

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“Yapım Projelerinde Zaman Maliyet ve Güvenlik Riski Optimizasyonu” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca her aşamada desteğini ve rehberliğini esirgemeyen, bilimsel yaklaşımı, bilgi birikimi ve yapıcı geri bildirimleriyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE’ye en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisinden öğrendiklerim, yalnızca bu tez çalışmasıyla sınırlı kalmayıp akademik hayatımın tamamına ışık tutacaktır.

Ayrıca, tez sürecim ve akademik gelişimim boyunca katkılarını esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Dr. Mehmet YILMAZ’a da içten teşekkürlerimi sunarım. Yapıcı eleştirileri ve değerli önerileriyle tezime önemli katkılarda bulunan saygıdeğer hocalarıma ve eğitim öğretim hayatım boyunca emeği geçen tüm akademisyenlere teşekkür ederim.

Canım annem Tin Tin Oo ve babam Hla Shwe başta olmak üzere, aileme sevgileri, duaları ve bana olan inançları için gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, bana cesaret veren, destek olan ve her zaman yanımda olduklarını hissettiren canım arkadaşlarıma da gönülden minnettarım. Son olarak, bu yolculukta bana herhangi bir şekilde destek olan herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Theint Shwe SIN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yapım Projelerinde Zaman, Maliyet ve Güvenlik Riski Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tayfun DEDE’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/08/2025

Theint Shwe SIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Araştırma Konusunun Literatürde Eksikliği	3
1.3. Araştırmanın Amaçları	3
1.4. Çalışmanın Yapısı	5
1.5. Proje Kısıtları	5
1.6. Zaman Yönetimi.....	7
1.6.1. Kritik Yol Yöntemleri.....	8
1.7. Maliyet Yönetimi	9
1.7.1. Doğrudan Maliyet	11
1.7.2. Dolaylı Maliyet	11
1.8. Risk Yönetimi.....	11
1.8.1. Risk Tanımlanması	13
1.8.2. Risk Analizi.....	14
1.8.3. Risklerin Değerlendirmesi	15
1.8.4. Risk Yönetim Planının Uygulanması.....	15
1.8.5. Risk İzlenmesi ve Denetimi	17
1.9. Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimine Yönelik Önceki Araştırmalar	18
1.10. Yapı Projelerinde Çok Amaçlı Optimizasyon.....	23
1.10.1. TCRT Problemlerinde Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları.....	24
1.10.2. Matematiksel Programlama Yöntemleri	26
1.10.3. Meta-sezgisel Algoritmalar	26

1.10.4. Evrimsel Algoritmalar.....	27
1.10.5. Sürü Zekâsı Algoritmaları.....	28
1.10.6. Hibrit ve Bulanık Optimizasyon Yaklaşımları.....	28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	30
2.1. TCRO İçin Matematiksel Formülasyon	31
2.2. Baskın Olmayan Sıralama II (NDS-II).....	34
2.3. Jaya Algoritması.....	37
2.4. Baskın Olmayan Sıralama II - Jaya Algoritması (NDSII-Jaya)	38
2.5. Çok Amaçlı Optimizasyonda Performans Ölçütü	40
2.5.1. Hiper Hacim.....	41
3. BULGULAR.....	42
3.1. 11 Aktiviteli Örnek.....	42
3.2. 13 Aktiviteli Örnek.....	47
3.3. 18 Aktiviteli Örnek.....	53
3.4. 25 Aktiviteli Örnek.....	59
3.5. Zaman-Maliyet-Risk Optimizasyonunda Çözüm Kalitesi	66
4. SONUÇLAR.....	68
5. KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YAPIM PROJELERİNDE ZAMAN, MALİYET VE GÜVENLİK RİSKİ OPTİMİZASYONU

Theint Shwe SIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tayfun DEDE
2025, 76 Sayfa

İnşaat projeleri doğası gereği karmaşıktır ve başarılı sonuçlar elde etmek için birbirine bağlı sayısız faktörün dikkatli bir şekilde dengelenmesini gerektirir. Bunlar arasında zaman, maliyet ve güvenlik riski en kritik ve genellikle birbiriyle çelişen amaçlardır. Bu çalışmada, inşaat projesi yönetiminde Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) problemi çok amaçlı bir optimizasyon yöntemiyle çözülmeye çalışılmaktadır. Çalışma, özellikle NDSII-Jaya'yı oluşturmak için Jaya algoritması ile birleştirilen Baskın Olmayan Sıralama II (NDS-II) çerçevesine odaklanarak gelişmiş meta-sezgisel algoritmaların uygulanmasını araştırmaktadır. Önerilen NDSII-Jaya algoritması, farklı karmaşıklık düzeylerine sahip dört inşaat örnek olayına uygulanmış; proje süresi, maliyet ve güvenlik ile ilişkili risklerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, algoritmanın çeşitli ve iyi dağıtılmış Pareto-optimal çözümler üretme kabiliyetini göstermekte ve çözüm kalitesi, yakınsama ve hipervolüm göstergeleri açısından diğer mevcut yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir. Bu araştırma, proje planlama ve yürütmede daha iyi bilgilendirilmiş karar vermeyi destekleyebilen sağlam, parametresiz bir optimizasyon modeli sunarak hem akademik literatüre hem de pratik inşaat yönetimine katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zaman Maliyet Risk Ödünleşimi, Çok Amaçlı Optimizasyon, İnşaat proje yönetimi, NDS-II, Jaya, Zaman maliyet risk ödünleşim problemi (TCRTP)

Master Thesis

SUMMARY

TIME, COST AND SAFETY RISK OPTIMIZATION IN CONSTRUCTION PROJECT

Theint Shwe SIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tayfun DEDE
2025, 76 Pages

Construction projects are inherently complex, necessitating the precise coordination of numerous interconnected factors to achieve successful outcomes. Among these, time, cost, and safety risk are the most critical and often conflicting objectives. This thesis addresses the Time-Cost-Risk Trade-off (TCRT) problem in construction project management through a multi-objective optimization approach. The study explores the application of advanced metaheuristic algorithms, focusing specifically on the Non-Dominated Sorting II (NDS-II) framework combined with the Jaya algorithm to form the NDSII-Jaya. The proposed NDSII-Jaya algorithm is applied on four construction case studies of varying complexity, optimizing for project duration, cost, and safety-related risks. The results demonstrate the algorithm's ability to generate diverse and well-distributed Pareto-optimal solutions, outperforming other existing methods in terms of solution quality, convergence, and hypervolume indicators. This research contributes to both academic literature and practical construction management by offering a robust, parameter-free optimization model capable of supporting better-informed decision-making in project planning and execution.

Key Words: Time Cost Risk Trade-off, TCRT, Multiobjective Optimization, Construction project management, NDS-II, Jaya,

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Proje kısıtları	7
Şekil 2. Risk yönetim süreci adımları.....	13
Şekil 3. Araştırmanın çalışma adımları	31
Şekil 4. NDSII-Jaya'nın akış şeması.....	40
Şekil 5. 11 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümler.....	44
Şekil 6. 11 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri	45
Şekil 7. 11 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri.....	45
Şekil 8. 11 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	46
Şekil 9. 11 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	46
Şekil 10. 13 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümleri	50
Şekil 11. 13 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri	50
Şekil 12. 13 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri.....	51
Şekil 13. 13 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	51
Şekil 14. 13 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	52
Şekil 15. 18 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümleri	56
Şekil 16.18 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri	56
Şekil 17. 18 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri.....	57
Şekil 18. 18 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	57
Şekil 19. 18 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	58
Şekil 20. 25 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümler.....	63
Şekil 21.25 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri	63
Şekil 22. 25 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri.....	64
Şekil 23. 25 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	64
Şekil 24. 25 aktiviteli problemi için pareto çözümleri	65
Şekil 25. Hiper hacim performans karşılaştırması.....	67

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kritik yol yöntemlerinin (CPM) avantajları ve dezavantajları.....	9
Tablo 2. TCRT çalışmalarında risk türlerinin sınıflandırılması	18
Tablo 3. Yapım projelerinde zaman maliyet risk ödünleşimine ilişkin önceki vaka çalışmaları.....	24
Tablo 4. Güvenlik riski puanlama sistemi (Cooke ve Williams, 2024)	33
Tablo 5. 11 aktiviteli problemi için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri	43
Tablo 6. 11 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları	44
Tablo 7. NDS-II-Jaya kullanılarak 11 aktiviteli problemi için karşılaştırma	47
Tablo 8. 13 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri.....	48
Tablo 9. 13 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları	49
Tablo 10. NDS-II-Jaya kullanılarak 13 aktiviteli problemi için karşılaştırma	53
Tablo 11. 18 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri.....	54
Tablo 12. 18 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları	55
Tablo 13. NDS-II-Jaya kullanılarak 18 aktiviteli problemi için karşılaştırma	59
Tablo 14. 25 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri.....	61
Tablo 15. 25 aktiviteli problemi için pareto sonuçları.....	61
Tablo 16. NDS-II-Jaya kullanılarak 25 aktiviteli problemi için karşılaştırma	66
Tablo 17. NDSII tabanlı algoritmaların hiper hacim performans karşılaştırması	67

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CPM	: Kritik Yol Yöntemleri (Critical Path Method)
TCT	: Zaman Maliyet Ödünleşimi Problemi (Time-Cost Trade-Off Problem)
TCRT	: Zaman Maliyet Risk Ödünleşimi Problemi (Time-Cost-Risk Trade-Off Problem)
TCRO	: Zaman Maliyet Risk Optimizasyon (Time-Cost-Risk Optimization)
TCSRT	: Zaman Maliyet Güvenlik Risk Ödünleşim Problemi (Time-Cost- Safety Risk Trade-off Problem)
AoA	: Aktiviteler Okta (Activity on Arrow)
AoN	: Aktiviteler Düğüm Noktasında (Activity on Node)
ES	: Erken Başlama (Early Start)
EF	: Erken Bitiş (Early Finish)
LS	: Geç Başlama (Late Start)
LF	: Geç Bitiş (Late Finish)
ICR	: Direkt Olmayan Maliyet (Indirect Cost)
RL	: Güvenlik Riski Olasılığı (Likelihood of Safety Risk)
RS	: Güvenlik Riskinin Şiddeti (Severity of Safety Risk)
NDS	: Baskın Olmayan Sıralama (Non-Dominate Sorting)
NDSII	: Kalabalık Mesafe Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama (Non-Dominate Sorting II)
CD	: Kalabalık Mesafe (Crowding Distance)
MOGA	: Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multi-Objective Genetic Algorithm)
NSGAI	: Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)
NSGAIII	: Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III)
GWO	: Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization)
WOA	: Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm)
NFE	: Fonksiyon Değerlendirme Sayısı (Number of Function Evaluation)
HV	: Hiper Hacim (Hypervolume)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Başarılı bir inşaat projesi, zaman, maliyet ve kapsam arasındaki etkileşimi dikkate alarak birden fazla etkileyici faktörü dengeleyen kapsamlı bir yaklaşım gerektirir. İnşaat projeleri; farklı zorlukları, çeşitli paydaşları ve birbirinden farklı hedefleri olan karmaşık süreçlerdir. Bu projeler; binalar, yollar, köprüler, barajlar ve altyapı tesisleri gibi fiziksel yapıların planlanmasını, tasarımını, inşa edilmesini ve tamamlanmasını kapsar. İnşaat sektörü, küresel altyapının gelişmesinde önemli bir rol oynar ve ekonomik büyüme ile toplumsal kalkınmaya ciddi katkılar sağlar (Fareed vd., 2024; Mansell ve Philbin., 2020). Nassar ve Reiter (2024), inşaat sektörünün küresel ekonomik çıktının %13'ünü oluşturduğunu belirtmektedir. Bir inşaat projesinin başarısı için temel bileşenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Salem vd., 2022). Ancak sektör hâlâ maliyet aşımı, zaman gecikmeleri, kalite sorunları ve iş güvenliği gibi sürekli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. İnşaat proje planlaması, bir projenin başarıyla uygulanabilmesi için kapsamlı ve ayrıntılı bir yol haritası oluşturma sürecidir. Bu süreç; proje hedeflerinin ve amaçlarının tanımlanması, proje kapsamının belirlenmesi, kaynakların tahsis edilmesi, zaman çizelgelerinin oluşturulması ve risk yönetimi, zaman optimizasyonu ve maliyet kontrolü için stratejilerin geliştirilmesini içerir.

İnşaat projelerinin doğasında bulunan karmaşıklıkları ve belirsizlikleri etkili bir şekilde yönetmek için, zaman ve maliyet konularına ek olarak risklerin de temelden değerlendirilmesi gerekir. İklim koşulları, işgücü uzmanlığı, şantiye değişkenleri, kaynak mevcudiyeti, makineler ve proje gözetimi gibi çeşitli öngörülemeyen faktörler, bir projenin finansal sonuçlarını, zaman çizelgelerini ve genel performansını olumsuz etkileyebilir (Sakka ve El-Sayegh, 2007). Etkili proje yönetimi, kapsam, zaman, maliyet, risk, kalite, kaynaklar, çevresel ve güvenlik unsurları ile paydaş beklentileri arasındaki karmaşık ilişkilerin anlaşılması ve yönetilmesine dayanır. Projenin başarısı ve sürdürülebilirliği için bu birbirine bağlı faktörlerin dengeli bir biçimde ele alınması gerekmektedir. Proje yöneticilerinin birincil hedefi, kârı maksimize ederken gereksiz harcamaları en aza indiren kaynak planlama yaklaşımlarını uygulamaktır (Lo ve Kuo, 2013).

