

ZAMAN MALİYET ÖDÜNLEŞİM PROBLEMİNİN EN AZ İNSAN MÜDAHALESİ İLE OLUŞTURULUP ÇÖZÜLMESİ

Önder Halis BETTEMİR *^{ID}
Tugay YÜCEL *^{ID}

Alınma: 27.01.2021 ; düzeltme: 25.04.2021 ; kabul: 02.07.2021

Öz: Bu çalışmada, en düşük toplam proje maliyetli iş programı oluşturmayı amaçlayan zaman maliyet ödünleşim problemine küçük ölçekli yüklenicilerin de uygulayabileceği çözüm yöntemleri aranmıştır. İş programını insan müdahalesine ihtiyaç duymayacak şekilde oluşturan bir hesap tablosu geliştirilmiş ve her aktivite için veri girişi ve revizyonların hızlı bir şekilde yapılması sağlanmıştır. Böylece planlama ve inşaat aşamasında ortaya çıkabilecek öngörülme durumlarının olumsuz etkileri ve başka projeler için tekrarlanan hesaplamalar azaltılmıştır. Bu çalışmada çözülen iki farklı senaryodaki zaman maliyet ödünleşim problemleri için hesap tablosu uygulamasında yazılan makro üzerinde çalıştırılan Genetik Algoritma ile optimizasyon yapılmıştır. En düşük proje maliyet değeri ve yapım alternatifleri kayıt altına alınmıştır. Alternatifler arasındaki en düşük proje maliyeti ile işin gerçekleştirilmesini sağlayan iş programı oluşturulup planlama mühendislerinin iş yükü önemli ölçüde azaltılmıştır. Hesap tablosu uygulamasını kullanacak yüklenicilerin maliyette kayda değer bir iyileşme elde ederek net kârlarını en üst düzeye çıkarmaları amaçlanmıştır. Sadece yapım yönetimi profesyonellerinin kullandığı proje yönetimi yazılımlarının yanı sıra bu çalışmada oluşturulan hesap tablosu uygulaması sağladığı kullanım kolaylığı ve en düşük toplam proje maliyeti ile sektör içerisindeki tüm aktörlere rekabet avantajı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Zaman Maliyet Ödünleşim Problemi, Doğrusal İş Programı, Optimizasyon

Formation and Solution of Time Cost Problem with Minimum Human Involvement

Abstract: In this study, solutions that can be implemented by small-scale contractors are searched for the time-cost trade-off problem which aims to create a work schedule with minimum total project cost. A spreadsheet that creates the work schedule in a way that does not require human intervention has been developed and quick data entry and revision opportunity is provided for each activity. Thus, the adverse consequences of unforeseen situations that may arise during the planning and construction stages and repeated calculations for other projects have been reduced. In this study two different scenarios of the time-cost trade-off problems are solved by Genetic Algorithm running on the macro written for the spreadsheet application and the lowest total project cost and construction alternatives are provided. The workload of planning engineers is reduced significantly by creating a schedule that enables the construction to be carried out with the lowest total project cost. It is aimed that the contractors who use the spreadsheet application would maximize their net profits by achieving a significant reduction in cost. Contrary to the project management software used only by construction management professionals, the ease of use of the spreadsheet application and the provided minimum total project cost offer competitive advantage to all actors in the sector.

Keywords: Genetic Algorithm, Time Cost Trade-Off, Line of Balance, Optimization

* İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 44280 Malatya
İletişim Yazarı: Önder Halis Bettemir (onder.bettemir@inonu.edu.tr)

1. GİRİŞ

İnşaat işlerinin doğası gereği aktivitelerin tamamlanma süresi ve doğrudan maliyetleri arasında ters ilişki (korelasyon) bulunmaktadır. Aktivite süresinin kısaltılması normal süresinde tamamlanmasına kıyasla daha fazla işgücü, daha büyük veya daha çok sayıda iş makinesi atanması veya fazla mesai yaptırılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca normal uygulamaya göre daha yüksek maliyetli fakat daha kısa sürede işin tamamlanmasını sağlayan yapım yöntemleri de tercih edilerek doğrudan maliyetlerde bir miktar artış ile aktivite süreleri kısaltılabilir. Ahşap kalıp sistemleri yerine tünel kalıp ve kule vinç sistemlerinin kullanılması, elektroliz ile zemin konsolidasyonunun hızlandırılması gibi geleneksel yöntemlere göre daha yüksek maliyetli fakat daha kısa süreli yapım yöntemleri bu duruma örnek gösterilebilir. Bir aktivitenin normal süresinden daha önce tamamlanması, aktivitenin doğrudan maliyetini oluşturan yapım maliyetinin artışı sonucu gerçekleşebilir. Süresi kısaltılan aktivite kritik yol üzerinde bulunuyorsa projenin toplam süresi kısaltılabilir.

Aktivitelerin hızlandırılması, inşaat projesinin doğrudan maliyetlerini artırmakta fakat inşaat süresini kısaltacağı için güvenlik, temizlik, aydınlatma vb. maliyetlerin oluşturduğu dolaylı maliyetleri azaltmaktadır. Yapım süresinin kısaltılmasıyla birlikte doğrudan maliyetlerdeki artış, dolaylı maliyetlerdeki azalış ve bitirme süresinden önce tamamlanan işten elde edilecek kazanımlar arasında ödünleşme yapılması gerekmektedir. En düşük toplam proje maliyetinin elde edilmesini sağlayan tamamlama süresinin belirlenmesi literatürde zaman-maliyet ödünleşim problemi (ZMÖP) olarak adlandırılır. ZMÖP'ün optimum çözümü inşaatın doğrudan ve dolaylı maliyetleri toplamı olan toplam proje maliyetinin en düşük değerini sunan iş programının oluşturulmasını sağladığı için oldukça önemli bir optimizasyon problemidir.

Kelley ve Walker (1959), Fulkerson (1961) ile Kelley (1961) tarafından geliştirilen proje analiz teknikleriyle birlikte ZMÖP önem kazanmaya başlamıştır. Barber ve Boardman (1988) ile Chiu ve Chiu (2005), doğrusal maliyet eğrileriyle ZMÖP çözümü için sezgisel algoritmalar önermişlerdir. Belirtilen algoritmalar sürekli fonksiyon biçiminde oluşturulan hızlandırma fonksiyonları için optimum çözüm sağlamakta ancak doğrusal olmayan veya kesikli hızlandırma alternatifleri için global optimuma yakınsamayı garanti etmemektedir. Ayrıca sezgisel algoritmalar belirli işlem adımlarını sırayla uygulayarak çözüm aramakta ve oluşturulan işlem sıralamasına uygun olan problemleri çözebilmektedir. Bu nedenle ele alınan problemlerden bazılarında iyi sonuçlar elde edilirken bazılarında yeterli iyileşme elde edilememektedir. Bunun sonucunda sezgisel yöntemlerin dışında üst sezgisel yöntemler de ZMÖP'ün çözümünde kullanılmıştır. Hegazy ve Ersahin (2001); ZMÖ analizi, sınırlı kaynak, kaynak dengeleme ve nakit akış yöntemiyle entegre bir zamanlama modeli önermişlerdir. Moussourakis ve Haksever (2004), kaynak kısıtlamaları ve değişmez proje bitiş tarihi ile oluşturulan ZMÖP'ü çözmüşlerdir. Chassiakos ve Sakellariopoulos (2005), ZMÖP'ü çözmek için erken/geç proje tamamlanmasına ödül/ceza veren doğrusal ve tam sayılı bir programlama modeli önermişlerdir. Chen ve Weng (2009), kaynakların kesintiye uğradığı ve çakıştığı kaynak kısıtlı durumu çözmek için zaman-maliyet ödünleşimine dayanan bir genetik algoritma önermişlerdir. Senouci ve El-Rayes (2009), iş programı ve verimli inşaat kaynağı kullanımı oluşturmak ve değerlendirmek için çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunmuşlardır. Kurulan model eş zamanlı olarak zamanı minimize ederken proje kârını en üst düzeye çıkartmaktadır. Ammar (2011), minimum proje maliyeti için ZMÖ modeli kurup nakit akışın net bugünkü değerini hesaplamıştır.

Meta-sezgisel algoritmalar arasından ZMÖP'ün çözümü için ilk kullanılan yöntemlerden birisi genetik algoritmadır. Kandil ve El-Rayes (2006) ile Lee vd. (2010) çözümlerinde GA kullanmışlardır. Kasaeian vd. (2007), elitist bir yaklaşımla geliştirilmiş çok amaçlı GA

kullanmışlardır. Hooshyar vd. (2008), problemin çözümü için akıllı mutasyon operatörlü bir algoritma sunmuştur. Sönmez ve Bettemir (2011), ZMÖP'ün çözümü için tavlama benzetimli genetik algoritma kullanmışlardır. Eshtehardian vd. (2009), GA'yı kesikli bulanık zaman-maliyet ödünleşim problemi için uyarlamışlardır. Bettemir (2009), genetik algoritma ve tavlama benzetimini birleştiren karma bir algoritma önermiştir. Önerilen karma algoritmayla genetik algoritma karşılaştırılmış ve tavlama benzetimli genetik algoritmanın (TBGA), genetik algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sakellaropoulos ve Chassiakos (2004), aktivite öncelik ilişkileri ve belirli aktiviteler için zaman kısıtlaması gibi gerçeğe yakın şartları dikkate alan ilave çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir. Ke vd. (2009), çalışmalarında rastlantısal (stokastik) ortamlarda zaman-maliyet ödünleşim probleminin çözümü için şans-kısıtlı ve bağımlı-şans programlamalarını esas alan iki yeni model önermişlerdir. Önerilen modelleri çözmek için stokastik benzetim ve genetik algoritmayı birleştiren karma akıllı bir algoritma oluşturmuşlardır. Ke (2011), kısmen rastgele değişkenler ve kısmen belirli değişkenlerin olduğu stokastik ZMÖ modeli oluşturmuş ve bu modelin çözümünü GA ile gerçekleştirmiştir. Jebaseeli ve Dhayabaran (2015), bulanık ZMÖP çözümü için toplam maliyeti minimize eden ve ZMÖP'ün çözümü için var olan yöntemlerden daha kolay bir algoritma sunmuşlardır. Bulanık doğrusal programlama problemini çok amaçlı doğrusal programlama problemine dönüştürmüşlerdir. Kang vd. (2015); aktiviteler arasındaki bütün ilişkilerin (FS, FF, SS, SF), uygulanabildiği ve aktiviteler arasındaki alternatif sıralamaları göz önüne alan yeni bir ZMÖ modeli geliştirmişlerdir. Bettemir (2009) oluşturduğu 63 aktiviteli örnek problemin tam çözümünü elde etmiştir.

