşaatın tamamlanması sağlanabilecektir. Elde edilen iş programı mevsimsel ve mekânsal etkileri içermektedir. Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı mevcut yaklaşımlara kıyasla daha fazla etkeni dikkate alarak iş programını oluşturularak inşaat sektöründe görülebilecek inşaatın geç teslim edilmesi sonucu ödenebilecek tazminatların önüne geçilmesinde faydalı olabilecek bir yaklaşımın geliştirilmesidir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından “Yapı Bilgi Modeli Tabanlı İnşaat Planlaması Yazılımı Geliştirimi” başlıklı FYL-2020-2052 kod numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] AbouRizk, S.M., Babey, G.M. Karumanasseri, G., Estimating the cost of capital projects: An empirical study of accuracy levels for municipal government projects, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.29, 653-661, 2002.
- [2] Dikmen, S. Ü., Özek S., Deprem bölgelerinde zemin sınıfının sanayi yapılarının maliyetine etkisi. Teknik Dergi, 22(108), 5543-5558, 2011.
- [3] Ilter, O., Celik, T., Investigation of organizational and regional perceptions on the changes in construction projects. Teknik Dergi, 32(6), 11257-11286, 2021.
- [4] Kocaman, E., Kuru, M., Çalış, G., İhale usulü ve sözleşme türünün yapım işi sözleşme bedeline etkisinin incelenmesi. Teknik Dergi, 31(1), 9789-9812, 2020.

- [5] Koç, K., Gurgun, A.P., Causal Relationships of Readability Risks in Construction Contracts. *Teknik Dergi*, 33(2), 2021.
- [6] Kuru, M., Çalış, G., İnşaat Projelerinde Kalite Performansını Etkileyen Faktörler: Türkiye’de Bir Alan Çalışması. *Teknik Dergi*, 33(6), 2022.
- [7] Ayhan M., Dikmen I., Birgonul M.T., Comparing performanes of machine learning techniques to forecast dispute resolutions. *Teknik Dergi*, 2022.
- [8] Demirdöğen, G., Işık, Z., Structural equation model of the factors affecting construction industry innovation success. *Teknik Dergi*, 32(2), 10717-10738, 2021.
- [9] Karaman, A.E., Sandal, K., Effect of Sub-Contractor Selection on Construction Project Success in Turkey. *Teknik Dergi*, 33(4), 12105 – 12118, 2022.
- [10] Budayan, C., Celik, T., Determination of Important Building Construction Adverse Impacts Creating Nuisances in Residential Areas on Neighbouring Community. *Teknik Dergi*, 32(2), 10611-10628, 2021.
- [11] Okudan, O., Budayan, C., Arayıcı, Y., Identification and Prioritization of Key Performance Indicators for the Construction Smal and Medium Enterprises, *Teknik Dergi*, 33(5), 2022.
- [12] Olsen, D., Taylor, J. M., Quantity Take-Off Using Building Information Modeling (BIM), and Its Limiting Factors. *Procedia Engineering*, 196, 1098-1105, 2017.
- [13] Monteiro, A., Martins, J.P., A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design. *Automation in Construction*, 35, 238-253, 2013.
- [14] Lee, S.K., Kim, K.R., Yu, J.H., BIM and ontology-based approach for building cost estimation, *Automation in Construction*, 41, 96-105, 2014.
- [15] Aram, S., Eastman, C., Sacks, R., A knowledge-based framework for quantity takeoff and cost estimation in the AEC industry using BIM, In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 31, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2014, January.
- [16] Choi, J., Kim, H., Kim, I., Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(1), 16-25, 2015.
- [17] Bettemir, Ö.H., Development of spreadsheet based quantity take-off and cost estimation application. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation* 1(3), 108-117, 2018.
- [18] Khosakitchalert, C., Yabuki, N., Fukuda, T., Automated modification of compound elements for accurate BIM-based quantity takeoff. *Automation in Construction*, 113, 103142, 2020.
- [19] Ergen, F., Bettemir, Ö.H., Development of BIM software with quantity take-off and visualization capabilities. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation* 5(1), 1-14, 10.31462/jcemi.2022.01001014, 2022.