İnşaat projelerinin değişken niteliği, genellikle planlanmış programları bozan beklenmedik gecikmelere yol açar. Kritik olmayan Aktivitelerdeki gecikmeler genel proje süresini hemen etkilemese de, mevcut değişkenleri tüketerek program esnekliğini azaltır. Bu azalma, zamansal gecikmeler ve beklenmedik parasal tahsisler olasılığını artırarak projenin mali yükünü yükseltir. Sonuç olarak, bir projenin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanma olasılığı azalır, finansal ve operasyonel riskler artar. Zaman ve maliyetin en aza indirilmesi proje başarısı için çok önemli olsa da, bu azalmalar genellikle güvenlik risklerini artırarak inşaat planlamasında ek zorluklar ortaya çıkarır. Bazı durumlarda, proje süresinin uzaması, maliyet düşüşleri nedeniyle daha yüksek bir bolluk kaybına neden olabilir. Sonuç olarak, projeye ilişkili riskler artabilir (Al-Gahtani, 2009; Haj ve El-Sayegh, 2015; Mohammadipour ve Sadjadi, 2016). Güvenlik risklerinin azaltılması daha yüksek maliyetlere veya proje sürelerinin uzamasına yol açabileceğinden, bu faktörlerin, yani zaman, maliyet ve riskin dengelenmesi kritik önem taşır.

Projede yalnızca zaman ve maliyetle ilgili hususların yanı sıra, risk yönetimi de projeyi etkileyebilecek veya maliyetlerin fırlamasına neden olabilecek risklerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve azaltılmasını gerektirdiğinden projede önemlidir (Elkrghli ve Almansour, 2024). Risk yönetimi, inşaat projesi planlamasında çeşitli nedenlerden dolayı hayati önem taşımaktadır. Sistematiik bir değerlendirme yapılarak riskler öngörülebilir ve analiz edilebilir, böylece riskleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için proaktif önlemler alınabilir. Bu proaktif yaklaşım, proje aksaklıklarını, gecikmeleri ve beklenmedik maliyetleri en aza indirmeye yardımcı olur. Risklerin etkili bir şekilde ele alınmaması ve yönetilmemesi, zaman ve maliyet optimizasyonunda önemli sonuçlara yol açabilir. Tanımlanmayan veya yeterince değerlendirilmeyen riskler, proje gecikmelerine neden olabilir; bu da işçilik maliyetlerinin artmasına, proje sürelerinin uzamasına ve kaçırılan son tarihler için cezalara yol açabilir. Ayrıca, yönetilmeyen riskler, öngörülemeyen harcamalar veya verimsiz kaynak tahsisi nedeniyle bütçe aşımalarına neden olabilir. Ayrıca, proje kalitesini etkileyen riskler, yeniden çalışma veya düzeltici eylemlerle sonuçlanabilir ve bu da ek zaman ve maliyet etkilerine yol açabilir.

1.2. Araştırma Konusunun Literatürde Eksikliği

Proje yöneticilerinin rekabet halindeki hedefleri değerlendirmesine ve önceliklendirmesine olanak tanıyarak her bir projenin özel hedeflerine ve kısıtlamalarına dayalı olarak sonuçların optimize edilmesini kolaylaştırdıkları için ödünleşim problemler inşaat yönetiminde popüler hale gelmiştir. Proje süresi ve maliyetinin optimize edilmesi, 1960’lardan bu yana önemli bir araştırma konusu olmuştur ve bu alanda çok sayıda çalışma, zaman-maliyet takası problemini incelemiştir. Zaman-maliyet ödünleşimin ötesinde, literatürde başka önemli ödünleşim ele alınmıştır.

Güvenlik ve maliyet açısından saha yerleşim planlamasını optimize etmeye yönelik çok amaçlı bir model, El-Rayes ve Khalafallah (2005) tarafından geliştirilmiştir. Ancak bu modelde Aktivite süreleri dikkate alınmamıştır. Proje yönetiminin evrimi, zaman ve maliyetin yanı sıra risk faktörünün de optimizasyon modellerine entegrasyonuna giderek daha fazla önem vermeye başlamıştır. Lakshminarayanan vd., (2010), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) yöntemini kullanarak Zaman-Maliyet ödünleşim (TCT) içerisinde riski ele alan ilk araştırmacılardan biri olmuştur. Bu yenilikçi yaklaşım, Afshar ve Dolabi (2014) tarafından geliştirilmiş ve TCT analizine güvenlik riski de dâhil edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) kullanmış ve güvenlik risk puanını, her bir uygulama seçeneğiyle ilişkili risklerin olasılık ve şiddet düzeylerini inceleyerek hesaplamışlardır. Güvenlik riski inşaat yönetiminde önemli bir faktör olmasına rağmen, zaman-maliyet-güvenlik risk takasına odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Güvenlik riski, inşaat projelerinin kritik bir yönü olsa da, proje zamanlamasına entegrasyonu yeterince araştırılmamıştır. Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski (TCSRT) modellerine ilişkin literatür oldukça azdır ve bu durum araştırma boşluğunu ortaya koymaktadır.

1.3. Araştırmanın Amaçları

Bu çalışmada, karmaşık inşaat projelerinin yönetiminde kullanılmak üzere, Parametresiz Jaya algoritması ile Baskın Olmayan Sıralama-II (NDSII) yönteminin bütünleşik kullanımına dayalı NDSII-Jaya algoritması çok amaçlı optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Söz konusu algoritma, zaman, maliyet ve güvenlik riski gibi birbirine rakip hedefler arasında denge kurma kapasitesi sayesinde, inşaat proje yönetimi açısından oldukça uygun bir çözüm aracı olarak öne çıkmaktadır. Pareto-optimal çözümler üretebilme kapasitesi, söz konusu yöntemi birbiriyle rekabet hâlindeki unsurlar arasında denge kurmak

ve çeşitli optimal kararlar almak için etkili bir araç hâline getirmektedir. NDSII-Jaya algoritması, proje yöneticilerinin aynı anda birden fazla ve çoğu zaman birbiriyle çelişen hedefi dikkate alarak bilinçli ve çok kriterli kararlar alabilmelerine olanak tanır.

Bu çalışmanın temel amacı, NDSII-Jaya algoritmasının, inşaat projelerinde zaman-maliyet-risk ödünleşimini optimize etme konusundaki etkinliğini incelemektir. Buna ek olarak, çalışmada Kritik Yol Yöntemi (CPM) temelli bir zamanlama yaklaşımına dayanan ve MATLAB ortamında uygulanabilir esnek çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirilmesi hedeflenmektedir. CPM zamanlama yaklaşımı, proje içindeki bağımlılıkları ve kısıtları doğru şekilde tanımlamak amacıyla başlangıçtan bitişe mantıksal ilişkilerini kullanmaktadır. Çalışmanın temel amaç fonksiyonları, aynı anda proje süresini kısaltmak, toplam proje maliyetini azaltmak ve ilişkili güvenlik risklerini en aza indirmek olarak tanımlanmıştır. Bu yönüyle algoritma, proje yaşam döngüsü boyunca karar verme süreçlerini destekleyici etkili bir araç olarak tercih edilmiştir. Bu çalışma bulguları, bir yandan optimizasyon kavramına akademik düzeyde katkı sunarken, diğer yandan günümüz inşaat sektörünün karşı karşıya olduğu temel zorluklara çözüm geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmayı yönlendirmek amacıyla aşağıdaki araştırma soruları oluşturulmuştur:

- NDSII-Jaya algoritması, inşaat planlamasında proje süresi, toplam maliyet ve güvenlik riskini ne derece etkili bir şekilde minimize edebilmektedir?
- Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) probleminin çözümünde, NDSII-Jaya algoritması diğer optimizasyon yöntemlerine göre nasıl bir performans sergilemektedir?

Bu soruları yanıtlayabilmek amacıyla, çalışma kapsamında farklı karmaşıklık ve kısıt düzeylerine sahip çeşitli inşaat senaryoları üzerinde NDSII-Jaya algoritması uygulanmıştır. Algoritmanın etkinliği, çözümler üzerinden proje süresini, toplam maliyeti ve güvenlik riskini eşzamanlı olarak minimize etme başarısı analiz ederek değerlendirilmiştir. NDSII-Jaya yönteminin başarısı ise, çok amaçlı optimizasyon problemleri bağlamında yakınsama hızı, çözüm kümesindeki çeşitlilik ve genel çözüm kalitesi ölçütleri üzerinden kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, NDSII-Jaya algoritması, literatürde yaygın kullanılan diğer optimizasyon algoritmaları olan NSGA-II ve Rao-2 ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş; böylece algoritmanın avantajları ve potansiyel sınırlılıkları ortaya konulmuştur. Bu değerlendirme sürecinde, önerilen algoritmanın performansını ölçmek amacıyla, hiper hacim (hypervolume) metriği kullanılmıştır.

1.4. Çalışmanın Yapısı

1. Bölüm, inşaat sektörünü, inşaat yönetimi stratejilerini ve zaman, maliyet ve güvenlik riski arasında denge kurma zorluklarını ele almaktadır. Ayrıca, çalışmanın amacı, hedefleri ve kapsamı açıklanmıştır. Bunun yanında, inşaat proje yönetimine ilişkin temel konular üzerine bir literatür taraması sunulmaktadır. Bu bölümde zaman, maliyet ve risk yönetimi ile birlikte zaman-maliyet-risk ödünleşim problemi için yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemleri tartışılmaktadır.

2. Bölüm, araştırma yöntemini ve inşaat sektöründe zaman-maliyet-risk ödünleşim problemi problemini ele alan geçmiş vaka çalışmalarına dair kapsamlı bir incelemeyi içermektedir. Bu bölümde önerilen optimizasyon modelinin geliştirilmesi, NDSII-Jaya algoritmasının uygulanması ve algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için kullanılan performans ölçütleri detaylı olarak sunulmaktadır.

3. Bölümde, NDSII-Jaya algoritması farklı büyüklükteki dört inşaat proje vakasına uygulanarak zaman, maliyet ve güvenlik riski optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, algoritmanın Pareto-optimal çözümler üretmedeki etkinliğini değerlendirmekte, elde edilen bulguları ayrıntılı şekilde açıklamakta ve sonuçları literatürdeki alternatif yöntemlerle karşılaştırmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin karşılaştırmalı performansı daha derinlemesine incelenmekte ve diğer yaklaşımlara kıyasla güçlü ve zayıf yönleri ele alınmaktadır.

4. Bölüm, analitik sonuçlara derinlemesine bir bakış sunarak elde edilen bulguları analiz etmekte ve bu sonuçların inşaat proje planlaması ve optimizasyonu üzerindeki etkilerini tartışmaktadır.

5. Bölüm ise çalışmanın temel bulgularını özetleyerek, inşaat optimizasyonu alanına katkılarını vurgulamakta ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunmaktadır.

1.5. Proje Kısıtları

Proje kısıtları, bir projenin nasıl yürütüleceğini ve başarılı olup olmayacağını etkileyebilecek sınırlamalar ve değişkenlerdir. Bu kritik faktörler hem planlama hem de yürütme aşamalarında dikkate alınmalıdır. Üç temel proje kısıtı, “üçlü kısıt” olarak da bilinen kapsam, zaman ve maliyet. (Kerzner ve Saladis, 2017). Daha modern çerçeveler bu kavramı geliştirerek kalite, risk ve kaynakları ek kısıtlar olarak dahil etmiş ve bir “kısıtlar altıgeni” tanımlamıştır (PMI, 2021).

- **Kapsam Kısıtı:** Kapsam kısıtı, projenin gerekliliklerini ve tamamlanması gereken görevleri belirler. Proje hedefleri, çıktıları ve tamamlanacak işin kapsamından oluşur. Kapsam kısıtının yönetilmesi, proje kapsamının oluşturulmasını, kapsam ayarlamalarının yönetilmesini ve proje çıktılarının paydaş beklentilerini karşılamanın sağlanmasını içerir (PMI, 2021).

- **Zaman Kısıtı:** Bu, projenin programını ve tamamlanması için zaman çerçevesini ifade eder. Projenin kilometre taşlarını, son teslim tarihlerini ve genel proje süresini ana hatlarıyla belirtir. Zamanı yönetmek, faydalı zamanlamayı, aktivite sıralamasını ve proje çıktılarının zamanında tamamlanmasını içerir (PMI, 2021).

- **Maliyet Kısıtı:** Maliyet kısıtları, proje bütçesi ve proje aktivitei için mevcut mali kaynakları ifade eder. İşçilik, malzeme, ekipman ve diğer proje giderlerinin beklenen maliyetlerini içerir. Bütçeleme, maliyet tahmini, harcama takibi ve maliyet kontrol yöntemlerinin uygulanması, maliyet kısıtını yönetmek için gereklidir (PMI, 2021).

- **Kalite Kısıtı:** Bir projenin kalitesi, paydaşların beklentilerini ne kadar iyi karşıladığına ve kriterleri ne kadar iyi belirlediğine göre belirlenir. Hem ürün kalitesini (teslim edilebilir özellikler) hem de süreç kalitesini (proje yönetiminin etkinliği) içerir (Oakland ve Marosszeky, 2023).

- **Risk Kısıtı:** Risk, meydana gelmeleri halinde proje hedefleri üzerinde olumlu veya olumsuz bir etkiye sahip olabilecek bilinmeyen olayları veya koşulları ifade eder. Risk yönetimi, proje yaşam döngüsü boyunca risklerin tanımlanmasını, değerlendirilmesini, bunlarla başa çıkılmasını ve izlenmesini içerir. (PMI, 2021).

- **Kaynak kısıtlaması:** Kaynak kısıtları, işi bitirmek için gereken insan kaynaklarını, ekipmanı, malzemeleri ve bilgiyi içerir. Kaynak kısıtları, projelerin ve sonuçların tamamlanmasını etkileyebilecek belirli kaynakların kullanılabilirliğini veya kapasitesini sınırlar (Eastman vd., 2021).

Bu kısıtların birbiriyle bağlantılı olduğunu ve bir kısıttaki değişikliğin diğerlerini de etkileyebileceğini dikkate almak önemlidir. Örneğin, projenin zaman süresinin uzatılması maliyetleri artırabilir veya proje kapsamının ayarlanmasını gerektirebilir. Ayrıca kalite, kaynaklar ve risk gibi diğer kısıtlar da proje başarısını etkileyebilir. Bu kısıtları etkili bir şekilde yönetmek, proje önceliklerine ve paydaş gereksinimlerine dayalı dengeli bir yaklaşım ve ödünleşimler gerektirir. Proje kısıtlarını anlamak ve yönetmek, bu kısıtları göz önünde bulundurarak ve uygun proje yönetimi tekniklerini kullanarak proje başarısı için çok önemlidir (Kerzner, H., 2017).