Bettemir ve Birgönül (2016), kesikli ZMÖP'ün çözümü için minimum maliyet eğrisinden esinlenerek şebeke analizi algoritması önermişlerdir. Önerilen şebeke analizi algoritması, arama alanı büyük olsa da uygunsuz seçenekleri ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle; şebeke analizi algoritmasının hesap yükü, üst sezgisel algoritmaların binde birinden daha az olmuştur. Zhang ve Thomas Ng (2012), karınca koloni optimizasyonu yöntemini kullanarak fazla hesap yükü yaratmadan çözüme ulaşmışlardır. Rahimi ve Iranmanesh (2008), kesikli zaman-maliyet kalite ödünleşimi problemini parçacık sürü optimizasyonu ile çözmüşlerdir. Yang (2007) ile Iranmanesh vd. (2008) parçacık sürü optimizasyonu, Anagnostopoulos ve Kotsikas (2010) tavlama benzetimi, Geem (2010) uyum aramasını ZMÖP'ü çözmek için kullanmışlardır. Cha ve Lee (2015), yapı bilgi modeli destekli ZMÖP'ü incelemişlerdir. Moghadam vd. (2020), ZMÖP'ü çok amaçlı yayılımcı rekabetçi optimizasyon ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu ile çözmüş ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunun daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Proje planlama sürecindeki ödünleşim, zaman ve maliyetle sınırlı değildir. Bu nedenle; ZMÖP'e kalite, çevre ve sınırlı kaynak kullanılabilirliği konuları da eklenerek incelenmiştir. Koo vd. (2015), çevresel etkiyi ortaya çıkarıp ZM-çevre ödünleşimini çözmüşlerdir. Zhang ve Xing (2010), Mungle vd. (2013) ile Tavana vd. (2014) ZMÖP'e kaliteyi ekleyip ZM-kalite ödünleşimini çözmüşlerdir. Kim vd. (2012), hızlandırılan aktiviteler için potansiyel kalite kaybını dikkate alan karışık tam sayılı doğrusal programlama önermişlerdir. Monghasemi vd. (2015); zaman, maliyet ve kalite ölçütlerine dayanan her zamanlama alternatifini araştırarak, proje zamanlamasına verimli bir etki sağladığını kanıtlamışlardır. Tareghian ve Taheri (2007), ZM-kalite ödünleşimini dağınık elektromanyetizma algoritması ile çözmüştür. Yalın ZMÖP sınırsız kaynak kullanılabilirliği varsayılarak çözümlenir. Liu ve Wang (2008), Afruzi vd. (2014), Rostami vd. (2014) ile Cheng ve Tran (2016) kaynak kısıtlı ZMÖP'ü çözmüşlerdir. Bettemir (2009) ile Ghoddousi vd. (2013); çok modlu kaynak kısıtlı iş programı problemini, kesikli ZMÖP'ü, kaynak kısıtlı iş programı ve kaynak dengeleme problemlerini aynı anda ele almışlardır. Al-Shihabi vd. (2020), tam sayılı doğrusal programlama kullanarak ZMÖP'e kredi limiti parametresini ekleyerek çözmüşlerdir.

Abdel-basset vd. (2020), nötrosofik sayıları aktivite sürelerini tahmin etmek için kullanarak belirsiz çevre koşulları altında proje maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan planlama problemini ele almak için bir çerçeve tasarlamışlardır. Albayrak (2020), ZMÖ'yü çözmek için PSO ve GA'ya dayalı yeni bir hibrit algoritma önermiştir. Algoritmaların hem güçlü hem de zayıf özelliklerini dikkate alarak standart PSO içine GA operatörleri yerleştirerek, çeşitlilik ve araştırma yeteneği artırılmıştır. Banihashemi ve Khalilzadeh (2020), kırsal su temini inşaat projesinde zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki ödünleşim problemi optimizasyonu için farklı yapım modlarında, proje aktivite verimliliğini paralel veri zarflama analizi (DEA) yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Liu vd. (2020); en düşük maliyetle taahhüt edilen sürede projeyi bitirme probleminin (DCOP) çözümünü, ekosistemdeki organizmalar arasında simbiyotik etkileşimi taklit eden ve kesikli simbiyotik organizma araması (DSOS) olarak adlandırılan simbiyotik organizma aramanın yeni bir türü ile gerçekleştirmişlerdir. Wang vd. (2019), zaman-maliyet-kalite (ZMK) proje hedefleri arasındaki ödünleşimi baskın olmayan sıralamalı NSGA II kullanarak çözmüştür. Zandebasiri vd. (2019), program değerlendirme ve gözden geçirme tekniğini (PERT) kullanarak orman azalışı kontrol projesindeki (CFDP) bir aktivite dizisi tanımlama, planlama ve işletme maliyetlerini artırıp aktiviteleri hızlandırarak proje süresinin nasıl azalacağı bağlamında kritik yol yöntemini uygulamışlardır.

Literatür taraması, ZMÖP'ün oldukça yaygın olarak araştırmacılar tarafından incelendiğini göstermektedir. ZMÖP'ün tanımlanması aktiviteler için normal yapım alternatifinin dışında hızlandırılmış sürelerin belirlenip, belirlenen süreler için gereken kaynak ihtiyacının hesaplanarak maliyet analizlerinin yapılmasını gerektirmektedir. Uygulama kısmında ise ZMÖP'ün en büyük zorluklarından birisi sıkışık zamanda belirtilen maliyet analizlerinin yapılarak farklı yapım süre ve maliyetlerinin oluşturulmasıdır. Planlamacıların iş yoğunluğu göz önüne alındığında ZMÖP tanımlanırken gerçekleştirilebilecek tüm alternatiflerin analizi yapılmadan birkaç alternatif için denemeler yapıp sonuca etki edebilecek yapım alternatifleri ihmal edilebilmektedir. Bu çalışmada, yapım alternatiflerinin oluşturulmasını en az insan müdahalesi ile gerçekleştiren bir uygulama geliştirilmiştir. Hesap tablosu üzerinde çalışan uygulamanın insan müdahalesinden mümkün olduğunca bağımsız olarak otomatikleştirilmesi, hızlı bir şekilde sonuçların alınmasını sağlamaktadır. Değişen kat sayısı, aks uzunlukları, perde kalınlığı, donatı sayısı, sıklaştırma aralığı vb. verilerin sisteme girilmesiyle metraj otomatik olarak hesaplanmakta ve metrajla ilişkilendirilen iş paketinin kaynak ve malzeme gereksinim verileri kullanılarak, işin gerçekleştirilmesi için gerek duyulan kaynak ve malzeme ihtiyacı belirlenmektedir. Yapım sürecinde ekiplerin kalabalıklaştırılması, fazla mesai yaptırılması veya farklı yöntem uygulanması alternatiflerinin geliştirilen uygulama tarafından hazırlanıp her alternatifin hesaplanan aktivite sürelerine göre iş programının insan müdahalesi olmadan oluşturulması planlama aşamasında birçok yapım alternatifinin denenebilmesine olanak sağlayabilecektir. Küçük ve orta ölçekli işlere yoğunlaşan müteahhitler için kullanılabilirliği kolay hesap tablosu uygulamasıyla hazırlanan veya güncellenen bir sistemin varlığı, yapım işlerinde yüklenicilere maliyet düşüşleri sağlayacağı düşünülerek belirtilen uygulama geliştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde GA'dan daha başarılı meta-sezgisel algoritmalar bulunmaktadır, fakat GA optimum sonuca erişemese de yakın optimuma erişerek tatmin edici sonuçlar sunabilmektedir. Ayrıca optimizasyon sürecinde uygulanan operatörlerin işlevlerinin optimizasyon deneyimi başlangıç düzeyinde olan uygulayıcıların kavrayabileceği basitlikte olması nedeniyle bu çalışmada GA uygulanmıştır.

Makalenin takip eden bölümünde ZMÖP için yapım alternatiflerinin nasıl oluşturulduğu açıklanmakta ve ZMÖP'ü çözen GA'nın hesap tablosu üzerinde nasıl kodlandığı ve algoritma parametrelerinin nasıl belirlendiği açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde vaka analizi yapılarak önerilen yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiş ve son bölümde yöntemin sağladığı faydalar ve eksik yönleri tartışılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, konut veya rezidans türündeki tipik bir binanın yapısal ve mimari elemanlarının sisteme tanıtılması ile metrajını çıkarıp kaynak ihtiyacını hesaplayıp iş programını hazırlayan, farklı yapım süreleri ve maliyet verilerini hesaplayıp ayırık zaman maliyet ödünleşim problemini oluşturan ve çözen bir sistem geliştirildi. Problem konusu yapım işinin metraj değerleri hesaplanırken kullanılan veriler; Aks uzunlukları, kolon ve kiriş boyutları, perde kalınlığı, döşeme derinliği, donatı boyutları ve aralıkları, etriye bilgileri, duvar kalınlıkları ve kapı-pencere boyutları gibi yapısal ve mimari elemanların boyutlarını ifade eden değerler tanımlanmıştır. Örneğin kat yüksekliği '*KatYukse*', kiriş derinlik mesafesi '*KirisDerin*', üst katlar için pas payı '*UstPP*' değişken adıyla tanımlanmıştır. Tüm metraj hesaplamaları formüleleştirilmiş ve formüllerin girdi parametreleri değişken olmaktadır. Metraj, belirtilen şekilde tanımlanan Tablo 1'de gösterilen parametrelerin hesap tablosunun ilgili hücrelere girilmesi ile oluşturulmuştur. Böylece tasarımda yapılan değişikliklerin sisteme tanımlanması ile işlem adımlarının tamamı otomatik olarak güncellenecektir. Değişen veriler karşısında metraj hesabının otomatik olarak yenilenmesi, insan emeği ile gerçekleştirilen tekrar hesaplamalarını önleyip zaman kayıplarını engellemektedir.