- [20] Sepasgozar, S.M., Karimi, R., Shirowzhan, S., Mojtahedi, M., Ebrahimzadeh, S., McCarthy, D., Delay causes and emerging digital tools: A novel model of delay analysis, including integrated project delivery and PMBOK. *Buildings*, 9(9), 191, 2019.
- [21] Larsson, R., Rudberg, M., Impact of Weather Conditions on In Situ Concrete Wall Operations Using a Simulation-Based Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(7), 05019009, 2019.
- [22] Maqsoom, A., Choudhry, R.M., Umer, M., Mehmood, T., Influencing factors indicating time delay in construction projects: Impact of firm size and experience. *International Journal of Construction Management*, 1-12, 2019.
- [23] Hurlimann, A.C., Warren-Myers, G., Browne, G.R., Is the Australian construction industry prepared for climate change? *Building and Environment*, 153, 128-137, 2019.
- [24] Russo, J.A., The economic impact of weather on the construction industry of the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 47(12), 967-972, 1966.
- [25] Smith, G.R., Hancher, D.E., Estimating precipitation impacts for scheduling, *Journal of Construction Engineering and Management*, 115(4), 552-566, 1989.
- [26] Li, S., New approach for optimization of overall construction schedule, *Journal of construction engineering and management*, 122(1), 7-13, 1996.
- [27] Apipattanavis, S., Sabol, K., Molenaar, K.R., Rajagopalan, B., Xi, Y., Blackard, B., Patil, S., Integrated framework for quantifying and predicting weather-related highway construction delays, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(11), 1160-1168, 2010.
- [28] Shan, Y., Goodrum, P.M., Integration of building information modeling and critical path method schedules to simulate the impact of temperature and humidity at the project level, *Buildings*, 4(3), 295-319, 2014.
- [29] Koehn, E., Brown, G., Climatic effects on construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 111(2), 129-137, 1985.
- [30] Jung, M., Park, M., Lee, H.S., Kim, H., Weather-delay simulation model based on vertical weather profile for high-rise building construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(6), 04016007, 2016.
- [31] Sönmez, M., Dikmen, S.Ü., Akbıyıklı, R., Time-cost relationships for superstructure projects in Turkey. *Teknik Dergi*, 31(2), 9869-9896, 2020.
- [32] Ahbab, C., Daneshvar, S., Celik, T., Cost and time management efficiency assessment for large road projects using data envelopment analysis. *Teknik Dergi*, 30(2), 8937-8959, 2019.
- [33] Wang, T., Abdallah, M., Clevenger, C., Monghasemi, S., Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2019.
- [34] Liu, S.S., Wang, C.J., Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow. *Automation in Construction*, Vol. 17, No. 8, pp. 966-974, DOI: 10.1016/j.autcon.2008.04.006, 2008.

- [35] Banihashemi, S.A., Khalilzadeh, M., Time-cost-quality-environmental impact trade-off resource-constrained Project scheduling problem with DEA approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [36] Abdel-Basset, M., Ali, M., Atef, A., Uncertainty assessments of linear time-cost tradeoffs using neutrosophic set. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106286, 2020.
- [37] Toğan, V., Eirgash, M.A., Time-Cost Trade-Off Optimization with a New Initial Population Approach. *Teknik Dergi*, 30(6), 9561-9580, 2018.
- [38] Eirgash, M.A., Toğan, V., Dede, T., A multi-objective decision making model based on TLBO for the time-cost trade-off problems. *Structural Engineering and Mechanics*, 71(2), 139-151, 2019.
- [39] Bettemir, Ö.H., Birgönül, M.T., Network Analysis Algorithm for the Solution of Discrete Time-Cost Trade-off Problem. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (2017) 21(4):1047-1058, 2016. DOI 10.1007/s12205-016-1615-x.
- [40] Zhu, L., Lin, J., Wang, Z.J., A discrete oppositional multi-verse optimization algorithm for multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 85, 105805, 2019.
- [41] Lin, J., Zhu, L., Gao, K., A genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 140, 112915, 2020.
- [42] Pellerin, R., Perrier, N., Berthaut, F., A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 280(2), 395-416, 2020.
- [43] Birjandi, A., Mousavi, S.M., Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in Construction*, 100, 84-102, 2019.
- [44] Laszczyk, M., Myszkowski, P.B., Improved selection in evolutionary multi-objective optimization of multi-skill resource-constrained project scheduling problem. *Information Sciences*, 481, 412-431, 2019.
- [45] Chakraborty, R.K., Abbasi, A., Ryan, M.J., Multi-mode resource-constrained project scheduling using modified variable neighborhood search heuristic. *International Transactions in Operational Research*, 27(1), 138-167, 2020.
- [46] Tirkolaee, E.B., Goli, A., Hematian, M., Sangaiah, A.K., Han, T., Multi-objective multi-mode resource constrained project scheduling problem using Pareto-based algorithms. *Computing*, 101(6), 547-570, 2019.
- [47] Creemers, S., The preemptive stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 277(1), 238-247, 2019.
- [48] Arab, H.G., Rayeni, A.M., Ghasemi, M.R., An effective improved multi-objective evolutionary algorithm (IMOEA) for solving constraint civil engineering optimization problems. *Teknik Dergi*, 32(2), 10645-10674, 2020.