Şekil 1. Proje kısıtları

1.6. Zaman Yönetimi

Proje yönetiminde, etkili zaman yönetimi çok önemli bir rol oynar. Belirlenen zaman dilimi içinde tamamlanmasını sağlamak için proje aktivitelerinin planlanması, programlanması ve izlenmesini kapsar. Bu temel beceri, son teslim tarihlerini verimli bir şekilde karşılamak için görevleri ve kaynakları organize etmeyi içerir. Bir projenin süresi boyunca, zaman kaynağı kullanımı bir dizi strateji, metodoloji ve prosedürel çerçevenin uygulanması yoluyla geliştirilir ve kontrol edilir (PMI, 2021).

İnşaat zamanı optimizasyonu, proje sürelerini kısaltmak ve belirlenen son teslim tarihlerini karşılamak için kaynakların ve aktivitelerin stratejik yönetimini kapsar. Bu yaklaşım, kritik yol analizi, ayrıntılı programlama, kaynak tahsisi dengelemesi ve sektörde kanıtlanmış uygulamaların uygulanması gibi çeşitli metodolojileri içerir. İnşaat projeleri, bu teknikleri uygulayarak genel üretkenliği artırmayı ve olası gecikmeleri azaltmayı ve nihayetinde inşaat sürecini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. PMI(2021), proje zaman yönetimi olarak da bilinen proje çizelgelemenin, projelerin zamanında tamamlanmasını sağlamak için gerekli süreçleri kapsadığını belirtmektedir. Bu yöntemler aşağıdakileri içerir:

1. Aktiviteleri Sıraya Koyma: Bu süreç, proje görevleri arasında sıralı bağlantılar ve karşılıklı ilişkiler kurar. Proje hedeflerine ulaşmak için aktivitelerin hangi sırayla

gerçekleştirilmesi gerektiğini belirler ve projenin programını etkileyebilecek potansiyel kısıtlamaları veya bağımlılıkları vurgular.

2. Aktivite Sürelerinin Tahmini: Bu süreç, uzman değerlendirmeleri, önceki verilerin analizi, benzer projelerle karşılaştırmalar veya alternatif tahmin teknikleri gibi çeşitli metodolojiler aracılığıyla bireysel aktiviteler için gereken sürenin tahmin edilmesini içerir.
3. Takvim Geliştirme: Proje programı, aktivitelerin sırası, ilgili süreleri ve kaynakların mevcudiyeti entegre edilerek oluşturulur. Bu entegrasyon süreci, proje için kapsamlı bir zaman çizelgesi oluşturur. Bu yaklaşımda, farklı görevlerin başlangıç ve bitiş tarihlerini belirlemek için kritik yol analizi, zamanlama algoritmaları ve proje yönetimi yazılımı gibi çeşitli yöntemler kullanılır.
4. Program Kontrolü: Bu süreç, projenin uygulanması süresince zaman çizelgesinin izlenmesini ve düzenlenmesini kapsamaktadır. Tahmini programa karşı gerçek ilerlemenin analiz edilmesini, sapmaların veya gecikmelerin belirlenmesini ve projeyi amaçlanan planla yeniden hizalamak için düzeltici önlemlerin uygulanmasını kapsar.

Başarılı bir proje yönetimi, etkin zaman yönetimine doğrudan bağlıdır. Zaman yönetimi süreci, projenin zamanında tamamlanmasını güvence altına almak amacıyla zaman çizelgesinin sürekli olarak izlenmesini, değerlendirilmesini ve gerektiğinde revize edilmesini kapsar. Bu süreç yalnızca aktivitelerin sürelerinin takibiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda proje zaman çizelgesini etkileyebilecek çeşitli unsurların da dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu unsurlar arasında kaynakların kullanılabilirliği, görevler arasındaki bağımlılıklar, yapısal ve çevresel sınırlılıklar ile olası riskler yer almaktadır.

1.6.1. Kritik Yol Yöntemleri

Kelley Jr. ve Walker (1959), Kritik Yol Yöntemleri'ni (CPM) geliştirmiştir. CPM yöntemi, iki farklı ağ modelini temel alır: Aktiviteler Okta (AoA) ve Aktiviteler Düğüm Noktasında (AoN). AoA diyagramlarında aktiviteler oklarla temsil edilerek düğümler arasında bağlantı kurulur; buna karşın AoN diyagramlarında her bir aktivite doğrudan bir düğüm olarak gösterilir. Aktiviteler Düğüm Noktasında (AoN) yaklaşımı, aktiviteler arasındaki ilişkilerin gösteriminde daha fazla esneklik sunar ve Aktiviteler Okta (AoA) yöntemine kıyasla hesaplama karmaşıklığını azaltır. Bu özellikleri sayesinde, proje yapısının

daha verimli şekilde temsil edilmesini ve zaman çizelgesinin daha kolay analiz edilmesini mümkün kılar.

Bu çalışmada yapım aktivitelerinin çizelgelenmesi için düğüm üzerinde aktivite (AoN) ağı metodolojisi kullanılmıştır. AoN yönteminin uygulanmasında dört tarihsel bilgi kritik öneme sahiptir: Erken Başlama Tarihi (ES), Erken Bitiş Tarihi (EF), Geç Başlama Tarihi (LS) ve Geç Bitiş Tarihi (LF). ES, bir aktivitenin başlayabileceği en erken tarihi ifade ederken; EF, söz konusu aktivitenin tamamlanabileceği en erken tarihi belirtir. Buna karşılık, LS bir aktivitenin projeyi geciktirmeden başlayabileceği en geç tarihi; LF ise tamamlanması gereken en son tarihi göstermektedir. AoN yöntemi, başlangıçtan başlama, bitişten başlama ve bitişten bitişe gibi çeşitli aktivite ilişkilerinin modellemeye dahil edilmesini sağlar. Bu çalışmada aktiviteler arasında bitiş-başlangıç ilişkisi kullanılmıştır. Bu sayede, proje dinamiklerinin daha bütüncül ve ayrıntılı biçimde analiz edilmesi mümkün olur. Tablo 1'de Kritik Yol Yöntemlerinin (CPM) güçlü yönleri ve sınırlamaları ile ilgili genel bir bakış sunulmaktadır.

Tablo 1. Kritik yol yöntemlerinin (CPM) avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Proje planlama ve zamanlamada etkinlik sağlar	Karmaşık projelerde ilerlemenin izlenmesi zor olabilir
Kritik ve kritik olmayan aktiviteleri belirler	Doğru tahminlere yüksek düzeyde bağımlıdır
Her bir aktivite için başlama/bitiş tarihlerini ve serbest zamanları belirler	Güncelleme ve sürdürme süreci zaman alıcıdır
Kaynakların daha etkin dağıtılmasını sağlar	"Doğru uygulama uzmanlık gerektirir"

1.7. Maliyet Yönetimi

Maliyet yönetimi, proje maliyetlerinin planlanması, tahmin edilmesi, bütçelenmesi ve kontrol edilmesine odaklanan proje yönetiminin önemli bir yönüdür. Proje maliyetlerini yönetmek için çeşitli araçların, tekniklerin ve süreçlerin uygulanmasını içerir, istenen

hedefleri, kalite standartlarını, güvenlik gereksinimlerini karşılarken ve projeyi onaylanan bütçe dahilinde tamamlarken bunların en aza indirilmesini sağlar. Proje yönetiminde maliyet yönetimi, projenin bütçe kısıtlamaları içinde kalmasını sağlamak için proje maliyetlerinin sürekli olarak izlenmesini, analiz edilmesini ve ayarlanmasını gerektirir. Kaynak oranları, enflasyon, değişiklik talepleri ve proje bütçesini etkileyebilecek maliyetle ilgili diğer riskler gibi faktörlerin dikkate alınmasını içerir. Bütçe kısıtlamaları dahilinde istenen proje sonuçlarına ulaşmak için değer mühendisliği, yaşam döngüsü maliyetlendirmesi, maliyet kontrol önlemleri ve etkili tedarik stratejileri gibi teknikleri kapsar (Odeh ve Battaineh, 2002). Bu maliyet yönetimi süreçleri şunları içerir (PMI, 2021).

- **Maliyet Yönetimi Planlaması:** Bu süreç, proje harcamalarının planlanması, tahmin edilmesi, bütçelendirilmesi ve denetlenmesine yönelik bütüncül bir stratejinin oluşturulmasını kapsamaktadır. Proje süresince etkin maliyet yönetimini sağlamak amacıyla izlenecek kurallar, yöntemler ve yönergeler bu aşamada belirlenmektedir.
- **Maliyet Tahmini:** Bu aşamada, proje ekibi, proje aktivitelerinin gerçekleştirilmesi için gerekli kaynaklara ilişkin maliyetleri hesaplamaktadır. Tahmin edilen bu maliyetler; iş gücü, malzeme, ekipman, altyapı ve proje uygulamasına dair diğer tüm gider kalemlerini içermektedir.
- **Bütçenin Oluşturulması:** Bütçeleme süreci, belirli aktivitelere ya da iş bileşenlerine ait tahmini maliyetlerin bir araya getirilerek kapsamlı bir proje bütçesinin oluşturulmasını kapsamaktadır. Bu aşamada, beklenmedik durumlara karşı ayrılan yedek ödenekler, yönetim payları ve diğer finansal güvenlik tedbirleri de dikkate alınmaktadır. Nihai bütçe, projenin uygulanması için onaylanmış toplam mali kaynağı temsil etmektedir.
- **Maliyet Kontrolü:** Maliyet denetimi süreci, proje yürütme aşamasında harcamaların izlenmesi, kayıt altına alınması ve kontrol altına alınmasına odaklanmaktadır. Bu kapsamda, gerçekleşen harcamalar ile onaylanmış bütçe karşılaştırılarak olası sapmalar tespit edilmekte ve bütçe aşımı ya da maliyet farklılıklarını gidermeye yönelik düzeltici önlemler alınmaktadır.

Yapı projelerinde harcamalar genellikle doğrudan ve dolaylı maliyetler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

1.7.1. Doğrudan Maliyet

Doğrudan maliyetler, belirli proje aktivitelerinin yürütülmesi için münhasıran kullanılan kaynaklara ilişkin harcamaları kapsamaktadır. Bu harcamalar; malzeme, iş gücü, ekipman ve taşeron hizmetlerine ilişkin giderleri içerebilir. Bir projenin toplam doğrudan maliyeti, tüm bileşen aktivitelerinin doğrudan maliyetlerinin toplanmasıyla hesaplanmaktadır (Que, 2002). Aktivitelerin bireysel doğrudan maliyetleri ise; şantiye koşulları, kaynak verimliliği ve uygulanan inşaat yöntemleri gibi etkenlerden etkilenmektedir.

1.7.2. Dolaylı Maliyet

Dolaylı maliyetler, belirli proje aktivitelerine doğrudan atfedilememekle birlikte, projenin yürütülmesi ve yönetilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Zaman temelli ilişkilerine göre dolaylı maliyetler, zaman bağımlı ve zaman bağımsız maliyetler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Zaman bağımlı dolaylı maliyetler; elektrik, kira ve maaş gibi giderleri kapsamakta olup, proje süresinin uzamasıyla birlikte artış göstermektedir. Buna karşılık, zaman bağımsız dolaylı maliyetler; vergi ve sigorta gibi giderleri içermekte ve proje süresinden bağımsız olarak sabit kalmaktadır.

Dolaylı maliyetler ayrıca, proje genel giderleri ve genel yönetim giderleri olmak üzere iki alt grupta sınıflandırılmaktadır. Proje genel giderleri, yalnızca belirli bir projeye özgü olup; personel maaşları, sarf malzemeleri, mühendislik testleri, ruhsat ve izinler, danışmanlık hizmetleri ve çizimler gibi kalemleri kapsamaktadır. Genel yönetim giderleri ise, birden fazla projeye yayılan ve paylaşılan maliyetleri ifade etmekte olup; genel ofis harcamaları, yönetici maaşları, ofis kirası ve ofis malzemeleri gibi unsurları içermektedir.

Hem doğrudan hem de dolaylı maliyetlerin doğru bir şekilde anlaşılması ve etkin şekilde yönetilmesi, kapsamlı proje maliyet kontrolü sağlamak ve proje başarısını garanti altına almak açısından kritik öneme sahiptir.

1.8. Risk Yönetimi

Yapım projeleri bağlamında risk, proje hedefleri üzerinde olumsuz etki yaratabilecek olay ya da durumların meydana gelme olasılığına işaret etmektedir. Risk, gerçekleşmesi hâlinde projenin hedefleri üzerinde olumlu ya da olumsuz etkiler doğurabilecek belirsiz bir

olay veya koşul olarak tanımlanmaktadır (PMI, 2021). Projede belirli bir eylem planının izlenmesine bağlı olarak ortaya çıkabilecek mali kayıp ya da kazanç, fiziksel hasar ya da yaralanma ile zaman gecikmeleri gibi olasılıklar, risk kavramı kapsamında değerlendirilmektedir (Chapman, 1991).

Etkili risk yönetimi, proje ekiplerinin potansiyel riskleri önceden tanımlaması ve bu risklere karşı uygun azaltım stratejileri geliştirmesini gerektirir. Bu yaklaşım; maliyetli kesintilerin, bütçe aşımının ve zaman gecikmelerinin olasılığını azaltarak, projenin başarıya ulaşma şansını artırmaktadır (Panahi vd., 2023; Iqbal vd., 2024).