Tablo 1. Metrajda kullanılan veri listesi

Proje Genel Verileri			Kiriş Boyuna Donatı			Kapı-Pencere-Duvar Verileri		
A Aks Uzunluğu	700	Cm	Kiriş Montaj	2	adet Ø12	Giriş Kapısı Eni	300	cm
B Aks Uzunluğu	650	Cm				Giriş Kapısı Yüksekliği	230	cm
C Aks Uzunluğu	600	Cm	Düz Donatı Aralığı	30	cm			
D Aks Uzunluğu	550	Cm	Pilye Donatı Aralığı	30	cm	Pencere 1 Eni	400	cm
E Aks Uzunluğu	625	Cm				Pencere 1 Yüksekliği	160	cm
Dilatasyon	10	Cm	Ø8	0,395		Pencere 1 Kasa Kalınlığı	12	cm
			Ø10	0,617		Pencere 2 Eni	50	cm
Beton Hesabı İçin			Ø12	0,888		Pencere 2 Yüksekliği	50	cm
Kolon Eni	70	Cm	Ø14	1,208		Pencere 2 Kasa Kalınlığı	7	cm
Kolon Boyu	70	Cm	Ø16	1,578				
Dilatasyon Kolon Eni	35	Cm	Ø18	1,998		Lento Yüksekliği	20	cm
Dilatasyon Kolon	70	Cm						
Kat Yüksekliği	300	Cm	Mesnet Sıklığı	10	cm	Dış Duvar Kalınlığı	25	cm
Kiriş Derinliği	70	Cm	Sıklaştırma Sıklığı	8	cm	İç Duvar Kalınlığı	15	cm
Kiriş Eni	30	Cm	Orta Açıklık Sıklığı	12	cm			
Perde Kalınlığı	30	Cm	Kanca Boyu	20	cm	Ofis Kapı Yüksekliği	210	cm
Döşeme Derinliği	16	Cm	Bodrum kolon Etriye	288	cm	Ofis Kapı Genişliği	100	cm
Yangın Kapı	210	Cm	Boyuna Donatı sayısı	24	Adet	Ofis Kapı Kasa Kalınlığı	3	cm
Yangın Kapı Genişliği	110	Cm				Ofis Kapı Kanat Genişliği	12	cm
Asansör Eni	200	Cm	Kiriş Sıklaştırma Aralık	10	cm			
Asansör Boyu	400	Cm	Kiriş Serbest Aralık	20	cm	Tuvalet Yüksekliği	230	cm
Asansör Perde	20	Cm	Kiriş Gövde+Mont	4	Adet Ø14	Tuvalet Uzunluğu	200	cm
			Kiriş Boyuna Donatı	4	Adet Ø18	Tuvalet Duvar Kalınlığı	10	cm
Donatı Hesabı İçin			Kiriş Etriye Kanca Boyu	15	cm	Tuvalet Sayısı	6	adet
Bodrum Paspayı	4	Cm	Bodrum Kiriş Etriye	198	cm	Tuvalet Kapı Eni	90	cm
Üst Katlar	3	Cm				Tuvalet Kapı Yüksekliği	210	cm
Kolon Boyuna Donatı	24	Ø16	Üstkat kolon Etriye Boyu	296	cm	Tuvalet Kapı Kasa Kalınlığı	2	cm
Filiz Boyu	110	Cm	Üstkat Kiriş Etriye Boyu	206	cm			
Etriye Sıklaştırması	6	Cm				Kılıcına Duvar Kalınlığı	10	cm
Orta Açıklık Etriye	12	Cm	Perde X yönü Aralığı	20	cm			
Etriye Çapı	8	Mm	Perde Y yönü Aralığı	30	cm	Süpürgelik Yüksekliği	8	cm
			Perde Dikey Filiz Boyu	60	cm			
			Perde Yatay Filiz Boyu	52,5	cm			

Kolon, kiriş, perde ve döşeme betonlarının metrajı, ilgili taşıyıcı yapının veriler tabından alınan değerler kullanılarak hesaplanmıştır. Boyutları aynı olan yapısal elemanlar için benzer adedi ile çarpılarak beton miktarı hesaplanmıştır (Yücel, 2019 (sayfa 15-17)). Kalıp alanı metrajı yapıldıktan sonra; kolona komşu olan kiriş ve döşeme alanları, kirişe komşu olan döşeme alanları, döşeme alanının kolon izdüşümü ile kesiştiği alanlar ve perdeler komşu döşeme derinliğinden oluşan ortak alanlar minha edilmiştir (Yücel, 2019 (sayfa 17-19)). Donatı metrajında kolon için; etriye aralığı, etriye sıklaştırma uzunluğuna göre otomatik belirlenen etriye sayıları ve projedeki boyuna donatı sayıları çapına göre uygun birim ağırlıkla çarpılarak belirlenmiştir. Kiriş donatısı; etriye sayıları, yatay donatı uzunlukları ve montaj donatı uzunlukları çapına göre uygun birim ağırlıkla çarpılarak, döşeme donatısı ise düz ve pilye donatı sayıları ve uzunluklarının X ve Y doğrultusunda hesaplanması ile tamamlanmıştır (Yücel, 2019 (sayfa 19-22)). Duvar metrajı, dış ve iç duvar metrajından oluşmaktadır. Net dış duvar alanı, pencere ve lento alanları; net iç duvar alanı, kapı ve lento alanları minha edildikten sonra bulunmuştur (Yücel, 2019 (sayfa 22-23)). Sıva metrajı, dış ve iç sıva olarak ayrı hesaplanmıştır. Dış sıva alanı hesaplanırken en ve boy tek parça alınıp alan hesaplanmış ve sonrasında kapı ve pencere boşlukları minha edilip pencere kenarlarının sıvası eklenmiştir. İç sıvada, kat yüksekliği ve ilgili kısmın boyutları çarpılarak metraj hesaplanmıştır. Tavan iç sıvasında, kolon izdüşümleri minha edilerek sıva metrajı tamamlanmıştır (Yücel, 2019 (sayfa 23-25)). Parke ve seramik metrajında, ilgili yüzeyin en ve boy değerleri çarpılıp kolon izdüşümleri ve kapı eşiği alanı minha edilerek hesaplanmıştır. Farklı en, boy ve kapı eşiği değerleri olan yüzeyler için işlem tekrarlanmıştır (Yücel, 2019 (sayfa 25-26)). Tek kat için hesaplanan metraj değerleri, yapının kat sayısı ile çarpılarak toplam metraj değerleri hesaplanmıştır.

Bir katın metraj verilerinin, işçilik gereksinimlerinin ve inşaat süresinin tüm katlar için aynı alınması hesaplamaları ve yönetim sürecini kolaylaştıran bir kabullenme olduğu için uygulanmıştır. Bu kabulün yapılmasındaki en önemli amaç parametre sayısını azaltarak optimizasyon sürecinin kolaylaştırılmasıdır. Doğrusal iş programlaması tercih edilerek bina inşaatında yer alan kalıp, donatı, duvar, sıva, döşeme ve boya aktiviteleri tüm katlar için tek aktivite olarak gösterilebilmektedir. Her inşaat kalemi için elde edilen metraj değerleri, hesap tablosuna tanıtılarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan ilgili poz tarifleriyle eşleştirilmiştir. Bu sayede aktivitenin gerçekleştirilebilmesi için gereken malzeme miktarı ile adam.saat ve makine.saat biriminde işçilik ve iş makine ihtiyaçları hesaplanmıştır.

Hesaplanan adam.saat ve makine.saat değerlerine göre her aktivite için birinci problemde 4, ikinci problemde 5 yapım alternatifleri tanımlanarak ayrı ZMÖP oluşturulmuştur. Birinci alternatif için adam.saat değerleri, mevcut işçi sayısına bölünerek süre belirlenmiştir. Günlük çalışma süresi 8 saat kabul edilmiş ve normal çalışma süresi için kalıp işçisi 100 TL, demirci ustası 110 TL, duvarcı ustası 90 TL, laminant parke işçisi 105 TL, seramik ustası 105 TL, sıva işçisi 90 TL ve boya işçisinin 90 TL yevmiye ile çalışacağı kabul edilmiştir. Aktivitelere tayin edilen işçi sayılarının girilmesi ile aktivite süreleri hesaplanır. İşçilik giderleri işçi sayısı, aktivite süresi ve işçi yevmiyesi ile çarpılarak belirlenir. İkinci yapım alternatifleri, birinci alternatifte elde edilen ekip boyutu sabit tutulup, günlük 2 saat fazla mesai yaptırılarak oluşturulmuştur. Bu nedenle günlük çalışma süresi (GCS) yerine fazla mesai çalışma süresi (MCS) tanımlanmıştır. Fazladan çalışılan her saat için normal sürenin 1,5 katı çalışma ücreti verileceği için tüm işçi gruplarının günlük yevmiye ücretleri 1,375 ile çarpılmıştır. Fazla mesai ile çalışılması durumunda verim düşeceği için bu alternatifte toplam işçilik miktarı birinci alternatifte göre %10 arttırılmıştır. Üçüncü Alternatif, mevcut işçi sayısının birinci alternatifte göre %75 arttırılarak normal sürede çalışılması ile oluşturulmuştur. Bu alternatifte kalabalık ekipler olacağı için verim azalacaktır. Bu nedenle işçilik miktarı %25 arttırılmıştır. Dördüncü alternatif ise, 3. alternatifteki işçi sayısının sabit tutularak her gün 2 saat fazla mesai yapması

öngörülerek oluşturulmuştur. Artan işçi sayısı ile birlikte çalışma veriminin düşeceği göz önünde bulundurularak, adam.saat ve makine.saat değerleri birinci alternatife göre %35 arttırılmıştır. Beşinci alternatifte işçi sayısı dördüncü alternatife göre %35 arttırılmış ve fazla mesai yaptırılmıştır. Verim düşüşü göz önüne alınarak işçilik gereksinimi birinci alternatife göre %55 arttırılmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın poz tariflerinde gösterilen ilgili iş kaleminin bir biriminin yapımı için gerekli işçi ve makine saat değerleri, hesaplanan toplam metraj değeri ile çarpılarak işin tamamının yapımında gerekli adam.saat ve makine.saat miktarları belirlenmiştir. İlgili aktivitelerin tamamlanması için ihtiyaç duyulan soğuk demirci, duvarcı, seramik kaplama, sıvacı, boyacı ustaları ve düz işçinin adam.saat miktarları hesaplanmıştır. Kullanıcının her aktivite için tamamlanma sürelerini tanımlaması ile ihtiyaç duyulan kaynak miktarı Eşitlik 1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$K_j = \frac{AdamSaat_j}{GCS * t_j} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de K_j , j 'nci aktivite için gereken personel veya iş makinesi sayısını, $AdamSaat_j$ değeri, j 'nci aktivitenin tamamlanması için gereken kaynak kullanım miktarını, t_j , j 'nci aktivitenin planlamacı tarafından tanımlanan tamamlanma süresini ifade etmektedir. Eşitlik 1, kalıp işi için hesap tablosuna “=*YUKARIYUVARLA('AdamSaatMalzeme'!F15 /GunlukCalismaSuresi/SürelerEkipler!I16;0)*” ifadesi ile tanımlanmıştır. Belirtilen ifadede '*AdamSaatMalzeme'!F15* hücrelerinde aktivitenin tamamlanması için adam.saat biriminde marangoz ustasının kaç saat çalışmasının gerektiği, *GunlukCalismaSuresi* parametresi bir iş gününde kaç saat çalışıldığını ve *SürelerEkipler!I16* ise aktivite süresinin kullanıcı tarafından tanımlandığı hücreyi ifade etmektedir. Bina inşaatları her katta tekrarlanan aktivitelerden oluşmaktadır. Optimizasyon sürecinde parametre sayısını düşürmek için tekrar eden aktiviteler göz önüne alınarak doğrusal iş programı kullanılmıştır. Doğrusal iş programı kaba inşaat ve ince işler için iki aşamalı oluşturulmuştur. Donatı, kalıp, kalıp iskelesi, beton dökümü, kür ve kalıp sökme işleri için belirlenmiş süreler ve istenilen kat sayısı verilerine uygun olarak kaba işlerin doğrusal iş programı oluşturuldu. Bir aktivite grubunun başlama ve tamamlanma zamanının belirlenmesinde, ardıl ve öncel aktivitelerle aynı katta çalışılmamasına ve aktivitelerin yapımının kesintiye uğramadan gerçekleştirilmesi amaçlandı. Bu nedenle; bir aktivitenin başlangıç zamanı, öncel aktivitenin ilk katta tamamlanma süresine tampon süre eklenerek belirlenmektedir. Fakat, aktivite öncel aktiviteden daha hızlı yürütülüyorsa birkaç kat inşa edildikten sonra tampon süreyi eritip öncel aktiviteye yetişebilecektir. Bu durumu önlemek için aktivitenin son katta yapımına başlandığında öncel aktivitenin tamamlanmış ve tampon sürenin geçmiş olması gerekmektedir. Belirtilen koşulun sağlanması için aktivitenin başlama zamanı, öncel aktivitenin tamamlanma zamanına tampon süre eklenip binadaki kat sayısının bir eksiği ile aktivite süresinin çarpımının düşülmesiyle elde edilir. Aktivitenin başlangıç zamanının hesaplanması Eşitlik 2'de ifade edilmiştir.