- [49] Erzurum, T., Bettemir, Ö.H., Kaynak Dengeleme Probleminin Arama Uzayını Paralel Programlama ile Tarayarak Kesin Çözümü, *Teknik Dergi*, 32(3): 10767 – 10805, 2021.
- [50] Lotfi, R., Yadegari, Z., Hosseini, S.H., Khameneh, A.H., Tirkolae, E.B., Weber, G.W., A robust time-cost-quality-energy-environment trade-off with resource-constrained in project management: A case study for a bridge construction project. *Journal of industrial & management optimization*, 18(1), 375, 2022.
- [51] Sharma, K., Trivedi, M.K., Latin hypercube sampling-based NSGA-III optimization model for multimode resource constrained time–cost–quality–safety trade-off in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 1-11, 2020.
- [52] Taheri Amiri, M.J., Haghghi, F., Eshtheadian, E., Abessi, O., Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), 3738-3752, 2018.
- [53] Albayrak, G., Novel hybrid method in time–cost trade-off for resource-constrained construction projects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(4), 1295-1307, 2020.
- [54] Banihashemi, S.A., Khalilzadeh, M., Time-cost-quality-environmental impact trade-off resource-constrained project scheduling problem with DEA approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [55] Kannimuthu, M., Raphael, B., Palaneeswaran, E., Kuppuswamy, A., Optimizing time, cost and quality in multi-mode resource-constrained project scheduling. *Built Environment Project and Asset Management*, 2019.
- [56] Heravi, G., Moridi, S., Resource-constrained time-cost tradeoff for repetitive construction projects. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(8), 3265-3274, 2019.
- [57] Al Alawi, M.K., Modeling, investigating, and quantification of the hot weather effects on construction projects in Oman. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 17(2), 89-99, 2020.
- [58] Bettemir, Ö.H., Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristic algorithms, PhD Thesis, METU, Ankara, Türkiye, 2009.
- [59] Miriam, A.J., Saminathan, R., Chakaravathi, S., Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-III) for effective resource allocation in cloud. *Evolutionary Intelligence*, 1-7, 2020.
- [60] Hwang, S.F. He, R.S., Improving Real-Parameter Genetic Algorithm with Simulated Annealing for Engineering Problems. *Adv. Eng. Softw.*, 37(6), 406 – 418, 2006.
- [61] Toklu, Y.C., Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(3), 421-429, 2002.
- [62] Oral, M., Bazaati, S., Aydinli, S., Oral, E., Construction site layout planning: Application of multi-objective particle swarm optimization. *Teknik Dergi*, 29(6), 8691-8713, 2018.

- [63] Gökçe, Ş., Zorluer İ., İnşaat Sektöründeki İş kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi. *Teknik Dergi*, 33(6), 2022.
- [64] Bettemir, Ö.H., Gündüz, E., Akkurt, O., Hilal, E., Arslan, M.A., İnşaat işlerinin iş programına bağlı nakit akışı değişkenliğinin saptanması ve düzenlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 211-223, 2019.
- [65] Bettemir, Ö.H, Yücel, T., Zaman maliyet ödünleşim probleminin en az insan müdahalesi ile oluşturulup çözülmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 461-480, 2021.
- [66] Halmetoja, E., Lepkova N., Utilising Building Information Models in Facility Maintenance and Operations *Teknik Dergi*, 2022.
- [67] Gürgün, A.P., Koç, K., Atabay, Ş., Yapı bilgi modellemesi kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projeleri üzerine etkileri. *Teknik Dergi*, 33(3), 11857-11886, 2022.