Riskler, farklı türlere, sınıflandırmalara ya da kategorilere ayrılabilir. Bu bağlamda öne çıkan temel başlıca hususlar şu şekilde özetlenebilir:

- **Bilinen Riskler:** Bilinen riskler, tüm inşaat projelerinde sıklıkla karşılaşılan ve kaçınılmaz olarak değerlendirilen risk olaylarıdır. Bu tür risklere, malzeme maliyetlerinde yaşanan küçük dalgalanmalar ya da iş gücü verimliliğindeki sınırlı değişkenlikler örnek verilebilir (Smith vd., 2006). Bu durum, riskin bilişsel durumu olarak tanımlanmakta olup; risk kaynağının tanımlandığı ve risk olayının gerçekleşme olasılığına ilişkin bir değer atandığı durumu ifade eder (Winch, 2012).
- **Bilinen bilinmeyen Riskler:** Bilinen bilinmeyen riskler, kısmen öngörülebilir risk olaylarıdır; yani bu risklere ilişkin ya gerçekleşme olasılığı ya da etkisi hakkında sınırlı da olsa bilgi mevcuttur (Smith vd., 2006). Bu durum, belirsizlik hâlinin bilişsel durumu olarak adlandırılır ve en azından risk kaynağının tanımlanmış olduğu durumları ifade eder.
- **Bilinmeyen Bilinmeyen Riskler:** Bilinmeyen bilinmeyen riskler, belirsizlik durumunun bilişsel bir koşulu olup, ilgili kişi veya tarafın risk kaynağı ve olasılıkları hakkında bilgi sahibi olduğu hâlde bu bilgiyi paylaşmaması durumunu ifade eder. Bu tür durumlarda risk kaynağı tanımlanamamış olduğundan, risk olayı yalnızca ortaya çıktığında fark edilebilmektedir (Winch, 2012).

Dolayısıyla, bu tür risk olayları, proje ekibindeki en bilgili ve deneyimli kişilerin dahi gerçekleşme olasılığı ya da etkisini öngöremeyeceği türden belirsizlikleri kapsamaktadır (Smith vd., 2006).

Risk optimizasyonu, tanımlanmış risklerin potansiyel olumsuz etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan bir süreçtir. Olasılıksal risk değerlendirmesi, senaryo analizi ve benzetim modellemesi gibi ileri düzey teknikler, risklerin nicel olarak analiz edilmesini ve olası etkilerinin ölçülmesini sağlayarak, karar verme süreçlerinin daha bilinçli yürütülmesine

olarak tanımlanmaktadır (Ward ve Chapman, 2003) Tipik bir risk yönetim süreci, aşağıda belirtilen ardışık adımlardan oluşmaktadır (Winegard ve Warhoe, 2003),

1. Risk Tanımlanması
2. Risk Analizisi
3. Risk Değerlendirmesi
4. Risk Yönetim Planının Uygulanması
5. Risk İzlenmesi ve Denetimi



Şekil 2. Risk yönetim süreci adımları

1.8.1. Risk Tanımlanması

Bu aşama, projeyi etkileyebilecek potansiyel risklerin belirlenmesini ve belgelenmesini kapsamaktadır. İnşaat sektörü, doğası gereği tedarik zinciri gecikmeleri, iş gücü piyasasındaki dalgalanmalar ve öngörülemeyen hava koşulları gibi çeşitli risklere açık bir yapı arz etmektedir (Babalola vd., 2023). Tasarımdaki değişiklikler, kaynakların mevcudiyeti, ekonomik koşullardaki dalgalanmalar ve paydaş etkileri bu tür risklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Zaman-maliyet ilişkili risklerin değerlendirilmesinde ekonomik ortam değişiklikleri, proje gecikmeleri, yetersiz teknik personel rezervleri, uygunsuz müdahaleler ve malzeme tedarikindeki değişiklikler gibi inşaat projelerinde sıkça

karşılaşılan önemli risk türlerini örnek olarak sıralamıştır (El-Sayegh, 2008). İnşaat planlaması sürecinde ortaya çıkabilecek bazı risk örnekleri aşağıda sunulmaktadır.

- Tasarım değişiklikleri
- Hava koşulları
- Kaynak kullanılabilirliği
- İzin ve düzenleme sorunları
- Saha koşulları
- İş Sağlığı ve Güvenliği Tehlikeleri
- Yüklenici Performansı
- Finansal Riskler

1.8.2. Risk Analizi

Risk analizi, belirlenen risklerin meydana gelme olasılıklarının, muhtemel etkilerinin ve genel önem düzeylerinin analiz edilmesini kapsamaktadır. Bu değerlendirme süreci, risklerin proje hedefleri üzerindeki olası etkilerine göre önceliklendirilmesine olanak tanımaktadır. Risk analizinin temel amacı, risk senaryolarını kapsamlı bir biçimde tanımlamak ve bu senaryoların öncelik düzeylerini belirlemektir (Schieg, 2006). Risk analiziye ilişkin literatürde, değerlendirme yaklaşımları genel olarak iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır: nitel analiz ve nicel analiz.

Nitel analiz; görüşmeler, kontrol listeleri ve beyin fırtınası oturumları gibi yöntemleri içerirken, nicel analiz ise veri odaklı bir yaklaşımı esas almaktadır (Banaitene ve Banaitis, 2012). Nicel risk değerlendirmesi, her bir riskin etkisini yüksekten düşüğe doğru bir spektrumda tanımlamakta ve bu riskin meydana gelme olasılığını belirlemektedir. Buna karşın, nitel risk değerlendirmesi genellikle risklerin etkilerinin değerlendirilmesini ve öne çıkan risklerin daha ayrıntılı şekilde incelenebilmesi amacıyla listelerin oluşturulmasını içermektedir (Zou vd., 2007). Her iki analiz türü de risklerin bireysel düzeyde ele alınmasını gerektirmekte olup, bu analizler sırasında söz konusu risklerin etkileri arasındaki karşılıklı ilişkiler de dikkate alınmalıdır (Schieg, 2006). Öngörülebilir başlıca risk faktörlerinin nicel olarak ölçülmesi ve ayrıntılı şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Potansiyel risk etkileri arasında; proje süresinin uzamasına bağlı olarak ortaya çıkan gecikmeler, üretkenlikte azalma ve aktivite maliyetlerinde artış gibi unsurlar yer almaktadır. Kaynakların genellikle birden fazla projede ortak şekilde kullanılması nedeniyle, bir projede yaşanan

aksaklıklar diğer projelerde de gecikmelere yol açabilmektedir. Ayrıca, alt yükleniciler de gecikmelere katkıda bulunabilmektedir (Schatterman vd., 2008).

Potansiyel risk etkileri arasında; proje süresinin uzamasına bağlı olarak ortaya çıkan gecikmeler, üretkenlikte azalma, aktivite maliyetlerinde artış ve iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili risklerin artması gibi unsurlar yer almaktadır. Güvenlik riskleri, hem çalışanların fiziksel bütünlüğünü tehdit etmekte hem de iş kazalarına bağlı olarak projede beklenmedik duraksamalara neden olabilmektedir. Kaynakların genellikle birden fazla projede ortak şekilde kullanılması nedeniyle, bir projede yaşanan aksaklıklar diğer projelerde de gecikmelere yol açabilmektedir. Ayrıca, alt yükleniciler de hem güvenlik uygulamalarındaki yetersizlikleriyle hem de operasyonel gecikmeleriyle riskleri artırabilmektedir.

1.8.3. Risklerin Değerlendirmesi

Risk değerlendirme, bir inşaat projesini etkileyebilecek potansiyel risklerin veya belirsizliklerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Bu süreç; risklerin belirlenmesini, nicel olarak ölçülmesini ve proje hedeflerine etkileri ile gerçekleşme olasılıklarına göre önceliklendirilmesini kapsamaktadır (PMI, 2021). Risk değerlendirme, inşaat projelerinin planlama aşamasında kritik bir rol üstlenmekte olup, projenin yaşam döngüsü boyunca risklerin belirlenmesine, değerlendirilmesine ve yönetilmesine yönelik proaktif bir yaklaşım sunmaktadır.

Potansiyel risklerin önceden tespit edilerek ele alınması sayesinde, inşaat projesine dâhil olan paydaşlar olumsuz sonuçları en aza indirebilir, proje çıktılarını optimize edebilir ve başarılı bir proje teslimi sağlayabilir. Bu bölüm, risk değerlendirmesinin inşaat proje planlamasındaki önemini vurgulamakta, risklerin etkin şekilde ele alınmaması durumunda ortaya çıkabilecek muhtemel sonuçlara dikkat çekmektedir. Ayrıca, kapsamlı bir risk değerlendirme sürecinin yürütülmesinden elde edilen faydalar da ele alınmaktadır.

1.8.4. Risk Yönetim Planının Uygulanması

Risk Yönetim Planının Uygulanması, PMI (2021)'e göre, proje hedeflerine yönelik tehditlerin azaltılması ve fırsatların artırılması amacıyla çeşitli seçeneklerin geliştirilmesi ve eylemlerin belirlenmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. Literatürde, bir projeye ilişkin risk maruziyetini azaltmak amacıyla uygulanabilecek başlıca dört risk hafifletme (risk azaltma) stratejisinden söz edilmektedir.

1.Kaçınma

Bu yaklaşım, riskleri ortadan kaldırmak amacıyla proje planlarında değişiklik yapılmasını içermektedir. Bu kapsamda, tanınmayan taşeronlardan kaçınılması, proje süresinin uzatılması veya proje kapsamının daraltılması (Karimiazari vd., 2010; Potts, 2008) gibi önlemler uygulanabilmektedir. Ancak bu yaklaşım, projelerin askıya alınmasına yol açma potansiyeli nedeniyle, inşaat sektörü açısından çoğunlukla uygulanabilir bulunmamaktadır (Fateminia ve diğ., 2019; Okate ve Kakade, 2019; Tembo-Silungwe ve Khatle, 2017).

2.Aktarım

Bu risk yönetimi stratejisi, riskin sorumluluğunun ve potansiyel sonuçlarının, bu riskle başa çıkma kapasitesine ve yükümlülüğünü üstlenme isteğine sahip dış taraflara devredilmesini içermektedir (Mhetre vd., 2016). Bu stratejinin temel amacı, söz konusu riskin, onu en etkin biçimde yönetebilecek tarafa tahsis edilmesini ve bu yolla projenin risk yönetimi açısından daha dayanıklı hâle getirilmesini sağlamaktır (Mhetre vd., 2016).

3.Azaltma

Riskin azaltılması, risklerin olasılığını ya da etkisini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda; alternatif inşaat tekniklerinin kullanımı, geliştirilmiş planlama yaklaşımları (Flanagan vd., 2007), kalite kontrol uygulamaları veya kaynakların yeniden tahsisi (PMI, 2021; Cooper vd., 2005) gibi yöntemlere başvurulmaktadır. Bununla birlikte, Flanagan vd. (2007), risk azaltım tekniklerinin yalnızca sınırlı sayıda kullanılabileceğini ve aşırı kullanımın projenin yönetilebilirliğini zora sokabileceğini belirtmektedir. Tanojo vd. (2018), uzun vadede fayda sağlayabilecek maliyetlerin eklenmesinin inşaat risklerini azaltmak için etkili bir strateji olduğunu öne sürmektedir.

4.Kabul

Bu risk yanıt stratejisi, diğer yöntemlerin uygulanabilir olmadığı durumlarda veya riskin büyüklüğünün alternatif müdahaleleri pratik olmaktan çıkardığı hâllerde tercih edilmektedir (Mhetre vd., 2016). Bu yaklaşım, mevcut proje planlarının aynen sürdürülmesine ve riskle başa çıkmak amacıyla herhangi bir değişiklik yapılmamasına ya da başka bir yanıt stratejisinin uygulanmamasına yönelik bilinçli bir tercih anlamına gelir (Cooper, 2005).

1.8.5. Risk İzlenmesi ve Denetimi

Bir projenin tüm yaşam döngüsü boyunca risk izleme aktivitesi sürekli ve dinamik bir süreç olarak yürütülmektedir. Bu süreç, daha önce tanımlanmış risklerin düzenli olarak gözden geçirilmesini ve yeni ortaya çıkan risklerin belirlenmesini içermektedir. Risklerin düzenli şekilde izlenmesi, proje ekiplerine mevcut risk azaltma stratejilerinin etkinliğini değerlendirme ve gerektiğinde bu stratejilerde değişiklik yapma imkânı tanımaktadır. Potansiyel risklerin sürekli gözetimi ve analizi, risk yönetimi sürecinin etkili biçimde yürütülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşım, yeni gelişen risklerin zamanında tespit edilmesini ve uygun müdahale yöntemlerinin hızla uygulanmasını güvence altına alır. Proje yöneticileri, risk tedavi eylemleri için önceliklendirilmiş başlıca risklerin kaydını tutmalı; bu kayıt, yönetim toplantılarında temel bir karar alma aracı olarak işlev görmelidir (Cooper, 2005). Risk yönetimi sürecinin bu son aşaması, önceki aşamalar kadar büyük öneme sahiptir. Proje süreci ilerledikçe yeni bilgiler edinildikçe, risklerin gerçekleşme olasılığı ve potansiyel etkisi yeniden değerlendirilebilir. Olası bir risk olayı gerçekleşmeden ortadan kalktığında ise, bu risk risk sicilinden çıkarılabilir (Winch, 2012).

Sağlam bir risk yönetimi stratejisi, inşaat süreci için bir güvenlik ağı görevi görerek sorunların öngörülmesine, önceliklendirilmesine ve önemli sorunlara dönüşmeden önce harekete geçilmesine yardımcı olur. Güçlü bir risk yönetimi ile inşaat ekipleri aşağıdakiler için daha donanımlı hale gelir.

- Güvenlik tehlikelerini en aza indirmek, çalışanları korumak ve maliyetli yasal sonuçlardan kaçınmak.
- Gecikmelere veya beklenmedik masraflara neden olabilecek riskleri ele alarak projeleri yolunda ve bütçe dahilinde tutmak.
- Yapı yönetmeliklerine, güvenlik düzenlemelerine ve sözleşmeden doğan yükümlülöklere uyulmasını sağlayarak yasal anlaşmazlıklardan kaçınmak.

Risk yönetimi olmadan inşaat projeleri, operasyonları ciddi şekilde aksatabilecek ve hem kısa hem de uzun vadeli proje hedeflerini etkileyebilecek çeşitli öngörölemeyen zorluklara karşı savunmasız kalır (Peters, 2023).