$$Baş_j = MAK\left\{\left(Baş_{j\text{öncel}} + ts + ks * t_j\right), \left(Tam_{j\text{öncel}} + ts + (ks - 1) * t_j\right)\right\} \quad (2)$$

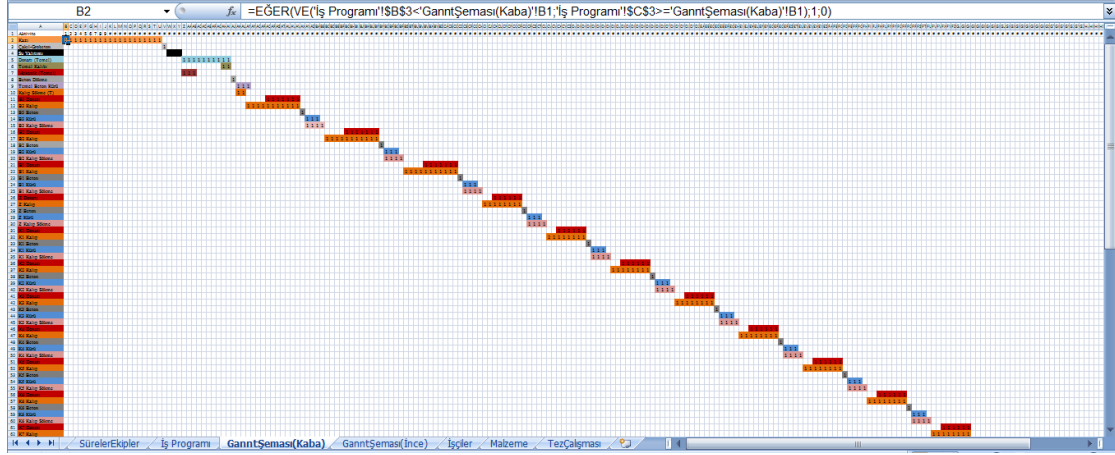
Eşitlik 2'de $Baş_j$ öncel ifadesi, j aktivitesinin öncelinin birinci kattaki başlama zamanını, ts , kullanıcı tarafından belirlenecek tampon süreyi, ks parametresi, binanın kaç katlı olduğunu, Tam_j öncel ifadesi ise j aktivitesinin öncelinin son kattaki tamamlanma zamanını belirtmektedir. Eşitlik 2, hesap tablosuna donatı aktivitesi için “=*MAK(C20;C14+'Aktivite Maliyet ve Süreleri'!C6)*” ifadesi ile tanımlanmıştır. İfadede; C20 hücresi, ilgili katın kalıp işi bitiş gününü, C14 ise bir önceki katın donatı işi bitiş gününü ifade etmektedir. Aynı yöntemle iç ve dış duvar, sıva, boya, parke ve seramik kaplama işlerinden oluşan ince işler için girilen aktivite süreleri karşılığında çalışması gereken işçi sayıları hesaplandı. İş programı oluşturulurken ekiplerin üst

katta çalışan başka bir ekibe yetişip onların yürütmekte oldukları işi bekleme ihtimalleri başlayınca başlar ve bitince biter koşulları tanımlanarak ortadan kaldırılmıştır.

Sıva iş kaleminin tahmini bitiş günü için; “ $Bit_{Sıva} = Mak(Bit_{İçDuvar}, Bit_{DışDuvar}) + Süre_{Sıva}$ ” formülü kullanıldı. Burada; $Süre_{Sıva}$, sıva aktivitesinin bir katının gerçekleştirilme süresini, $Bit_{İçDuvar}$, İç duvar aktivitesinin bitiş günü, $Bit_{DışDuvar}$, dış duvar aktivitesini bitiş gününü ifade etmektedir. Sıva işinin bitiş gününün hesaplanması, hesap tablosuna $=MAK(F8;F12)+Aktivite Maliyet ve Süreleri!C17$ formülü ile uygulandı. Burada ifade edilen hücrelerde $F8$, iç duvar işi bitiş günü, $F12$, dış duvar işi bitiş günü ve $C17$ ise tek kata yapılacak sıva işi için belirlenen süre verisini saklamaktadır. Formülde duvar işinin son katta tamamlanmasının ardından son katın bir alt katında sıva işi yeni başlayacaktır. Böylece sıva işinin duvar işinden sonra tamamlanması garanti edilmiştir. Fakat sıva işinin duvar işine göre daha yavaş ilerlemesi durumunda, bitiş zamanına göre yapılan planlamada sıva işi duvar işine göre daha erken başlaması gerekecektir. Bu durumda ilk katta duvar örülmeden sıva inşasına başlanmış olacaktır. Bu durumu önlemek için sıva ve duvar işlerinin başlangıç gününün kontrol edilmesi gerekir. Bunun için “ $Baş_{Sıva} = Maksimum(Bit_{Sıva} - KS * Süre_{Sıva}; Bit_{DışDuvar})$ ” ifadesi ile hesaplanmıştır. Hesap tablosunda; “ $=MAK(F14-KatS*Aktivite Maliyet ve Süreleri!C17;Yapım Süresi!N5)$ ” formülü ile sıva işinin başlama günü belirlenmektedir. Burada; $F14$ hücresi, sıva işinin tahmini bitiş süresini ifade etmektedir. Tahmini bitiş süresinden zemin kat ve üst kat sıva işleri tamamlanma süresinin çıkarılması ile başlangıç süresi elde edilir. Bu sürenin mutlaka dış duvarın ilk katının tamamlanma zamanından daha sonra olması gerekmektedir. Maksimum komutu ile iki durum arasında en zorlayıcı olanın seçilmesi kesinleşir ve Eşitlik 2 sıva işi için uygulanmış olur. Aktivitenin başlangıç zamanının belirlenmesi ile bitiş zamanı “ $Bit_{Sıva} = Baş_{Sıva} + KS * Süre_{Sıva}$ ” formülü ile belirlenir. Hesap tablosunda; “ $=F15+ KatS*Aktivite Maliyet ve Süreleri!C17$ ” formülü ile $F15$ başlangıç gününe zemin kat ve üst kat sıva işleri süresi eklenerek belirlenmiştir. Sonrasında planlaması yapılan yapım işinin kat sayısı ve süreler göre her kat için iş programı oluşturulur. Sıva örneğinde, zemin kat duvarı örüldükten sonra sıva işlemine başlangıç yapılması tercih edilmiştir. Sıvanın ardından boya, yer döşemesi ve doğrama işlemleri için aynı yöntemle başlangıç ve bitiş süreleri belirlenir. Kaba ve ince işler için Gantt şemaları, iş programlarının oluşturulmasının ardından hazırlanmıştır.

Gantt şemasında aktivitelerin gösterimi, aktivitenin başlangıç ve tamamlanma zamanları arasındaki sürenin işaretlenmesi ile gerçekleştirilir. Aktivitenin belirli bir günde yürütülüyor olması için aktivite başlangıç zamanının incelenen günden önce olması, aktivite tamamlanma zamanının ise incelenen günle aynı ya da daha sonra olması gerekmektedir. Belirtilen iki şart aynı anda sağlanıyorsa aktivite o gün yürütülüyor demektir. Belirtilen durumun hesap tablosuna kazı aktivitesi için tanımlanması; “ $Baş_{Kazı} < GN ve Bit_{Kazı} >= GN$ ” ile gerçekleştirilmiştir. Burada $Baş_{Kazı}$ ve $Bit_{Kazı}$, kazı aktivitesinin başlangıç ve bitiş günlerini, GN, iş günü biriminde gün numarasıdır. Bu şartların sağlandığı günlerde, Gantt şemasında ilgili aktivite için çalışma varlığından söz edilecektir. Formülünün hesap tablosunda uygulanması $=EGER(VE(İşProgramı!B3<'GanttŞeması(Kaba)!B1;İşProgramı!C3>='GanttŞeması (Kaba)!B1);1;0)$ formülüyle oluşturulmuştur. Formülde; B3, aktivitenin iş programına göre başlangıç gününü, C3, aktivitenin iş programına göre bitiş gününü ve B1 hücresi ise inşaatın hangi iş gününde olduğunu ifade etmektedir. İş programında aktivitelerin yürütüldüğü günler 1, yürütülmediği günler 0 ile gösterilmiştir. Daha sonra koşullu biçimlendirme yapılarak çalışmanın olduğu günler renklendirilmiştir. Şekil 1’de Gantt şeması görünümü gösterilmektedir. Doğrusal iş programı ile iş çizelgesinin oluşturulması iş programını basitleştirmek için tercih edilmiştir. Zemin + 15 kat olan binada bir kat için tanımlanan kalıp, donatı, duvar, tesisat, sıva ve boya işlerinin aynı işçi ekibi ve sürede diğer katlarda da sürdürüldüğü kabul edilmiştir. Böylece bütün katlar için her aktivite sadece bir parametre ile

tanımlanmış ve optimizasyon sürecine dâhil olan parametre sayısı önemli ölçüde düşürülerek arama uzayı daraltılmıştır.