1.9. Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimine Yönelik Önceki Araştırmalar

Ödünleşim optimizasyon problemleri, özellikle zaman ve maliyet ödünleşimi (TCT) içeren modeller, proje başarısı açısından kritik önem taşıdığı için inşaat yönetimi literatüründe kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Her ne kadar risk faktörlerinin proje çıktıları üzerindeki etkisi önemli olsa ve risk yönetimi performans göstergeleri açısından temel bir unsur olarak kabul edilse de, risk bileşenlerinin bütüncül ödünleşim modellerine sistematik biçimde dahil edildiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Tablo 2’de özetlendiği üzere, çeşitli TCRT çalışmalarında farklı risk türleri dikkate alınmıştır:

1. Güvenlik riski, genellikle, nitel aktivite temelli güvenlik riski QASR tekniği gibi nitel yöntemlerle değerlendirilmiştir.
2. Bolluk/Kaynak riski, zamanlama esnekliği ve kaynak mevcudiyetine ilişkin belirsizlikleri ifade etmektedir.
3. Ağırlıklı risk puanları, riskleri ayrı ayrı sınıflandırmadan, toplulaştırılmış indeksler üzerinden hesaplanmaktadır.
4. Olasılık-Etki Yaklaşımları, risk şiddetini belirlemek için nicel puanlama yöntemleri kullanmaktadır.

Tablo 2. TCRT çalışmalarında risk türlerinin sınıflandırılması

Risk Türü	Açıklama	İlgili Çalışmalar
Güvenlik Riski	Nitel aktivite temelli güvenlik riski (QASR) yöntemiyle değerlendirilmiştir.	Afshar ve Zolfaghar Dolabi (2014); Sharma ve Trivedi (2020) Kaveh vd. (2021); Panwar ve Jha (2021); Sharma ve Trivedi (2022, 2023a, 2023b); K. Sharma vd. (2023); Son ve Khoi (2023); Jain ve Dubey (2023); Zhan vd. (2024); Yılmaz ve Dede (2024)
Bolluk ve Kaynak Riski	Zamanlama esnekliği ve kaynak mevcudiyetine ilişkin risklerdir.	Tran ve Long (2018); Duc Long vd. (2019); Shishehgarhaneh vd. (2022); Anh Nguyen vd. (2023)
Ağırlıklı Risk	Belirli bir sınıflandırma olmadan, genelleştirilmiş risk skorları kullanılmıştır.	Lakshminarayanan vd. (2010); Amoozad Mahdiraji vd. (2016); Alzarrad vd. (2019); Hosseinzadeh vd. (2020); Askarifard vd. (2021); Banihashemi ve Khalilzadeh (2022)
Olasılık ve Etki Çarpımı	Olasılık ve etki puanlarının çarpımıyla sayısal olarak değerlendirilmiştir.	Mohammadipour ve Sadjadi (2016); Vijayan vd. (2018); Mahmoudi ve Feylizadeh (2018)

Lakshminarayanan vd. (2010) karınca kolonisi optimizasyonu yaklaşımını kullanarak zaman-maliyet risk yönetimi için çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunmuşlardır. Çalışmalarının temel amacı, sistematik ve algoritmik yaklaşımlarla proje zamanı maliyetini ve riskini minimize etmektir. Karınca kolonisi optimizasyon algoritması (ACO), grafikler aracılığıyla etkili yollar belirleyerek basitleştirilebilen hesaplama problemleriyle başa çıkmak için kullanılan olasılıksal bir tekniktir. Karınca kolonisi optimizasyon algoritmaları, karıncaların neredeyse kör olmalarına rağmen yuvaları ile bir besin kaynağı arasındaki en kısa rotayı bulabilmelerinden esinlenmiştir (Dorigo,1992). Önerilen algorithmadan elde edilen zaman ve maliyet için optimal çözüm, MAWA (modifiye adaptif ağırlık yaklaşımı) ve MOACO (çok amaçlı karınca kolonisi optimizasyonu) yaklaşımlarından elde edilen problem çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelin MAWA ile karşılaştırıldığında etkin sonuçlar verdiği, MOACO ile karşılaştırıldığında ise benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Afshar ve Dolabi, 2014 tarafından gerçekleştirilen çalışma, zaman, maliyet ve genel güvenlik riskini entegre eden çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada güvenlik analizini ayrık TCT problemine dahil etmek için Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) tabanlı bir model önermek ve baskın olmayan çözümlerden oluşan pareto-optimal cephe sunmak amaçlanmaktadır. Toplam 18 aktivitei içeren bir vaka çalışması iki farklı senaryo altında analiz edilmiştir. İlk senaryoda zaman ve maliyet minimize edilirken, ikinci senaryoda zaman, maliyet ve güvenlik riskinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Her iki senaryoda da optimum performans elde etmek için genetik algoritma (GA) parametreleri dikkatlice ayarlanmıştır. Sonuçlar, Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Optimizasyon modelinin geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha geniş bir baskın olmayan çözüm yelpazesi sağladığını göstermiştir. Ayrıca, güvenlik riski değerlendirmelerinin entegrasyonu, model içindeki genel güvenlik riski yönetimini önemli ölçüde geliştirmiş ve zaman ve maliyet optimizasyonunun yanı sıra güvenlik endişelerini ele almadaki etkinliğini göstermiştir.

Tran ve Long (2018), zaman-maliyet-risk ödünleşimi için yeni bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Model, toplam bolluk ve kaynak kontrolünü dikkate alarak program esnekliğinin geliştirilmesine ve proje gecikme risklerinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Uyarlanabilir çok amaçlı diferansiyel evrim (AMODE) adı verilen algoritma, TCRT problemini çözmek için yazarlar tarafından önerilmiştir. AMODE, optimizasyon sürecinin tamamen öngörülemez veya tamamen açgözlü olmasını önlemek

için uyarlanabilir bir mutasyon stratejisi kullanarak popülasyon tabanlı bir arama yaklaşımını geliştirmektedir. Yazarlar, AMODE tarafından sağlanan Pareto cephesinin, projenin gereksinimlerini karşılayan esnek bir programı korurken, zaman-maliyet-risk ödünleşimi problemine etkili bir çözüm sunduğunu keşfetmişlerdir. Ayrıca sonuçlar, önerilen AMODE modelinin özellik çeşitliliği, uzlaşma çözümleri ve memnuniyet derecesi açısından yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan daha iyi bir Pareto cephesi ürettiğini göstermektedir.

Duc Long vd. (2019), inşaat projelerindeki Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi problemlerini çözmek için Çok Amaçlı Yapay Arı Kolonisi Diferansiyel Evrimi (MOABCDE) adlı hibrit çok amaçlı optimizasyon algoritmasını kullanmıştır. MOABCDE, Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ve Diferansiyel Evrim (DE) algoritmasının güçlü yönlerini birleştirmektedir. ABC, farklı çözüm uzaylarını keşfetme konusunda yetkin olmakla birlikte, çözümleri verimli bir şekilde kullanma konusunda sınırlamalara sahiptir ve karmaşık konularda sıklıkla yavaş yakınsamaktadır. Esnekliği ve hızlı yakınsama optimizasyonu ile dikkat çeken DE, çözümleri etkili bir şekilde iyileştirerek ABC'nin sınırlamalarını dengeler. Bu algoritmalar birlikte, zorlu optimizasyon problemlerinde hem keşif hem de kullanımı geliştiren dengeli bir hibrit (MOABCDE) oluşturur. MOABCDE'nin performansı sekiz aktiviteli bir inşaat projesinin vaka çalışmasıyla değerlendirilmiş ve NSGA-II (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II), MOPSO (Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu), MODE (Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim) ve MOABC (Çok Amaçlı Yapay Arı Kolonisi) ile C-metrik, Yayılma ve Hiper Hacim metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, MOABCDE'nin diğer algoritmalar arasında öne çıktığını, sorunsuz bir şekilde yakınsama, çeşitli seçenekleri koruma ve TCRT problemi için iyi dengelenmiş çözümler sağlama konusunda daha güçlü bir yetenek gösterdiğini göstermiştir.

Panwar ve Jha (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışma, inşaat projelerinde zaman, maliyet ve risk optimizasyonuna ek olarak, kalite ve güvenlik unsurlarının da zamanlama optimizasyonuna entegre edilebileceğini gösteren önemli bir örnek sunmaktadır. Araştırmada, çok amaçlı karar verme sürecindeki karmaşıklıklar ele alınmış ve bu doğrultuda Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III (NSGA-III) kullanılarak zaman, maliyet, kalite ve güvenlik arasında optimal ödünleşimlerin sağlanması hedeflenmiştir. Geliştirilen modelin performansı, geçmiş vaka çalışmalarından elde edilen mevcut modellerle karşılaştırılmıştır. Modelin performansı, yakınsama derecesi, çeşitlilik ve

yakınsama hızı gibi standart ölçütler kullanılarak değerlendirilmiştir. Mevcut modellerle karşılaştırıldığında, geliştirilen model her üç metrikte de tutarlı bir şekilde daha iyi ortalama değerler göstererek üstün yakınsama, çözüm çeşitliliği ve hesaplama verimliliğine işaret etmiştir.

Sharma ve Trivedi (2022), inşaat projelerinde karşılaşılan çok modlu kaynak kısıtlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik (TCRQSET) ödünleşim problemleri için Latin Hiperküp Örneklem (LHS) tabanlı bir NSGA-III optimizasyon modeli önermiştir. Geliştirilen model, başlangıç popülasyonunun LHS ile oluşturulmasından başlayarak, benzeşimli ikili çaprazlama (SBX), polinomsal mutasyon (PM), baskın olmayan sıralama ve NSGA-II'nin referans noktası temelli seçim yaklaşımı ile yeni nesil popülasyon üretimi adımlarını içermektedir. Modelin geçerliliği, Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (MOPSO) ve standart NSGA-III algoritmalarıyla karşılaştırılarak test edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda, önerilen modelin ürettiği Pareto-optimal çözümlerin mevcut modellere kıyasla eşdeğer ya da daha üstün olduğu görülmüştür. Yakınsama ve çeşitlilik açısından toplam on üç farklı performans metriği kullanılarak yapılan kapsamlı değerlendirmede; benzersiz Pareto çözümlerinin sayısı (UNPS), nesilsel uzaklık (GD), aralık metriği (SM), yayılım (Sp), maksimum yayılım (MS), ortalama ideal uzaklık (MID), baskın olmayan çözüm dağılımı (SNS), kalite metriği (QM), çeşitlilik metriği (DM), Pareto cephesi düzensizliği (NPF) ve hiper-hacim (HV) gibi ölçütler esas alınmıştır. Hesaplama süresi görece daha uzun olsa da, modelin yakınsama başarısı, çeşitliliği ve genel çözüm kalitesi açısından diğer yöntemlerden üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, LHS tabanlı NSGA-III modeli, proje ekiplerinin zaman, maliyet, kalite ve güvenlik arasında etkin ve dengeli kararlar almasını sağlayan güçlü bir karar destek aracı olarak önerilmektedir.

Sharma ve Trivedi (2023), Zaman-Maliyet-Kaynak-Kalite-Güvenlik-Çevresel etki (TCRQSET) ödünleşimi problemlerini, 1260 aktiviteye kadar ulaşan inşaat projeleri kapsamında ilk kez sistematik olarak tanımlamışlardır. Bu kapsamda, Ayırık Karşıt Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III (D-OBNSGA III) yöntemine dayanan Sağlam Çok Amaçlı Zamanlama Modeli (RMOSM) geliştirilmiştir. Tasarlanan bu model, küçük, orta ve büyük ölçekli inşaat projelerinde karşılaşılan TCRQSET tehditlerini etkin biçimde ele almıştır. Modelin performansını değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve iterasyon sayısının performans ölçütleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model uygulamaları sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir. Geliştirilen modelle elde edilen yüksek kaliteli Pareto-optimal çözümler, kaynak kullanımı, kalite,

güvenlik ve çevresel etkilerin geleneksel zaman-maliyet ödünleşimi (TCT) analizlerine entegre edilmesinin avantajlarını ortaya koymuştur. Pareto-optimal çözümlerin analizi, projelerde ek kaynak, kalite, güvenlik ve çevresel fayda sağlanabileceğini ve bunun için ilave zaman veya maliyet gerektirmediğini göstermiştir. Optimal çıktılar, proje süresi ve maliyetinin birlikte artması durumunda kalite düzeyinin yükseldiğini, buna karşılık proje süresi uzadıkça güvenlik risklerinin azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, oluşturulan Sağlam Çok Amaçlı Zamanlama Modeli (RMOSM), inşaat yöneticilerine etkin zamanlama süreçleri oluşturmak için kapsamlı bir yaklaşım sunmakta; bu sayede kaynakların etkin kullanımı, yeterli kalite düzeyi, güvenli çalışma koşulları ve kabul edilebilir çevresel etki sağlanabilmektedir.

Sharma vd. (2023), yapım proje yönetiminde kalite ve güvenliği dengelemeye yönelik çok amaçlı optimizasyon problemini ele almak için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) tabanlı bir model ortaya koymuş ve aynı zamanda süre ve maliyet kısıtlamalarını da dikkate almıştır. Yazarlar, inşaat alanının karmaşıklıklarını ele almak için standart PSO algoritmasını benimsemiş ve rakip hedefler arasındaki ödünleşmeleri temsil eden Pareto-optimal çözümleri belirlemek için baskın olmayan sıralamanın kullanımını da dahil etmişlerdir. Yazarlar, gerçek dünya inşaat projesi verilerini kullanarak yaptıkları kapsamlı deneylerle, PSO tabanlı yaklaşımlarının kalite, güvenlik, zaman ve maliyet gibi temel performans ölçütlerinde istenen sonuçları elde eden optimize edilmiş proje planlarını belirlemede etkili olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, PSO'nun inşaat paydaşlarının kendi özel proje gereksinimleri ve öncelikleri ile uyumlu bilinçli kararlar almalarına yardımcı olacak değerli bir karar destek aracı olma potansiyelini vurgulamaktadır.