Şekil 1:
Gantt şemasının oluşturulması

Tüm hesaplamalar hesap tablosu uygulaması üzerinde yapıldığı ve iş çizelgesi Gantt Şeması biçiminde görselleştirildiği için bir iş programı hesaplaması çalıştırılabilir dosya türündeki uygulamalara göre çok daha fazla hesaplama süresi gerektirmektedir. Bu nedenle arama uzayının daraltılarak optimizasyon sürecindeki iş programı hesaplama sayısının azaltılması amaçlanmaktadır. Hazırlanan iş programı genellikle mevcut koşullara en uygun iş programı olmayabilmektedir. Aktivite süreleri kendi aralarında uyumsuz olabilmekte veya elde edilen proje tamamlanma süresi en uygun süre olmayabilmektedir. ZMÖP'te istenilen doğrudan ve dolaylı maliyetlerin toplamını en aza indirmektir. Dolaylı maliyetler inşaat süresince değişkenlik gösterirler fakat problemin analizini kolaylaştırmak için ortalama bir günlük dolaylı maliyet değeri alınır ve inşaat süresince sabit kaldığı varsayılır. Belirtilen durumda, Eşitlik 3'te belirtilen amaç fonksiyonunun en düşük değeri aranır.

$$\min \sum_{i=0}^n (DM_{i,j}) + T * GDM \quad (3)$$

Eşitlik 3'te $DM_{i,j}$ i 'ncinci aktivite için atanmış j 'ncinci yapım alternatifinin doğrudan maliyetini ifade etmektedir. Aktiviteye hangi yapım alternatifi atanmışsa sadece atanan alternatifin yapım maliyeti eklenir. T , proje tamamlanma süresini, n , aktivite sayısını ve GDM ise günlük dolaylı maliyet değerini ifade etmektedir. Doğrusal iş programında sürekli yürütülen 19 aktivite için rastgele yapım seçenekleri, girilen normal süre değeri kullanılarak oluşturulmuştur. Şantiye için beklenen günlük genel gider tutarı, projenin erken teslimi sonucu alınabilecek ödül miktarı ve geç teslim edilmesi sonucu ödenecek ceza bedelleri tanımlanarak ZMÖP için gerekli veriler elde edilir. Bu çalışmada vaka analizi için tanımlanan örnek proje için zaman-maliyet değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Birinci problemde, her aktivitenin 4 farklı yapım seçeneği; ikinci problemde ise 5 farklı yapım seçeneği mevcuttur. Birinci ve ikinci problemlerde sırasıyla 274.877.906.944 ve 19.073.486.328.125 farklı çözüm seçeneği oluşturulabilmektedir. Hesap tablosu üzerinde her bir çözümün 0,1 dakikada hesaplandığı kabul edildiğinde ilk problemdeki alternatiflerin tamamının denenmesi için 52.298 yıl, ikinci problem için ise 3.628.898 yıl gerekmektedir. Her iki problemde arama uzayının büyük olması nedeniyle problemlerin deneme-yanılma yoluyla doğru çözümünün bulunması çok uzun hesaplama süresi gerektirmektedir. Problem türünden bağımsız çalışabilen üst sezgisel algoritmalar ise arama

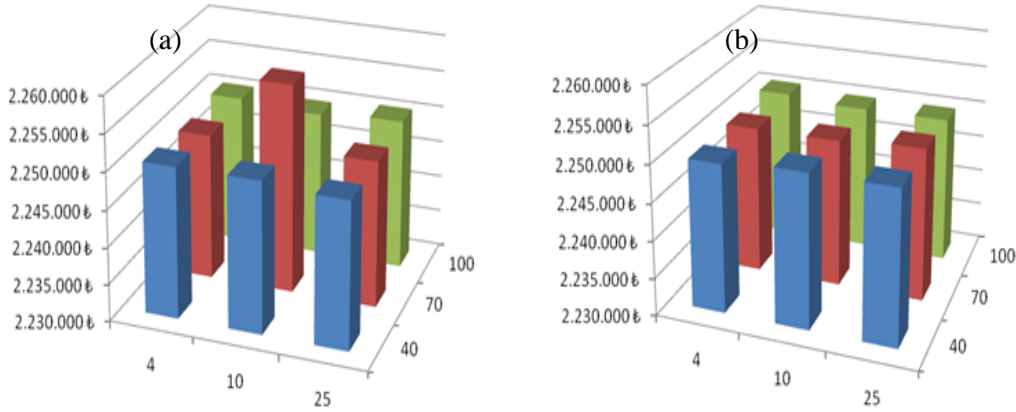
uzayını daha etkin bir şekilde araştırıp yerel optimuma yakalanma ihtimalini azaltarak optimum veya yakın optimum sonuçlara ulaşmaktadır. Uygulamasının matematiksel programlamaya göre daha kolay olması ve sezgisel yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle bu çalışmada GA ile ZMÖP çözülmüştür.

Tablo 2. Zaman maliyet ödünleşim probleminin tanımlanması

Açıklama	Miktarı
Günlük şantiye genel gideri	500 TL
Yüklenicinin inşa edilen tesisin işletmeye	2000 TL
Zaman maliyeti	$2000 + 500 = 2500$ TL/gün
Gecikme cezası	Yok
Taahhüt edilen bitirme süresi	Yok

3. GA'nın UYGULANMASI

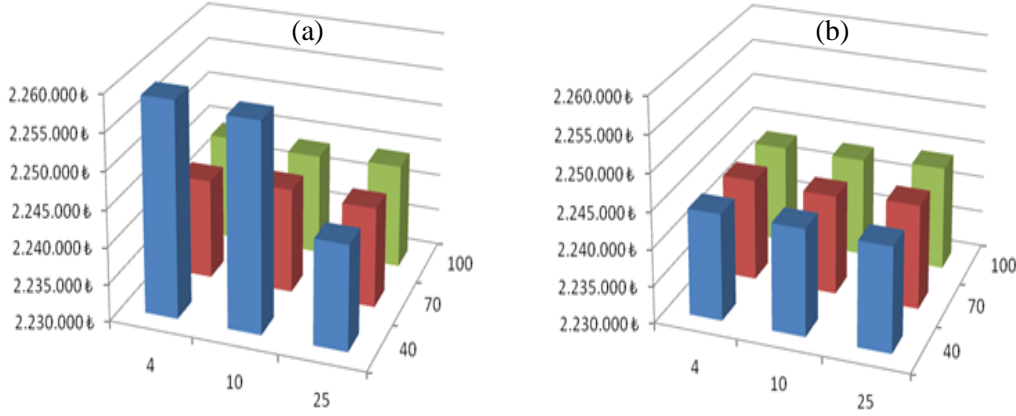
Optimizasyon hesaplamaları hesap tablosu uygulaması üzerinde yapıldığı için hesaplama süresi çalıştırılabilir yazılımlara göre daha uzun sürmektedir. Hesap yükünü düşürmek için GA parametrelerinin en uygun biçimde uygulanması amaçlanmıştır. Bu nedenle çaprazlama, mutasyon ve popülasyon boyutunun en uygun değerlerinin belirlenip en az sayıda iş programı çözümlenerek optimizasyon sürecinin yürütülmesi amaçlanmıştır. Parametrelerin doğru belirlenememesi, yakınsamanın gerçekleşmemesine veya ancak aşırı hesap yükü sonucu yakınsamanın elde edilebilmesine neden olacaktır. En uygun oranları belirlemek için bu değerlerin farklı kombinasyonları kullanılarak, her iki problem için deneysel tasarımla GA'nın parametreleri incelenmiştir. Deneysel tasarımda birey sayısı için 50 ve 100, çaprazlama oranı için %40, %70 ve %100, mutasyon oranı için %4, %10 ve %25 değerleri incelenmiştir.



Şekil 2:

Birey sayısı 50 ve birey sayısı 100 olan birinci problem için farklı çaprazlama ve mutasyon oranları kullanılarak elde edilen maliyet değerleri

Birinci problemin deneysel tasarımında ilk oluşturulan birey sayısı Şekil 2(a)'da 50 ve Şekil 2(b)'de 100 olmak üzere, farklı çaprazlama ve mutasyon oranlarının kombinasyonu kullanılarak 250 GA döngüsü sonucu elde edilen maliyet değerleri gösterilmektedir. İkinci problemin deneysel tasarımında ilk oluşturulan birey sayısı Şekil 3.a'da 50 ve Şekil 3.b'de 100 olmak üzere, farklı çaprazlama ve mutasyon oranlarının kombinasyonu kullanılarak 250 GA döngüsü sonucu elde edilen maliyet değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3:

Birey sayısı 50 ve birey sayısı 100 olan ikinci problem için farklı çaprazlama ve mutasyon oranları kullanılarak elde edilen maliyet değerleri

Birey sayısı için 50 ve 100 bireyin performansı göz önüne alındığında, yakınsama kararlılığı ve hesap yükü açısından 100 bireyin uygun olduğu analiz edildi. Çaprazlama oranında ise hesap yükü ve optimum sonuç açısından iyi performans gösteren %70 değeri tayin edildi. Mutasyon oranının farklı birey sayısı ve çaprazlama oranlarında değişken performans gösterdiğinden hesap yükü açısından orta derece olan %10 değeri alınmıştır. GA'nın her döngüsünde; çaprazlama operatörü 70, mutasyon operatörü 10 yeni birey oluşturmakta böylece döngü başına 80 yeni bireyin maliyet değerinin hesaplanması gerekmektedir. Toplamda, her tekrarda uygulanan 500 döngü sonucunda her iki problem içinde 40.000 şebeke çözümü yapılmıştır. Birinci problemdeki alternatif çözüm yolu sayısının 274 milyardan; ikinci problemde ise 19 trilyondan fazla olduğu göz önüne alındığında GA'nın hesap yüküne göre sunduğu optimum ve yakın optimum sonuçlar uygundur.

Bu çalışmada zaman maliyet ödünleşim problemi işçilere ödenen toplam işçilik gideri, inşaatın genel gideri ile inşaatın tamamlanması sonrası elde edilecek kira geliri toplamı maliyet olarak ele alınmış ve belirtilen giderin en düşük değeri aranmıştır. Özel olarak belirtilen inşaat tamamlanma süresinin en düşük maliyeti aranmamıştır. Arama uzayı donatı, kalıp, beton dökümü, duvar örülmesi, sıva, boya ve yer döşemesi işleri aktivitelerine atanabilecek birinci problemde 4, ikinci problemde 5 farklı yapım seçeneğinin kombinasyonundan oluşmaktadır. İşçilik giderleri, genel giderler ile tesisin fırsat maliyeti eklenerek toplam maliyet hesaplanmış ve en düşük toplam maliyeti veren iş programına ulaşılması amaçlanmıştır. Genetik algoritma, bireylerin rastgele oluşturulmasıyla başlar. İlk problemde kullanılan 19 aktivitenin 4 farklı yapım alternatifi olduğundan 1, 2, 3 ve 4; ikinci problemde kullanılan 19 aktivitenin 5 farklı yapım alternatifi olduğundan 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı yapım alternatifini seçecek sayıların her aktivite için rastgele üretilmesi sonucu bireyler oluşturulmuştur. Popülasyondaki bireylerin sayısı her iki problem içinde 100 olarak belirlenerek analiz boyunca sabit tutulmuştur. Oluşturulan bireylere kendine özgü kod numarası tayin edilip yapım maliyetleri hesaplanarak küçükten büyüğe doğru sıralandı. En düşük maliyetli birey 1 numaralı sırada olacak şekilde bireyler sıralanmıştır. Sıralanan bireylere başarı sırasını da dikkate alarak rastgele sayılar üretilip hayatta kalma olasılıkları Şekil 4'te gösterildiği gibi atanmıştır.

V	W	X	Y	Z	AA
Sıra	Kod	Maliyet (TL)	Hayatta Kalma Olasılığı		
15	B32	2.508.725	$=(150-V2)*(S_SAYI_ÜRET()*2+0,5)$		
10	B47	2.490.435	329,34		
4	B10	2.438.850	310,75		
7	B32	2.457.865	308,58		
13	B3	2.504.830	294,79		
31	B87	2.560.500	278,15		
42	B23	2.607.160	269,55		
16	B9	2.514.460	268,99		
35	B49	2.578.825	245,78		
32	B3	2.562.825	245,47		

Şekil 4:

Bireylerin sıralanması ve hayatta kalma şanslarının atanması

Popülasyondaki birey kalitesini sürekli olarak iyileştirebilmek için en düşük maliyetli bireye daha büyük bir hayatta kalma olasılığı verilmelidir. Bu koşul Eşitlik 4'te gösterilen maliyet sıra numarasını hayatta kalma olasılığı değerine dâhil eden formül ile sağlanmıştır.

$$\text{ÇGO} = (150 - \text{SIRA}) * (0,5 + \text{rastgele}(2)) \quad (4)$$

Eşitlik 4'te ÇGO, çaprazlamaya girme oranı, SIRA, bireyin amaç fonksiyonuna göre sıralandığı durumdaki başarı sırası, rastgele(2) ise 0 ile 2 arasında üretilen rastgele sayıdır. Bireyler hayatta kalma olasılıklarına göre büyükten küçüğe doğru tekrar sıralanır. Sıralamada birbiriyle ardışık biçimde komşu olan bireyler çaprazlama için eşleştirilir. Eşleşen bireyler için 1 ile parametre sayısı olan n arasında rastgele sayı üretilerek çaprazlama noktası rastgele belirlenir. Belirlenen çaprazlama noktasında iki bireyin genleri karşılıklı olarak değiştirilmesiyle çaprazlama işlemi gerçekleştirilir. Şekil 5'te çaprazlama operatörüne uğramış ebeveyn bireyler örnek olarak gösterilmektedir. Eşitlik 4'e göre atanan ÇGO değerlerine göre yapılan sıralama sonucu 1. ve 2. sırada bulunan bireyler eşleştirilmiştir. Çaprazlama konumu için üretilen rastgele rakam 14 sonucunu almış ve B1 ve B2'nin 14. aktivite sonrasındaki gen takımı yer değiştirerek oğul bireyler oluşturulmuştur. Çaprazlama oranı %70 olduğu için çaprazlama sonucunda 70 yeni oğul birey oluşturulmuştur.

Ebeveyn Bireyler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	Oğul Bireyler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19		
B1	3	2	3	3	2	2	3	4	4	1	2	2	4	4	1	2	4	4	1	2	4	4	2	1	1	4	4	4	3	1	3	4	1	2	4	4	3				
B2	4	4	3	4	2	1	1	4	4	4	3	1	3	4	3	1	4	2	2	2	3	3	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2			
B3	4	2	4	2	1	2	4	2	3	4	1	3	3	1	2	3	3	2	4	4	2	1	2	2	3	1	2	4	3	3	1	2	3	3	2	4	4	2			
B4	2	1	4	2	1	2	2	3	1	2	4	4	2	3	2	1	2	4	4	4	2	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
B5	1	1	4	2	1	3	3	2	4	4	1	4	2	4	3	1	4	4	4	4	1	3	2	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
B6	4	2	3	4	1	3	1	3	1	2	4	2	3	3	3	3	4	1	1	3	3	1	2	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	1		
B7	4	1	4	1	3	2	1	1	3	3	3	2	1	2	3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
B8	1	2	2	4	3	1	3	1	1	2	2	4	1	2	3	1	4	2	1	1	2	2	4	1	2	2	4	1	2	3	1	4	2	1	4	2	1	1	1		
B9	2	3	3	4	4	2	4	3	3	1	1	1	3	2	3	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
B10	3	1	3	1	2	4	2	4	3	1	2	4	3	3	3	3	2	1	1	2	3	3	1	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
B11	3	3	1	2	1	2	1	3	1	2	3	3	4	2	2	3	3	1	2	2	3	4	1	2	4	3	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
B12	3	4	4	2	4	3	1	4	4	3	2	4	1	3	2	1	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
B13	2	3	4	1	1	2	4	1	4	2	4	2	2	4	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
B14	2	4	2	2	4	2	1	2	4	3	3	4	4	3	1	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
B15	2	4	2	1	3	2	2	2	4	4	1	3	3	2	2	4	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
B16	4	1	4	1	4	2	4	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
B17	3	4	4	2	3	2	4	4	4	1	4	2	3	1	1	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
B18	3	1	2	4	1	3	2	4	1	2	2	4	1	1	1	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
B19	4	3	4	1	1	1	2	4	2	3	2	2	3	1	3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
B20	1	4	4	3	1	3	2	2	1	1	4	4	4	4	1	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	

Şekil 5:

Çaprazlama operatörü

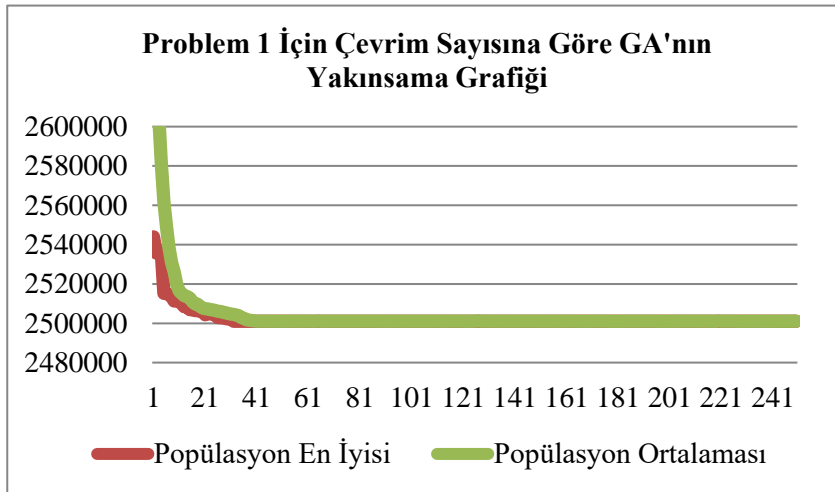
Mutasyona uğrayacak birey sayısı popülasyonun %10'u olarak belirlenmiştir. Hangi 10 bireyin mutasyona uğrayacağı, mutasyona uğrayacak gen ve mutasyonlu değeri rastsal olarak belirlenmiştir. Çaprazlama ile oluşturulan 70 birey ve mutasyona uğrayan 10 bireyin yapım maliyet değerleri ve dolaylı giderler hesaplanarak toplam maliyetlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanır. Eşitlik 4'te belirtilen ifade ile ÇGO değerleri hayatta kalma olasılıklarını belirlemek için hesaplanır. Hayatta kalma olasılık değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanan 180 birey arasından popülasyon boyutunun hesaplamalar boyunca sabit kalmasını sağlamak amacıyla en düşük ÇGO değerine sahip 80 birey yok edilerek doğal seleksiyon gerçekleştirilir

ve genetik algoritmanın bir döngüsü tamamlanır. Bir döngü sonucu oluşan bireylerin maliyet değerinin ortalaması ve en uygun maliyet değeri kaydedilir. GA'nın her tekrarında gerçekleşmesi gereken 250 döngü, oluşturulan makro kodlaması sayesinde bir önceki döngü sonucu oluşan bireylerin gen değerlerini de temel alarak sağlamaktadır. Makro kodu ile GA işlem adımları otomatik olarak gerçekleşmekte ve döngü sayısının isteğe bağlı olarak değiştirilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada çözümü aranan problemler için GA'da her tekrarda 250 çevrim yapılmıştır. GA, rastsal olarak arama uzayında optimum çözümü aramaktadır. Bu rastsallıktan dolayı arama uzayında bulunan en uygun çözümü bulmak için hesap cetvelinde 250 döngü olarak uygulanan GA, her iki problem için 10 kez tekrarlanmıştır. 10 tekrar yapılmasının nedenleri; GA rastsal çalışma prensibi, çalışmada çözümü aranan problemlerin arama uzayının büyük olması ve her tekrar sonucunda elde edilen optimum çözümün kıyaslanarak yöntemin tutarlılığının incelenmesidir. Birinci problemin 250 GA döngüsünün 10 tekrarı sonucu elde edilen minimum maliyet değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Problem 1 için elde edilen yakınsama değerleri

Analiz Numarası	Minimum Maliyet
1	2491901,90
2	2496061,30
3	2489730,60
4	2492395,00
5	2493920,60
6	2489145,60
7	2492466,30
8	2491245,60
9	2494383,10
10	2492395,00

Birinci problemdeki her tekrar sonucu kayıt altına alınan ortalama ve minimum maliyet değerleri grafiklerinde, ortalama ve minimum maliyet değerleri arasındaki fark döngü sayısının ilerlemesine bağlı olarak azalmakta ve sıfırlanmaktadır. Şekil 6'da bir denemenin yakınsama grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6:

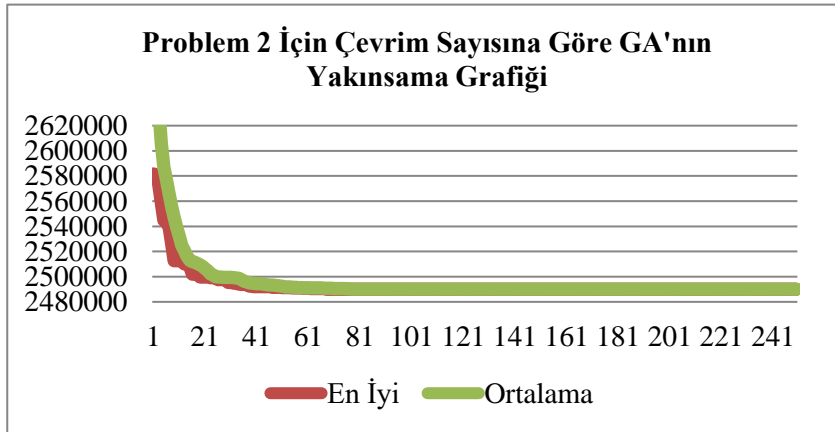
Problem 1 için popülasyon ortalaması ve en iyi değer yakınsama grafiği

Şekil 6 incelendiğinde 40 çevrimden sonra popülasyon ortalaması ile en iyi değer örtüştüğü görülmektedir. Bu aşamadan sonra hesaplamaları sürdürmek fazla bir iyileşme sağlamayacak sadece mutasyon operatörünün oluşturacağı değişimlerle bir iyileşme görülebilecektir. İkinci problemin GA ile gerçekleştirilen 250 döngüsünün 10 tekrarı sonucu elde edilen minimum maliyet değerleri Tablo 4’te gösterilmektedir.