Son ve Khoi (2023) tarafından önerilen Adaptif Karşıtlık Tabanlı Balçık Küfü Algoritması (AOSMA), yapım projelerinde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik arasındaki ödünleşimleri optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. AOSMA'nın Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Risk ödünleşimi problemini çözme konusundaki performansı, üç farklı algoritma ile karşılaştırılmıştır: Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (MOPSO), Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III (NSGA-III), LHS Tabanlı NSGA-III. AOSMA algoritmasının performansı Pareto çözüm sayısı (NPS), nesilsel uzaklık (Generational Distance, GD), aralık metriği (Spacing Metric, SM), yayılım (Spread, Sp) ve diğer çeşitli performans göstergeleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, çalışma AOSMA modelinin inşaat projelerinde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik arasında denge kurmaya yönelik optimizasyon sorununu etkili biçimde çözdüğünü;

hem yakınsayan hem de çeşitli Pareto-optimal çözüm kümeleri ürettiğini ortaya koymaktadır. Aynı değerlendirme yapısı, AOSMA modelinin MOPSO, NSGA-III ve LHS tabanlı NSGA-III algoritmalarına karşı performansını ölçmek amacıyla uygulanmıştır. Test sonuçları, AOSMA'nın yakınsama hızı ve hesaplama süresi gibi önemli ölçütlerde diğer algoritmalarından üstün olduğunu göstermektedir.

Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Ödünleşimi (TCSR) problemleri kapsamında Yılmaz ve Dede (2024) tarafından dört farklı vaka çalışması sunulmuştur. Bu çalışmada, Rao-2 algoritmasını geliştirmek amacıyla, kalabalık mesafeye dayalı baskın olmayan sıralama yöntemi (NDSII) kullanılmış; ayrıca Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) da entegre edilmiştir. Algoritmaların performansı, sırasıyla 11, 13, 18 ve 25 aktivite içeren dört farklı vaka çalışması üzerinden değerlendirilmiştir. İlk aşamada, Rao-2 algoritmasının performansı GWO ve WOA ile karşılaştırılmış; ardından, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Diferansiyel Evrim (DE), Genetik Algoritmalar (GA) ve Karşıt Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III (OBNSGA-III) gibi önde gelen algoritmalarla kıyaslanmıştır. Algoritmaların performans değerlendirmesi, C-metriği, hiper-hacim (hypervolume) ve yayılım ölçütü (spread) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aktivite sayısının artmasıyla birlikte Rao-2 algoritmasının, hem GWO hem de WOA algoritmalarına kıyasla tüm performans kriterlerinde üstünlük sağladığını ortaya koymuştur.

1.10. Yapı Projelerinde Çok Amaçlı Optimizasyon

Birçok uygulama probleminde, aynı anda dikkate alınması gereken birden fazla çelişkili hedef vardır. Çok amaçlı optimizasyon, bu çelişkili hedefler arasında en iyi ödünleşimi temsil eden bir dizi çözüm bulmayı amaçlar. Amaç, tek bir optimum çözüm bulmak yerine, hedefler arasında farklı ödünleşimler sunan bir dizi çözüm belirlemektir. Çok amaçlı optimizasyon, birbiriyle çelişen birden fazla hedefi aynı anda optimize etme sürecini ifade eder. Zaman-Maliyet-Risk optimizasyonu bağlamında, çok amaçlı optimizasyon, bu hedeflerin genellikle birbirleriyle rekabet ettiği göz önünde bulundurularak, proje süresi, maliyet ve risk faktörleri arasında en iyi dengeyi bulmayı içerir.

1.10.1. TCRT Problemlerinde Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları

Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) analizi, proje süresini kısaltma, maliyeti azaltma ve potansiyel riskleri en aza indirme gibi birbirine rakip hedefler arasında bir denge kurmayı amaçlamaktadır. Projelerin karmaşıklığının artmasıyla birlikte, bu çok amaçlı problemlere yönelik daha gelişmiş optimizasyon yaklaşımlarının kullanılması zorunlu hale gelmiştir.

İlgili literatür incelendiğinde, inşaat projelerinde TCRT problemlerinin çözümüne yönelik farklı yöntemlerin uygulandığı görülmektedir. Tablo 3, inşaat projelerindeki zaman-maliyet-risk ödünleşimi üzerine gerçekleştirilmiş önceki vaka çalışmalarını özetlemekte ve TCRT problemlerinin analizinde zamanla gelişen yöntemlerin altını çizmektedir.

Tablo 3. Yapım projelerinde zaman maliyet risk ödünleşimine ilişkin önceki vaka çalışmaları

Güvenlik Riski									
Referans	Yıl	Zaman	Maliyet	Risk	Kalite	Çevre	Kaynak	CO2	Yaklaşım
Afshar ve Zolfaghar Dolabi	2014	✓	✓	✓					Çok Amaçlı Genetik Algoritma
Sharma ve Trivedi	2020	✓	✓	✓					NSGA III
Kaveh vd	2021	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Diferansiyel Evrim
Panwar ve Jha	2021	✓	✓	✓	✓				NSGA III
Sharma ve Trivedi	2022	✓	✓	✓	✓				LHS tabanlı NSGA III
Sharma ve Trivedi	2023	✓	✓	✓	✓	✓			Karşıt tabanlı NSGA III
Sharma ve Trivedi	2023	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Ayrık OBNSGA III
Son ve Khoi	2023	✓	✓	✓	✓				AOSMA
Jain ve Dubey	2023	✓	✓	✓	✓				LHS tabanlı NSGA III
Zhan vd	2024	✓	✓	✓				✓	NSGA III
Yılmaz ve Dede	2024	✓	✓	✓					NDSII-Rao-2, NDSII-GWO, NDSII-WOA

Tablo 3'ün devamı

Bolluk ve Kaynak Riski									
Referans	Yıl	Zaman	Maliyet	Risk	Kalite	Çevre	Kaynak	CO2	Yaklaşım
Tran ve Long	2018	✓	✓	✓					Uyarlanabilir Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim
Duc Long vd	2019	✓	✓	✓					MOABCDE
Shishehgar khaneh vd	2022	✓	✓	✓	✓			✓	Ateş Şahin Optimizasyonu (FHO) ,BIM
Anh Nguyen et al	2023	✓	✓	✓	✓			✓	Kaotik Uyarlanabilir Çok Amaçlı Denizati (CAMOSH)
Ağırlıklı Risk									
Referans	Yıl	Zaman	Maliyet	Risk	Kalite	Çevre	Kaynak	CO2	Yaklaşım
Lakshminarayana vd	2010	✓	✓	✓					Karınca Kolonisi Optimizasyonu
Amoozad Mahdiraji vd	2016	✓	✓	✓	✓				Gri Çok Amaçlı Doğrusal Programlama
Hosseinza deh vd	2020	✓	✓	✓	✓				Bulanık -Yunus Avlama Algoritması
Askarifard vd	2021	✓	✓	✓	✓	✓			Sağlam programlama
Banihashe mi ve Khalilzade h	2022	✓	✓	✓	✓				Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma
Olasılık ve Etki Çarpımı									
Referans	Yıl	Zaman	Maliyet	Risk	Kalite	Çevre	Kaynak	CO2	Yaklaşım
Mohammadipour ve Sadjadi	2016	✓	✓	✓	✓				Hedefe ulaşma
Vijayan vd	2018	✓	✓	✓					Karınca Kolonisi Optimizasyonu
Mahmoudi ve Feylizadeh	2018	✓	✓	✓	✓				Gri Doğrusal Model

1.10.2. Matematiksel Programlama Yöntemleri

Matematiksel Programlama Yöntemleri, doğrusal ve doğrusal olmayan programlama, tamsayı programlama ve dinamik optimizasyon gibi sayısal yöntemleri kapsamakta olup, kökenleri II. Dünya Savaşı sırasında geliştirilen yöneylem araştırmalarına dayanmaktadır (Morse ve Kimball, 2012). Bu yaklaşımlar, optimizasyon problemini matematiksel denklemler ve kısıtlar kümesi olarak ele alır ve belirli proje gerekliliklerini sağlarken amaç fonksiyonlarını eniyilemeye çalışır. Matematiksel programlama yöntemleri, ileri düzey matematik kuramına dayalı olup, belirli koşullar altında kesin optimal çözümler üretebilme potansiyeline sahiptir (Dantzig, 2016; Hillier ve Lieberman, 2015).

Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) problemlerine uygulanan başlıca matematiksel programlama yöntemleri aşağıda sunulmuştur:

- Gri Çok Amaçlı Doğrusal Programlama (Amoozad Mahdiraji vd., 2016)
- Hedef Başarma Yöntemi (Mohammadipour ve Sadjadi, 2016)
- Gri Doğrusal Model (Mahmoudi ve Feylizadeh, 2018)
- Sağlam Programlama (Askarifard vd., 2021)

1.10.3. Meta-sezgisel Algoritmalar

Meta-sezgisel algoritmalar, karmaşık problemlere ait geniş çözüm uzaylarında optimal'a yakın çözümleri zekice aramak amacıyla geliştirilmiş optimizasyon algoritmalarıdır. Bu yöntemler, başarılı çözümlerin daha da iyileştirilmesine yönelik yoğunlaştırma (exploitation) ile yeni arama alanlarının keşfi anlamına gelen çeşitlendirme (exploration) stratejileri arasında bir denge kurmayı hedefler. Metasezgiseller, yüksek düzeyli, probleme özgü olmayan algoritmik çerçeveler olup, özellikle bilgi eksikliğinin söz konusu olduğu ya da hesaplama gücünün sınırlı olduğu durumlarda, iyi bir çözüm sağlayabilecek sezgisel yöntemleri bulmak, üretmek veya seçmek amacıyla kullanılır (Blum ve Roli, 2003). Bu yöntemler, çözüm uzayının geniş olduğu ve çok sayıda yerel optimumun bulunduğu çok amaçlı optimizasyon problemlerinde son derece etkili olduklarını kanıtlamışlardır.

Metasezgiseller iki tür algoritma olarak sınıflandırılabilir: popülasyon tabanlı ve tek çözümlü (Almufti, 2019). Popülasyon tabanlı algoritmalarda, belirli bir arama uzayında rastgele bir dizi çözüm üretilir ve en iyi çözüm üretilinceye kadar iterasyonlar sırasında

çözüm değerleri güncellenir. Tek çözüm tabanlı algoritmalarda, rastgele bir çözüm üretilir ve optimum sonuca ulaşılan kadar iyileştirilir (Almufti, 2015).

Ancak, tek çözüme dayalı algoritmalar genellikle yerel optimumlarda kilitlenmekte ve yalnızca rastgele üretilen bir çözümü iyileştirmeye odaklandıkları için küresel optimum çözümlerin belirlenmesini engellemektedir. Öte yandan, popülasyon tabanlı algoritmalar, yerel optimumlardan kaçınmak için doğal bir yeteneğe sahip olduklarından, TCRT probleminin üstesinden gelmek için özellikle uygundur. Popülasyon tabanlı algoritmalar evrim teorisine, fiziksel yasalara, sürü zekasına ve biyolojik özelliklere göre sınıflandırılabilir. Potansiyel çözümlerden oluşan bir popülasyon arasında hayatta kalma uygunluğu fikrine dayanan evrimsel algoritmalar, üreme, mutasyon, rekombinasyon ve seçim gibi doğal süreçlerden ilham almaktadır (Almufti ve vd, 2019).

1.10.4. Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar (Evolutionary Algorithms - EAs), üreme, mutasyon, rekombinasyon ve seçim gibi doğal evrim ilkelerinden esinlenen popülasyon tabanlı meta-sezgisel yöntemlerdir (Holland, 1992; Bäck ve Schwefel, 1993). Bu algoritmalar, karmaşık optimizasyon problemleri için optimal çözümlerin keşfine yönelik olarak birçok bilimsel alanda ve gerçek zamanlı uygulamada son yıllarda yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Evrimsel algoritmalar, çözüm popülasyonunun çeşitliliğini koruyarak küresel optimumlara ulaşmayı hedefler ve özellikle çok amaçlı karar verme problemlerinde etkili çözümler sunar. Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) problemlerinde uygulanan başlıca evrimsel algoritmalar aşağıdaki gibidir:

- Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Afshar ve Zolfaghar Dolabi, 2014).
- Uyarlanabilir Çok Amaçlı Diferansiyel Evrim (Tran ve Long, 2018).
- Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması III (NSGA-III) (Sharma ve Trivedi, 2020; Panwar ve Jha, 2021).
- Latin Hiperküp Tabanlı NSGA-III (Sharma ve Trivedi, 2022; Zhan vd., 2024).
- Karşıt Tabanlı NSGA-III (Sharma ve Trivedi, 2023).
- Rao-2 ile Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII-Rao-2) (Yılmaz ve Dede, 2024).

Bu algoritmalar, geniş çözüm uzaylarını verimli şekilde tarayabilme ve çok sayıda yerel optimumu aşarak yüksek kaliteli çözümler üretebilme yetenekleri nedeniyle, TCRT analizlerinde tercih edilmektedir.

1.10.5. Sürü Zekâsı Algoritmaları

Sürü zekâsı algoritmaları, doğada gözlemlenen merkezî olmayan ve kendi kendini organize edebilen sistemlerin kolektif davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Bu sistemlere örnek olarak karınca kolonileri, kuş sürüleri ve balık toplulukları verilebilir (Bonabeau vd., 1999). Söz konusu doğal sistemler, bireyler arasındaki basit etkileşimler aracılığıyla merkezi bir kontrol olmaksızın karmaşık, uyarlanabilir ve verimli kolektif davranışlar sergileyerek olağanüstü problem çözme yetenekleri ortaya koymaktadır.

Sürü zekâsı, görece basit bireylerin, yerel düzeyde iş birliği yaparak ve temel kurallara uyarak, tek bir bireyin çözmesinin mümkün olmadığı karmaşık problemleri kolektif biçimde çözebileceği fikrine dayanır. Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) problemlerinde uygulanan başlıca sürü zekâsı algoritmaları şunlardır:

- Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Lakshminarayanan vd., 2010; Vijayan vd., 2018).
- Çok Amaçlı Adaptif Kaotik Diferansiyel Evrim Tabanlı Algoritma (MOABCDE) (Duc Long vd., 2019).
- Kaotik Uyarlanabilir Çok Amaçlı Denizatı Algoritması (CAMOSH) (Anh Nguyen vd., 2023).
- Adaptif Karşıtlık Tabanlı Balçık Küfü Algoritması (AOSMA) (Son ve Khoi, 2023).
- Gri Kurt Optimizasyonu ile Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII-GWO) (Yılmaz ve Dede, 2024).
- Balina Optimizasyon Algoritması ile Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII-WOA) (Yılmaz ve Dede, 2024).