Tablo 4. Problem 2 için elde edilen yakınsama değerleri

Tekrar Numarası	Minimum Maliyet Değerleri (TL)
1	2488500,63
2	2489260,63
3	2489833,13
4	2492778,75
5	2488500,63
6	2489833,13
7	2495816,25
8	2489145,63
9	2489833,13
10	2490081,88

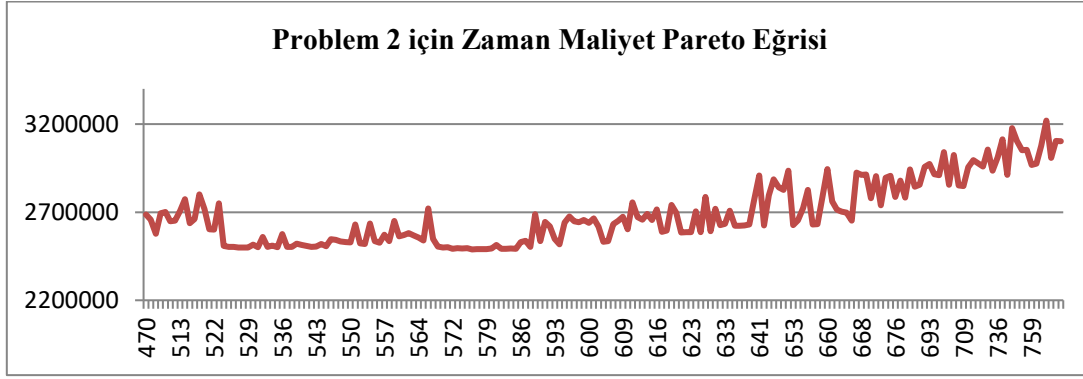
İkinci problemdeki her tekrar sonucu kayıt altına alınan ortalama ve minimum maliyet değerleri grafiklerinde, ortalama ve minimum maliyet değerleri arasındaki fark döngü sayısının ilerlemesine bağlı olarak azalmakta ve sıfırlanmaktadır. Örnek yakınsama grafiği Şekil 7’de gösterilmektedir. Gerçekleştirilen çözümlerde her analiz için 20.000 deneme yapılmıştır. Bir analizde tüm yapının Gantt şeması oluşturulup süre ve maliyet değerleri hesaplandığı için bir analiz yaklaşık 1 saniye sürmekte ve toplam analizler ortalama 4 saatte tamamlanmaktadır. Şekil 6 ve 7’de sunulan yakınsama grafikleri incelendiğinde GA ile 250 çevrim yapılmasının gerekli olmadığı, 50 çevrimde de yakın optimum sonuçların alınabileceği görülmüştür. Bu durumda hesaplama süresi 1 saatten daha kısa sürecektir.



Şekil 7:

Problem 2 için popülasyon ortalaması ve en iyi değer yakınsama grafiği

İnşaat süresine göre en düşük toplam proje maliyeti Şekil 8’de verilmiştir. Ayrık zaman maliyet ödünleşim problemi olduğu için Pareto eğrisi dalgalı olmuştur. Çok fazla sayıda yerel minima bulundurduğu için problemin en iyi sonucuna yakınsama her zaman garantili değildir.



Şekil 8:
İnşaat süresi ve toplam maliyetin Pareto eğrisi

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Zaman maliyet ödünleşim problemi literatürde yaygın olarak incelenip çözülmüş olmasına rağmen ele alınmış biçimi ve çözüm yöntemleri inşaat sektöründe uygulanabilmesi açısından fazla kuramsal kalmaktadır. Literatür çalışması sırasında atıfta bulunulan zaman maliyet ödünleşim problemlerinin tamamına yakını hipotetik projelerin çözümüne dayanmaktadır. Makalelerde kuramsal olarak problem ve problemi çözen algoritmalar detaylı biçimde açıklanmakta fakat problemin inşaat sektöründe nasıl ele alınacağı ve problemi çözen yöntemin nasıl uygulanabileceği konuları eksik kalmaktadır. Bu çalışmada zaman maliyet ödünleşim probleminin bina inşaatı için nasıl oluşturulabileceği örnek bir yapı üzerinde açıklanmış ve aktiviteler için farklı tamamlanma süreleri ve maliyetleri gerçeğe yakın biçimde oluşturulmuştur. Hazırlanan hesap tablosu uygulaması sayesinde inşaat sektöründe faaliyet gösteren yüklenici ve mühendisler kolaylıkla zaman-maliyet ödünleşim problemini oluşturup Genetik Algoritma ile en iyi veya yakın en iyi sonucu elde ederek inşaat maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlayabileceklerdir.

Bu çalışmada çok katlı konut inşaatlarının planlamasını en basit düzeyde gerçekleştirebilecek bir yaklaşım önerilmiştir. En az veri girişi ve insan müdahalesi ile iş programının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu nedenle bu çalışmada iş programı kritik yol yöntemi yerine genellikle karayolu ve boru hattı inşaatlarında kullanılan doğrusal iş programı ile oluşturulmuştur. İnşaat sektörü planlama aşamasında yaygın olarak kritik yol yöntemini kullanmasına rağmen bu çalışmada doğrusal iş programının kullanılma nedeni daha basit oluşu ve daha az parametre ile iş programının oluşturulabilmesidir. Kritik yol yönteminde iş programının oluşturulması ve planlama yazılımına tanıtılması iyi düzeyde planlama bilgisi ve deneyimi gerektirmektedir. Fakat doğrusal iş programında aktiviteler arasındaki kısıtlamaların tanımlanması göreceli olarak daha kolaydır. Buna ek olarak aktivite sayısı daha az olduğu için aktiviteler arasındaki ardıl-öncel ilişkilerin belirlenmesi ve yazılıma tanımlanması da daha kolay ve hızlı biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

GA'nın birey sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları için deneysel tasarımla en uygun değerler belirlenmiştir. Bundan dolayı; bu çalışma, GA uygulayarak optimizasyon yapacak araştırmacılara ve proje planlamacılara hesap yükünün azaltılması konusunda yardımcı olacaktır. Planlama mühendisleri, en uygun süre ve maliyetle projenin tamamlanması için proje maliyetlerini kontrol altında tutarak planlama ve iş takibi yapmaktadır. Planlama ve takip aşamasında öngörülme durumlarının ortaya çıkması veya başka projeler için tekrarlanan

hesaplamalar, zaman ve iş gücü maliyeti açısından büyük kayıplara yol açmaktadır. Bu çalışmada veri girişi veya değişimi, otomatikleştirilen hesap tablosu oluşturularak geliştirilen uygulama sayesinde proje planlaması hızlı ve etkin biçimde gerçekleştirilebilmiştir. Sonuçların hızlı bir şekilde alınması ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır. Proje yönetiminde profesyonellerin kullandığı programların dışında kolay oluşturulabilir ve kullanılabilir bir sistemin varlığı, sektör içindeki tüm aktörlere rekabet açısından eşit koşulların sağlanmasına yardımcı olabilecektir.

Bu çalışmada geliştirilen hesap tablosu GA ile kullanıcılara ilk iş programına kıyasla çok daha düşük maliyetli yapım alternatifleri seçeneklerini sunmaktadır. GA ile en düşük maliyetli yapım alternatifinin elde edilmesi kesin değildir ancak optimizasyon sürecinde her çevrim sonucu elde edilen popülasyonun en iyi ve ortalama maliyet değerleri grafiği incelendiğinde, başlangıç çözümüne göre önemli maliyet düşüşünün sağlandığı ve tüm denemelerde optimum veya yakın optimum sonuca yakınsadığı görülmektedir. Arama uzayının ilk probleme göre daha büyük olması nedeniyle ikinci problemdeki tekrarlardan elde edilen çözüm değerlerinin farklılaştığı ve varyansın yükseldiği görülmüştür. Fakat daha fazla yapım alternatifi bulunduğu için daha düşük maliyet değerleri elde edilebilmiştir. Problem için en uygun maliyet değerleri aranırken GA uygulaması her tekrar 40 döngü olacak şekilde 10 kez tekrarlanmıştır. Tüm aktivitelerin birinci yapım alternatifinde yürütülmesi durumunda işçilik ve dolaylı giderler toplamı 2.852.105 TL olmaktadır. İlk problemin 10 çözümünün ortalaması 2.492.364,50 TL, standart sapması ise 2080 TL'dir. Optimizasyon sonrası en düşük maliyet 2.489.145,60 TL olarak elde edilmiş ve bu çözümde 362.959 TL maliyette azalma elde edilmiştir. İkinci problemin 10 çözümünün ortalaması 2.490.358 TL, standart sapması ise 2263 TL'dir. Elde edilen 10 çözüm arasında en iyi çözüm 2.488.500 TL'dir. Optimizasyon sonrasında maliyetlerde en çok 363.604, ortalama 361.746 TL azalma elde edilebilmesi mümkündür. Dolayısıyla, bu çalışmada oluşturulan hesap tablosu uygulamasının kullanılmasıyla boşta kalan personel-ekipman maliyetinden ve inşaat sürecinde gerçekleşen genel giderlerden elde edilen tasarrufun, net kârı önemli ölçüde artırabileceği ve maliyette kayda değer bir iyileşme elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma literatüre belirtilen faydaları sağlamakla birlikte iyileştirilmesi gereken tarafları da bulunmaktadır. Oluşturulan hesap tablosu ve algoritmasında; zemin işleri sadece iş takviminde gösterilmiş ve optimizasyon işlemine dâhil edilmemiştir. Ayrıca çatı, asansör, ve elektrik aksamı ile ilgili aktiviteler için farklı yapım alternatifleri oluşturulmamış ve bu aktivitelerin alt yüklenici tarafından gerçekleştirileceği varsayılarak optimizasyon sürecine dâhil edilmemiştir. Makalenin ileri çalışması olarak çatı, mekanik ve elektrik tesisatı işlerinin metrajının da gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Tesisat, temel kazısı ve temel işleri iş programında sadece süre olarak yer almaktadır. Belirtilen işler tekrarlamadığı için bu aktiviteler için farklı yapım süre alternatifleri oluşturulmamış ve optimizasyon sürecine parametre olarak dâhil edilmemiştir. Bu durum çalışmanın gerçek inşaat projelerine uygulanabilirliğini düşürmektedir.

Metraj hesaplamalarında veri girişini ve hesaplamaları kolaylaştırmak için bir katta oluşturulan değerlerin tüm katlarda geçerli olduğu kabul edilmiştir. Bina yapımı sırasında kalıp, donatı, duvar, sıva vb. işlerin yapılması için oluşturulan işçi ekipleri genellikle değiştirilmeden son kata kadar çalışır. Bu nedenle yapılan kabul makuldür fakat tüm katların aynı mimaride olması ve aynı malzeme sınıfı ile inşa edilmesi bölme duvarların aynı miktarda olması, aynı yer döşemesinin kullanılması ve benzeri hususlar her zaman karşılaşılabilecek bir durum değildir. Yapılan kabullenme mimari proje ve iş programının oluşturulması üzerinde gerçek değerlerden uzaklaştıran bir basitleştirme değildir. Doğrusal iş programının basit olması iş programının tanımlanması ve optimizasyon sürecinde avantaj sağlarken aşırı genelleştirme ise proje

planlamasında dezavantaj oluşturmaktadır. Aktivite sürelerinin tüm katlarda aynı olması, aktivitelerin yürütülmesinin herhangi bir katta kesilememesi gibi kısıtlar planlamacıya iş programı üzerinde kritik yol yönteminde olduğu kadar denetim ve hüküm kurma yeteneği sağlayamamaktadır. Belirtilen durumlar aynı anda birden fazla inşaat projesini yürüten firmalar için önemli bir eksiklik olmakla birlikte küçük ölçekli yükleniciler için önemsizdir. Ayrıca hesaplamaları basitleştiren doğrusal iş programı yerine kritik yol yöntemi uygulanarak aktivitelerin belirli katlarda ne zaman başlayıp tamamlanacağını belirlemede planlayıcıya daha yüksek düzeyde denetimin sağlanması gereklidir. İleri çalışma olarak bu çalışmada geliştirilen planlama sürecinin daha karmaşık iş programlarını oluşturma yeteneğinin kazandırılması amaçlanmaktadır. Bu sayede belirtilen dezavantajların ve kabullenmelerin bir kısmı giderilerek gerçeğe daha yakın proje yönetiminin sağlanması hedeflenmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız.