1.10.6. Hibrit ve Bulanık Optimizasyon Yaklaşımları

Son yıllarda, Zaman-Maliyet-Risk Ödünleşimi (TCRT) analizlerinde hibrit ve bulanık optimizasyon yaklaşımları giderek daha fazla benimsenmiştir. Bu yöntemler, tekil optimizasyon tekniklerinin sınırlılıklarını aşmakta ve özellikle inşaat ortamlarına özgü belirsizliklerin etkin biçimde yönetilmesini sağlamaktadır. Hibrit yaklaşımlar, iki veya daha fazla optimizasyon yöntemini bir araya getirerek daha güçlü bir çözüm yöntemi sunar. Örneğin, bulanık mantık ile meta-sezgisel algoritmaların, ya da Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) veya Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) gibi karar destek sistemlerinin evrimsel ya da

sürü zekâsı algoritmalarıyla entegrasyonu hibrit yaklaşım kapsamındadır. Bu teknikler, her bir algoritmanın güçlü yönlerinden faydalanarak arama performansını, dayanıklılığı ve uyarlanabilirliği artırmayı hedefler. TCRT problemlerinde kullanılan başlıca bulanık ve hibrit yaklaşımlar şunlardır:

- Bulanık Mantık ve Yunus Açı Algoritması (Hosseinzadeh vd., 2020).
- Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma (Banihashemi ve Khalilzadeh, 2022).
- Ateş Şahin Optimizasyonu (FHO) ile Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) (Shishehgarkhaneh vd., 2022).

Bu yaklaşımlar, hem karar verme süreçlerini hem de optimizasyon algoritmalarının etkinliğini bütünleştirerek, TCRT analizlerinde çok boyutlu ve daha gerçekçi çözümler sunmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, inşaat proje yönetiminde proje süresini kısaltma, toplam maliyeti düşürme ve ilgili riskleri azaltma gibi karmaşık hedefler arasında denge kurma sorununu ele almayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için, Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII) tekniği ile Jaya algoritmasının bütünleşik olarak kullanıldığı çok amaçlı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Çalışma, zaman-maliyet-risk ödünleşimi (TCRT) problemi için çeşitlendirilmiş ve yüksek kaliteli pareto-optimal çözüm kümeleri oluşturan hesaplamalı bir yaklaşım sunmaya odaklanmaktadır.

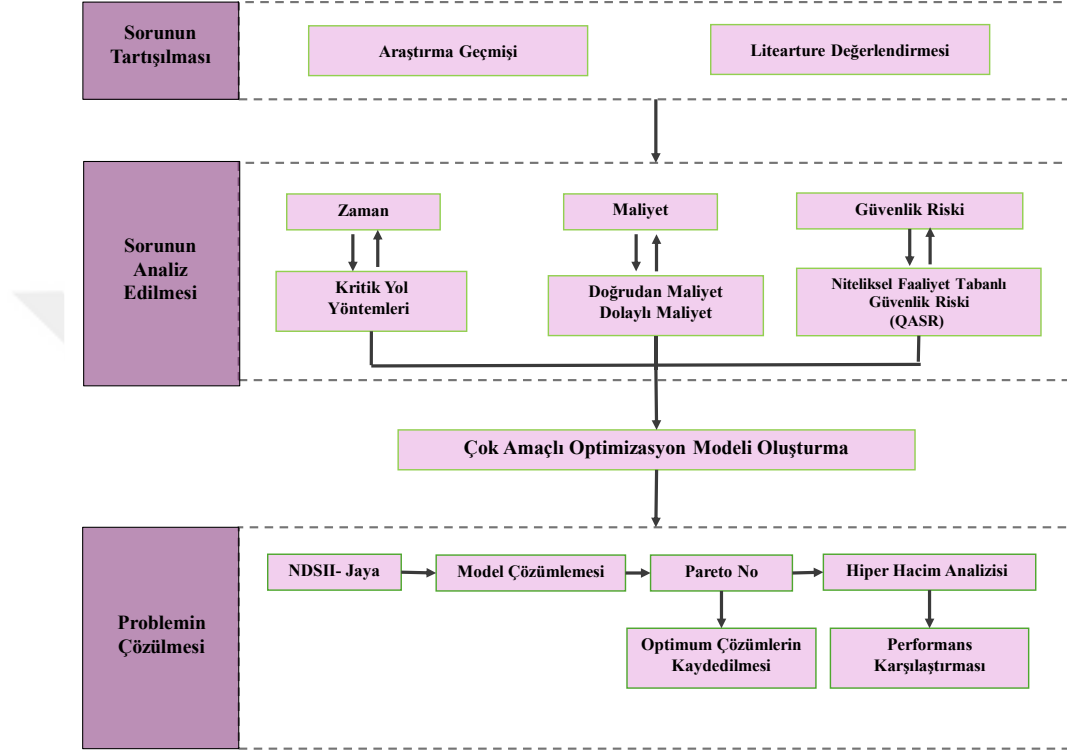
İlk aşamasında, TCRT modelinin matematiksel formülasyonları ortaya konulmuştur. Literatüre dayalı matematiksel ilişkiler aracılığıyla zaman, maliyet ve güvenlik risk olmak üzere üç temel amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Proje süresi, başlangıçtan bitişe ilişkisine dayanan Kritik Yol Yöntemi (CPM) ile modellenmiştir. Maliyetler, doğrudan ve dolaylı maliyetler olarak sınıflandırılmış; dolaylı maliyetler zamana bağımlı olarak ele alınmıştır. Risk bileşeni ise, aktivite temelli nitel güvenlik riski değerlendirmeleri kullanılarak tanımlanmış; bu yaklaşım, riskin ödünleşim analizine entegre biçimde dâhil edilmesini ve modelin belirginleştirilmesini mümkün kılmıştır.

Matematiksel modelin formülasyonunun ardından, çalışmanın temel optimizasyon yaklaşımı olarak NDSII-Jaya algoritması geliştirilmiştir. Jaya algoritması, parametresiz yapısı, yalınlığı ve çok amaçlı optimizasyondaki başarıları nedeniyle tercih edilmiştir. Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII) algoritması ile bütünleştirilerek, çeşitli ve baskın olmayan optimal çözümler üretme kapasitesi artırılmıştır. Geliştirilen bu yöntem MATLAB programlama dilinde kodlanmış olup, farklı büyüklükteki projelere ve çeşitli karmaşıklık düzeylerine uyarlanabilir şekilde tasarlanmıştır.

Modelin geçerliliğini ve etkinliğini değerlendirmek amacıyla, 11, 13, 18 ve 25 aktivite içeren, küçükten orta ölçekliye uzanan dört farklı vaka çalışması incelenmiştir. Bu örnekler, algoritmanın ölçeklenebilirliğini ve genellenebilirliğini test etmek amacıyla seçilmiştir. Her bir örnek için aktivite süresi, maliyet değerleri ve risk puanlarını içeren veriler, daha önceki çalışmalardan alınmış ve önerilen modelin varsayımlarıyla uyumlu hâle getirilerek güncellenmiştir.

Her bir vaka çalışması için model birden fazla kez çalıştırılmış ve sonuç olarak pareto-optimal ön cepheler elde edilmiştir. Ayrıca, algoritmanın performansını değerlendirmek amacıyla hiper hacim ölçütü kullanılmıştır. Bununla birlikte, önerilen yaklaşımın göreceli

performansını belirlemek amacıyla, literatürde yaygın biçimde kullanılan diğer algoritmalarla da karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca hesaplama başarımı açısından değil, aynı zamanda farklı proje yapıları altında sağladığı uyarlanabilirlik ve çözüm çeşitliliği bakımından da değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Araştırmanın çalışma adımları

2.1. TCRO İçin Matematiksel Formülasyon

Zaman-Maliyet-Risk Optimizasyonu (TCRO), proje planlama ve yönetimi süreçlerinde zaman, maliyet ve risk faktörleri arasında en uygun dengeyi sağlamayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, söz konusu üç unsurun birbirleriyle olan karşılıklı bağımlılıklarını ve ödünleşim ilişkilerini dikkate alarak, projenin en verimli ve başarılı şekilde tamamlanmasını hedefler. TCRO kapsamında proje yöneticileri; proje zamanlaması, bütçesi ve potansiyel riskleri analiz ederek, proje performansını artırmaya yönelik iyileştirme yapılabilecek alanları belirlerler. Bu yöntemin temel amacı; projeyi mümkün olan en kısa sürede ve en düşük maliyetle tamamlamanın yanı sıra, riskleri ve belirsizlikleri asgariye indirmektir.

Proje süresinin belirlenmesinde, Kritik Yol Yöntemi (CPM) çerçevesinde kullanılan Başlangıçtan Bitişe (Finish-to-Start) bağlantısı esas alınır. Bu bağlamda, Proje Süresi (PT), kritik yol (CP) üzerindeki tüm aktivitelerin tamamlanması için gereken toplam süre olarak tanımlanır. Kritik yol, proje ağı içerisindeki en uzun yol olup projenin tamamlanabileceği en kısa süreyi ifade eder. Bu toplam proje süresi, literatürde aşağıdaki şekilde ifade edilen denklem (1) yardımıyla hesaplanabilir:

$$PT = \sum_{A \in CP} AT_A \quad (1)$$

Burada AT_A , kritik yol üzerindeki A aktivitesinin tamamlanma zamanını ifade etmektedir.

Maliyet boyutunda, Proje Maliyeti (PC), hem Doğrudan Maliyetleri (DC) hem de Dolaylı Maliyetleri (IC) kapsamaktadır. Doğrudan maliyetler; her bir aktivitein gerçekleştirilmesi için gerekli olan iş gücü, malzeme ve ekipman giderlerinden oluşmaktadır. Öte yandan, dolaylı maliyetler ise genellikle şantiye yönetimi, enerji giderleri, idari harcamalar gibi proje süresince ortaya çıkan genel giderlerdir. Bu doğrultuda, toplam proje maliyeti aşağıdaki şekilde ifade edilen denklem (2) kullanılarak hesaplanabilir:

$$PC = \sum_A D.C + I.C \times PT \quad (2)$$

Burada $(\sum_A D.C)$ ifadesi, projede yer alan tüm aktivitelerin toplam Doğrudan Maliyetini (DC) temsil etmektedir. Diğer yandan, Dolaylı Maliyetler (IC) ise günlük bazda oluşan genel giderlerin, toplam proje süresi olan PT (günlerde) ile çarpılması sonucu elde edilmektedir. Bu kapsamda dolaylı maliyeti süreye bağlı olarak artan giderleri içermektedir.

İnşaat sektöründe güvenlik riski değerlendirme süreçlerinin geliştirilmesine yönelik birkaç çalışma literatüre katkı sağlamıştır. Laufer ve Ledbetter (1986), geleneksel inşaat risk değerlendirme yöntemlerini inceleyerek daha etkili yaklaşımların belirlenmesine yönelik araştırmalar yürütmüşlerdir. Jannadi ve Almishari (2003) ise proje yöneticilerinin yüksek riskli projeleri belirlemelerine yardımcı olmak amacıyla Risk Değerlendirici Modeli (RAM)'ni geliştirmiştir. Baradan ve Usmen (2006), çeşitli inşaat sektörlerinde mesleki yaralanma ve ölüm risklerini sıralamak amacıyla risk düzlemi kavramını uygulamış ve riski,

olasılık (frekans) ile şiddetin çarpımı olarak tanımlamışlardır. Hallowell ve Gambatese (2010) ise konuya önemli katkılar sunmuş; aktivite temelli güvenlik riski niceliklendirme yöntemleri ile güvenlik programlarının uygulanmasına yönelik kapsamlı analitik modeller geliştirmişlerdir.

Önerilen çerçeve, güvenlik unsurlarının optimizasyon sürecine entegre edilmesine yönelik yapısal bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem üç temel aşamadan oluşmaktadır: önemli güvenlik risklerinin belirlenmesi, bu risklerin olasılık (RL) ve şiddet (RS) düzeylerinin değerlendirilmesi ve nihai toplam risk skorunun hesaplanması. Bu süreç, her bir aktivite için öne çıkan güvenlik risklerinin tanımlanmasıyla başlar. Bu ilk aşamada, çeşitli kamu kurumlarına ait raporlar ve yayımlardan elde edilen veriler doğrultusunda her aktivite için öne çıkan riskler derlenmiştir (Afshar ve Zolfaghar Dolabi, 2014). Risklerin tanımlanmasının ardından, her bir riskin olasılığı ve şiddeti, uzman görüşleri ya da tarihsel veriler temelinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Cooke ve Williams (2024) tarafından sunulan ve Tablo 4'ta gösterilen 6×6'lık matris, bu risklerin puanlanmasında kullanılmıştır. Matris; olasılığı 1 (düşük olasılık) ile 6 (yüksek olasılık) arasında, şiddeti ise 1 (hafif yaralanma) ile 6 (ölümcül kaza) arasında derecelendirmektedir. Uzmanlardan elde edilen tüm değerlendirmelerin tamamlanmasının ardından, toplam güvenlik riski puanının belirlenmesinde denklem (3) kullanılmıştır.

Tablo 4. Güvenlik riski puanlama sistemi (Cooke ve Williams, 2024)

Olasılık (RL)	Puan	Şiddet (RS)	Puan
Çok düşük olasılık	1	Hafif yaralanma	1
Düşük olasılık	2	Hastalık	2
Olası	3	Kaza	3
Muhtemel	4	Bildirimi zorunlu yaralanma	4
Büyük olasılıkla	5	Ciddi yaralanma	5
Yüksek olasılıkla	6	Ölümcül kaza	6

$$SR_{kj} = \sum_{i=1}^n R_{kji} \quad (3)$$

$$R_{kji} = l_{kji} \times s_{kji} \quad (4)$$

Burada SR_{kj} k aktivitesinin j alternatifine ait toplam güvenlik riski puanını (Toplam Güvenlik Riski Skoru) ifade eder. l_{kji} i numaralı güvenlik riski ögesinin olasılık değeridir ve s_{kji} aynı ögeye ait şiddet değeridir. R_{kji} ilgili güvenlik riski ögesinin puanı olup, olasılık ve şiddet değerlerinin çarpımı yoluyla elde edilir.