YAZAR KATKISI

Önder Halis BETTEMİR, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi ile son onay ve tam sorumluluk, Tugay YÜCEL, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi kısımlarına katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Basset, M., Ali, M., & Atef, A. (2020). Uncertainty assessments of linear time-cost tradeoffs using neutrosophic set. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 10.1016/j.cie.2020.106286.
2. Afruzi, E. N., Najafi, A. A., Roghanian, E., ve Mazinani, M. (2014). "A multi-objective imperialist competitive algorithm for solving discrete time, cost and quality trade-off problems with mode-identity and resource-constrained situations." *Computers and Operations Research*, Vol. 50, pp. 80-96, doi: 10.1016/j.cor.2014.04.003.
3. Al-Shihabi, S., ve AlDurgam, M. M. (2020). "The contractor time-cost-credit trade-off problem: integer programming model, heuristic solution, and business insights." *International Transactions in Operational Research*, doi:10.1111/itor.12764.
4. Albayrak, G. (2020). Novel Hybrid Method in Time-Cost Trade-Off or Resource-Constrained Construction Projects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(4), 1295-1307, doi.org/10.1007/s40996-020-00437-2.
5. Ammar, M. (2011). Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cashflows. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137 (1), pp.65-71, doi: 10.1061/ASCECO.1943-7862.0000256.
6. Anagnostopoulos, K. P. ve Kotsikas, L. (2010). "Experimental evaluation of simulated annealing algorithms for the time-cost trade-off problem." *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 217, No. 1, pp. 260-270, DOI: 10.1016/j.amc.2010.05.056.
7. Banihashemi, S. A., ve Khalilzadeh, M. (2020). Time-cost-quality-environmental impact trade-off resource-constrained Project scheduling problem with DEA

- approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, doi: 10.1108/ECAM-05-2020-0350.
8. Barber, T. J. ve Boardman, J. T. (1988). "Knowledge-based project control employing heuristic optimisation." *IEE Proceedings*, Vol. 135, No. 8, pp. 529-538, DOI: 10.1049/ip-a-1.1988.0083.
 9. Bettemir, (2009), "Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristic algorithms" Doctoral dissertation, Middle East Technical University.
 10. Bettemir, Ö. H. (2011). "Experimental design for genetic algorithm simulated annealing for time cost trade-off problems." *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)* Vol.3, Issue 1(2011)15-26.
 11. Bettemir, Ö. H. ve Birgönül, M. T. (2016). " Network Analysis Algorithm for the Solution of Discrete Time-Cost Trade-off Problem." *KSCE Journal of Civil Engineering*, (2017) 21(4):1047-1058 DOI 10.1007/s12205-016-1615-x.
 12. Cha, H. S. ve Lee, D. G. (2015). "A case study of time/cost analysis for aged-housing renovation using a pre-made BIM database structure." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 841-852, doi: 10.1007/s12205-013-0617-1.
 13. Chen, P. H. ve Weng, H. (2009). "A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling." *Automation in Construction*, 18 (4), pp.485-498, doi: 10.1016/j.autcon.2008.11.003.
 14. Cheng, M. Y. ve Tran, D. H. (2016). "An efficient hybrid differential evolution based serial method for multimode resource-constrained project scheduling." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 90-100, doi: 10.1007/s12205-015-0414-0.
 15. Chiu, Y. S. P. ve Chiu S. W. (2005). "Incorporating expedited time and cost of the end product into the product structure diagram." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 7, pp. 987-991, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.10.015.
 16. Eshtehardian, E., Afshar, A., ve Abbasnia, R. (2009). "Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time-cost trade-off problem." *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 5, pp. 189-198, 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2009.02.001.
 17. Fulkerson, D. R. (1961). "A network flow computation for project cost curves." *Management Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 167-178, DOI:10.1287/mnsc.7.2.167.
 18. Geem, Z. W. (2010). "Multiobjective optimization of time-cost trade-off using harmony search." *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 136, No. 6, pp. 711-716, DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000167.
 19. Hegazy, T. ve Ersahin, T. (2001). Simplified Spreadsheet solutions. II: Overall schedule optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127 (6), pp.469-475, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:6(469).
 20. Hooshyar B, Rahmani A ve Shenasa M. (2008). "A Genetic algorithm to time cost trade off in project scheduling." *IEEE Congress on Evolutionary Computation*; 2008.
 21. Iranmanesh H, Sikandari MR ve Allahverdiloo M. (2008). "Finding pareto optimal front for multi mode time, cost quality trade off in projects cheduling. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2008; 40, 346-350.

22. Jebaseeli, M. E. ve Dhayabaran, D. P. (2015). " An Algorithm to Solve Fully Fuzzy Time Cost Trade off Problems." *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, Volume 4, Issue 2, March 2015.
23. Kandil A. ve El-Rayes K. (2006). "Parallel genetic algorithms for optimizing resource utilization in large-scale construction projects." *Journal of Construction Engineering and Management* 2006; 132 (5), 491-498.
24. Kang, N., Son, J. ve Lee, S. (2015). "New Time-Cost Trade-Off Model Considering the Sequence of Alternatives Between Activities." *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* /May 2015/ 386.
25. Kasaeian A, Reza O ve Afshar A. (2007). "Non dominated archiving genetic algorithm for multi-objective optimization of time-cost trade-off." Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing, Vancouver, British Columbia, Canada.
26. Ke, H., Maa, W. ve Ni, Y. (2009). "Optimization Models and a GA Based Algorithm for Stochastic Time-Cost Trade Off" *Applied Mathematics and Computations* 215, 308-313.
27. Ke, H. (2014). "Uncertain random time-cost trade-off problem." *Journal of Uncertainty Analysis and Applications*, 2014, 2:23 <http://www.juaa-journal.com/content/2/1/23>.
28. Kelley Jr, J. E. ve Walker, M. R. (1959). "Critical-path planning and scheduling." In Proc. Of eastern joint IRE-AIEE-ACM computer conference Association for Computing Machinery December 1-3,1959, Vol. 1, pp. 160-173.
29. Kelley Jr, J. E. (1961). "Critical-path planning and scheduling: Mathematical basis." *Operations Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 296-320, DOI:10.1287/opre.9.3.296.
30. Kim, J.,Kang, C., ve Hwang, I. (2012). "A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time–cost trade off problem." *International Journal of Project Management*, Vol. 30, No. 2, pp. 264-272, DOI: 10.1016/j.ijproman.2011.05.004.
31. Koo, C., Hong, T., ve Kim, S. (2015). "An integrated multi-objective optimization model for solving the construction time-cost trade-off problem." *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 323-333, DOI: 10.3846/13923730.2013.802733.
32. Lee, H. S.,Roh, S., Park, M. S., ve Ryu, H. G. (2010). "Optimal option selection for finishing works of high-rise building." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 639-651.
33. Lin, C. L., ve Lai, Y. C. (2020). An improved time-cost trade-off model with optimal labor productivity. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(2), 113-130.
34. Liu, D., Li, H., Wang, H., Qi, C., & Rose, T. (2020). Discrete symbiotic organisms search method for solving large-scale time-cost trade-off problem in construction scheduling. *Expert Systems with Applications*, 148, 113230.
35. Liu, S. S. ve Wang, C. J. (2008). "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.
36. Moghadam, E. K.,Sharifi, M., Rafiee, S., ve Chang, Y. K. (2020). Time–Cost–Quality Trade-Off in a Broiler Production Project Using Meta-Heuristic Algorithms: A Case Study. *Agriculture*, 10(1), 3.

37. Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., ve Adamowski, J. (2015). "A novel multicriteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects." *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 6, pp. 3089-3104, DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.032.
38. Moussourakis, J. ve Haksever, C. (2004). "Flexible Model for time/cost trade off problem." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130 (3), pp.307-314.
39. Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y. J., ve Tiwari, M. K. (2013). "A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time–cost–quality trade-off problems: A case study of highway construction project." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26, No. 8, pp. 1953-1966, DOI: 10.1016/j.engappai.2013.05.006.
40. Rahimi M ve Iranmanesh H. (2008) "Multi-objective particle swarm optimization for discrete time cost quality trade-off problems." *World Applied Sciences Journal* 2008; 4(2), 270-276.
41. Rostami, M., Moradinezhad, D., ve Soufipour, A. (2014). "Improved and competitive algorithms for large scale multiple resource constrained project-scheduling problems." *KSCIE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1261-1269.
42. Sakellariopoulos, S. ve Chassiakos, A.P. (2004). " Project time–cost analysis under generalised precedence relations." *Advances in Engineering Software*, 35 (2004) 715–724
43. Senouci, A. ve El-Rayes, K. (2009). Time-Profit trade-off analysis for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135 (8), pp.718-725.
44. Tareghian HR ve Taheri SH. A. (2007). "Solution procedure for the discrete time, cost and quality trade off problem using electromagnetic scatter search." *Applied Mathematics and Computation* 2007; 190 (2), 1136-1145.
45. Tavana, M., Abtahi, A. R., ve Khalili-Damghani, K. (2014). "A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems." *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 4, pp. 1830-1846, DOI: 10.1016/j.eswa.2013.08.081.
46. Yang, I. T. (2007). "Using elitist particle swarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis." *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 133, No. 7, pp. 498-505, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:7(498).
47. Yücel, T. (2019). Kesikli zaman maliyet ödünleşim probleminin optimum çözümünün aranması (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
48. Wang, T., Abdallah, M., Clevenger, C., ve Monghasemi, S. (2019). Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
49. Zandebasiri, M., Vacik, H., Etongo, D., Dorfstetter, Y., Soosani, J., ve Pourhashemi, M. (2019). Application of time-cost trade-off model in forest management projects: The case of Oak decline project. *Journal of forest science*, 65(12), 481-492.
50. Zhang, H. ve Xing, F. (2010). "Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality trade off in construction." *Automation in Construction*, Vol. 19, No. 8, pp. 1067-1075, DOI:10.1016/j.autcon.2010.07.014.
51. Zhang, Y. ve Thomas Ng, S. (2012). "An ant colony system based decision support system for construction time-cost optimization." *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, No. 4, pp.580-589, DOI: 10.3846/13923730.2012.704164.