2.2. Baskın Olmayan Sıralama II (NDS- II)

Pareto sınırı boyunca iyi dağılmış, yüksek kaliteli çözüm kümeleri üretmek, çok amaçlı optimizasyon alanında karşılaşılan temel zorluklardan biridir. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri, Srinivas ve Deb (1994) tarafından önerilen ve evrimsel algoritmaların ilk örneklerinden biri olan Baskın Olmayan Sıralama (NDS) yaklaşımıdır. Bununla birlikte, literatürde en yaygın kullanılan ve önemli gelişmelerden biri, Deb vd. (2002) tarafından sunulan Baskın Olmayan Sıralama II (NDS-II) algoritmasıdır.

NDS-II algoritması, çözümleri Pareto baskınlığına dayalı olarak doğru şekilde sınıflandırma yeteneği ve kalabalık mesafe hesaplamaları aracılığıyla popülasyon çeşitliliğini koruma kapasitesi sayesinde, çok amaçlı evrimsel algoritmalar alanında geniş kabul görmüş ve yaygınlaşmıştır. Baskınlık kavramına göre, Tasarım A, eğer en az bir amaç fonksiyonunda daha iyi ve diğer tüm amaçlarda en az eşit düzeyde performans gösteriyorsa, Tasarım B'yi baskılar. Bu baskınlık ilişkisine göre tasarımların sıralanması süreci ise Baskın Olmayan Sıralama (NDS) olarak adlandırılmaktadır.

Bir optimizasyon çalışmasının herhangi bir aşamasında, mevcut tasarımlardan oluşan bir popülasyon, bir arşivde tutulur. Her iterasyonda, popülasyon içindeki herhangi bir diğer tasarım tarafından baskılanmayan tüm uygun çözümler 1. derece (rank 1) olarak etiketlenir. Bunlar, o anki popülasyonda bulunan baskın olmayan çözümlerdir. Bu noktada, 1. dereceye ait çözümler arşivden çıkarılır ve kalan tasarımlar, yeniden baskınlık açısından değerlendirilir. Yeni baskılanmamış çözümler 2. derece (rank 2) olarak tanımlanır. Bu işlem, her aşamada baskın olmayan çözümler elendikçe tekrarlanır ve kalan tasarımlar alt dereceler hâlinde sıralanır. Çalışma ilerledikçe, yeni çözümler mevcut Pareto sınırlarını baskılar ve eski çözümlerin yerini alır. Bu süreç sonucunda, başka çözümler tarafından düzenli biçimde etkilenmeyen ve Pareto sınırına doğru yakınsayan bir değişkenler bileşimi elde edilir.

Deb ve vd. (2002) tarafından literatüre kazandırılan Baskın Olmayan Sıralama II (NDS II) yöntemi; baskınlık hesaplaması, dereceleme (ranking) ve kalabalık mesafe (crowding distance) hesaplamaları gibi çeşitli işlem adımlarından oluşmaktadır. Bir çözüm kümesinde yer alan A ve B çözümleri, amaç fonksiyonları değerleri üzerinden karşılaştırıldığında; eğer A çözümünün her bir değeri B çözümünün karşılık gelen değerinden daha iyi ve tüm değerleri en az onun kadar iyi ise, bu durumda A çözümü, B çözümüne göre daha baskındır. Bu durum, aşağıda verilen matematiksel koşullar aracılığıyla ifade edilmektedir:

Minimizasyon problemleri için, bir çözüm A, başka bir çözüm B'ye karşı baskın kabul edilir, eğer aşağıdaki iki koşul sağlanıyorsa:

$i \in \{1, 2, \dots, n\}$: $f_i(A) \leq f_i(B)$, A çözümü, tüm amaç fonksiyonları açısından B kadar iyi ya da daha iyidir.

$j \in \{1, 2, \dots, n\}$: $f_j(A) < f_j(B)$, En az bir amaç fonksiyonu açısından A, B'den kesin olarak daha iyidir.

Burada n, toplam amaç fonksiyonu sayısını temsil etmektedir. İlk aşamada, tüm çözümlerin baskınlık dereceleri (rank değerleri) “0” olarak tanımlanır. Tüm bireyler popülasyon içinde karşılaştırıldığında, herhangi bir birey başka hiçbir birey tarafından baskılanmıyorsa, bu birey ya da bireyler baskın birey(ler) olarak sınıflandırılır ve baskınlık dereceleri “1” olarak atanır. Ardından geriye kalan baskın olmayan bireyler, kendi aralarında yeniden karşılaştırılır; bu bireyler içinde baskın olan varsa, bu çözümlerin baskınlık derecesi “2” olarak belirlenir. Bu süreç, tüm çözümler sıralanana kadar iteratif biçimde devam eder.

Bu şekilde, herhangi bir baskınlık sıralaması adımıyla yer alan bireylerin, aynı baskınlık değerine sahip olması başka bir ifadeyle, birbirlerine göre baskın olmamaları durumunda baskınlık sıralaması tamamlanmış sayılır. Buna göre, bir popülasyondaki tüm bireylerin baskınlık sıralaması değeri “1” olabilir. Baskınlık sıralama değeri, matematiksel olarak rank (derece) olarak adlandırılmaktadır. Rank değeri 1 olan bireyler, popülasyondaki en üstün çözümler olarak kabul edilir. Bununla birlikte, yalnızca baskınlık sıralaması, çözümlerin Pareto sınırı üzerinde dengeli bir şekilde dağılmasını sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bu problemi çözmek amacıyla, NDS-II algoritması, her bireyin amaç uzayındaki komşularına olan yakınlığını ölçen bir metrik olan kalabalık mesafe hesaplamasını içermektedir.

Kalabalık mesafe, her bireyin bulunduğu ön (front) içerisindeki konumuna bağlı olarak hesaplanır ve daha az yoğun alanlarda bulunan bireylerin seçilmesini sağlayarak, Pareto sınırı boyunca daha homojen ve çeşitli bir dağılım elde edilmesine katkı sunar. Aynı

baskınlık derecesine (rank) sahip bireyler, bu durumda ikinci bir ölçüte göre sıralanmalıdır. Bu ölçüt, kalabalık mesafe hesaplamasıdır. Bu hesaplamada, bireyler her bir amaç fonksiyonu (f) için küçükten büyüğe sıralanır. Bu sıralama sonucunda, en küçük ve en büyük değerlere sahip bireylerin kalabalık mesafesi sonsuz olarak alınır.

Kalabalık mesafe değeri genellikle m ile gösterilir ve her bir bireyin tüm amaç fonksiyonları için aldığı kalabalık mesafe değerlerinin toplamı, bireyin toplam kalabalık mesafesini verir. Burada: m , bireyin toplam kalabalık mesafesi, f , bireyin amaç fonksiyonu değerleri, n , baskınlık sıralamasındaki birey sayısıdır. Örneğin, rank değeri "2" olan bireylerden her biri için, her amaç fonksiyonu özelinde alınan kalabalık mesafe değerlerinin toplamı, bireyin tüm amaç fonksiyonları açısından toplam kalabalık mesafesini oluşturur.

$$CD(i) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{f_j(i+1) - f_j(i-1)}{f_j^{max} - f_j^{min}} \right) \quad (5)$$

Kalabalık mesafe (crowding distance), popülasyon çeşitliliğini korumak amacıyla, aynı baskınlık derecesine (rank) sahip tüm bireyler için uygulanır. denklem (5)'de gösterildiği üzere, her bir amaç fonksiyonu m için, birey i 'nin kalabalık mesafesi $CD(i)$, sıralı popülasyonda yer alan komşu çözümlerle arasındaki normalize edilmiş mesafe hesaplanarak elde edilir. Bu mesafe, bireyin komşularına olan uzaklıkların kademeli olarak nasıl biriktiğini gösterir. Burada: $f_j(i+1)$ ve $f_j(i-1)$ sıralı çözüm kümesinde bireyin bir sonraki ve bir önceki çözümlerine ait amaç fonksiyonu değerleridir. f_j^{max} and f_j^{min} ilgili ön (front) içerisindeki amaç fonksiyonu m 'nin maksimum ve minimum değerleridir. Bu formül ile hesaplanan tüm amaç fonksiyonlarına ait kalabalık mesafeler toplandığında, birey i 'nin toplam kalabalık mesafesi, yani $CD(i)$ elde edilir. Seçim sürecinde öncelik, baskınlık derecesi en yüksek olan bireylere (örneğin, rank = 1) verilir. Aynı rank değerine sahip bireyler arasında ise, kalabalık mesafesi daha büyük olanlar tercih edilir. Bu yaklaşım, Pareto sınırı boyunca çözümlerin daha dengeli ve yaygın bir şekilde dağılmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

2.3. Jaya Algoritması

Jaya algoritması, Rao (2016) tarafından geliştirilen, son derece etkili bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma güvenilirliği, basitliği ve parametre gerektirmeyen yapısı sayesinde kısa sürede geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur. Jaya, hem kısıtlı hem de kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümünde başarıyla uygulanmış olan, basit fakat güçlü bir küresel optimizasyon algoritmasıdır. Sanskritçede “zafer” anlamına gelen Jaya kelimesi, algoritmanın temel felsefesini yansıtmaktadır: en iyi çözüme ulaşma ve en kötü çözümlerden uzak durma.

Pek çok geleneksel optimizasyon yönteminin aksine, Jaya algoritması çaprazlama oranı, mutasyon oranı veya öğrenme katsayıları gibi yoğun kullanıcı müdahalesi gerektiren parametre ayarlamalarına ihtiyaç duymaz. Bu algoritmada yalnızca popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı gibi temel parametreler yeterlidir. Bu özellik, algoritmanın gerçek dünya problemlerine uygulanmasını büyük ölçüde kolaylaştırır; çünkü deneme-yanılma yoluyla parametre ayarı yapmak, çoğu zaman zaman alıcı ve pratik olmayan bir süreçtir. Dolayısıyla Jaya algoritması, kullanım kolaylığı ve uygulama esnekliği bakımından özellikle pratik mühendislik problemleri için cazip bir çözüm yöntemi sunmaktadır.

Amaç fonksiyonu $f(x)$, minimize ya da maksimize edilmek istenen fonksiyondur. Herhangi bir i . iterasyonda, $j = 1, 2, \dots, m$ olmak üzere m tasarım değişkeni, $k = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere n aday çözüm bulunduğu varsayılmaktadır. Tüm aday çözümler içerisinde, $f(x)$ 'in en iyi değeri $f(x)$ en iyi, yine tüm çözümler içerisinde en kötü değeri ise $f(x)$ en kötü olarak belirlenir. Eğer $X_{j,k,i}$, j . değişkenin k . aday çözümdeki değerini ifade ediyorsa, bu değişkenin i . iterasyonda güncellenmiş değeri $X'_{j,k,i}$ aşağıdaki denklem (6) ile hesaplanır:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i}(X_{j,en\ kötü,i} - |X_{j,k,i}|) \quad (6)$$

Burada,

- $X_{j,en\ iyi,i}$ değişkenin en iyi adaydaki değeridir.
- $X_{j,en\ kötü,i}$ aynı değişkenin en kötü adaydaki değeridir.
- $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ $[0, 1]$ aralığında rastgele üretilen iki reel sayıdır.
- $X'_{j,k,i}$ $X_{j,k,i}$ 'nin güncellenmiş hâlidir.

Bu denklemde $r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - |X_{j,k,i}|)$ çözümün en iyi çözüme yaklaşma eğilimini ve $r_{2,j,i}(X_{j,en\ kötü,i} - |X_{j,k,i}|)$ çözümün en kötü çözümden uzaklaşma eğilimini ifade etmektedir. Eğer $X'_{j,k,i}$, mevcut çözümden daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri üretirse, bu yeni değer kabul edilir. İterasyonun sonunda, kabul edilen tüm yeni çözümler saklanır ve bir sonraki iterasyonun başlangıç çözüm kümesi olarak kullanılır.

Bu süreç, birbirini izleyen turlarda devam ettirilir ve popülasyon zamanla optimal ya da optimal'e yakın çözümlere doğru evrilir. Ayrıca, algoritmaya özgü herhangi bir parametre ayarı gerektirmediğinden, Jaya algoritması hem kullanım kolaylığı hem de farklı problem türlerine uyarlanabilirliği açısından son derece esnektir. Jaya algoritmasının öne çıkan güçlü yönleri şunlardır:

- Basitlik: Algoritmaya özgü parametrelerin bulunmaması, uygulama sürecini daha sade ve tutarlı hâle getirir.
- Uyarlanabilirlik: Sürekli ve ayrık değişkenler içeren geniş kapsamlı problemlere başarıyla uygulanabilir.
- Verimlilik: Arama (exploration) ve sömürü (exploitation) dengesini sağlayarak, aşırı yakınsamayı önler ve yerel minimumlardan kaçınabilir.

Bu nedenlerle Jaya algoritması, daha karmaşık ve çok amaçlı gerçek dünya problemlerini çözmek amacıyla çeşitli melez (hibrit) optimizasyon çerçevelerine entegre edilmiştir. Bu çalışmada ise, Jaya algoritmasının uygulanabilirliği, Baskın Olmayan Sıralama II (NDS-II) yöntemiyle birleştirilerek genişletilmiştir. Bu birleşim sonucunda, hem yüksek doğrulukta çözümler üretebilen hem de Pareto sınırı boyunca dengeli çözüm dağılımı sağlayabilen güçlü bir hibrit algoritma elde edilmiştir.

2.4. Baskın Olmayan Sıralama II - Jaya Algoritması (NDSII-Jaya)

Baskın Olmayan Sıralama II - Jaya (NDSII-Jaya) algoritması, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için uygun bir yöntemdir. Bu algoritmanın temel hedefi, en iyi çözüme doğru ilerlemeye devam ederken en kötü çözümden kaçınmaktır. Amaçların etkin ve verimli biçimde ele alınabilmesi için Jaya algoritması, Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII) yaklaşımıyla birleştirilmiştir. Böylelikle NDSII-Jaya algoritması, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde her iki yöntemin güçlü yönlerini bir araya getiren etkili bir çözüm çerçevesi sunmaktadır. NDSII-Jaya algoritması; NDSII yaklaşımının

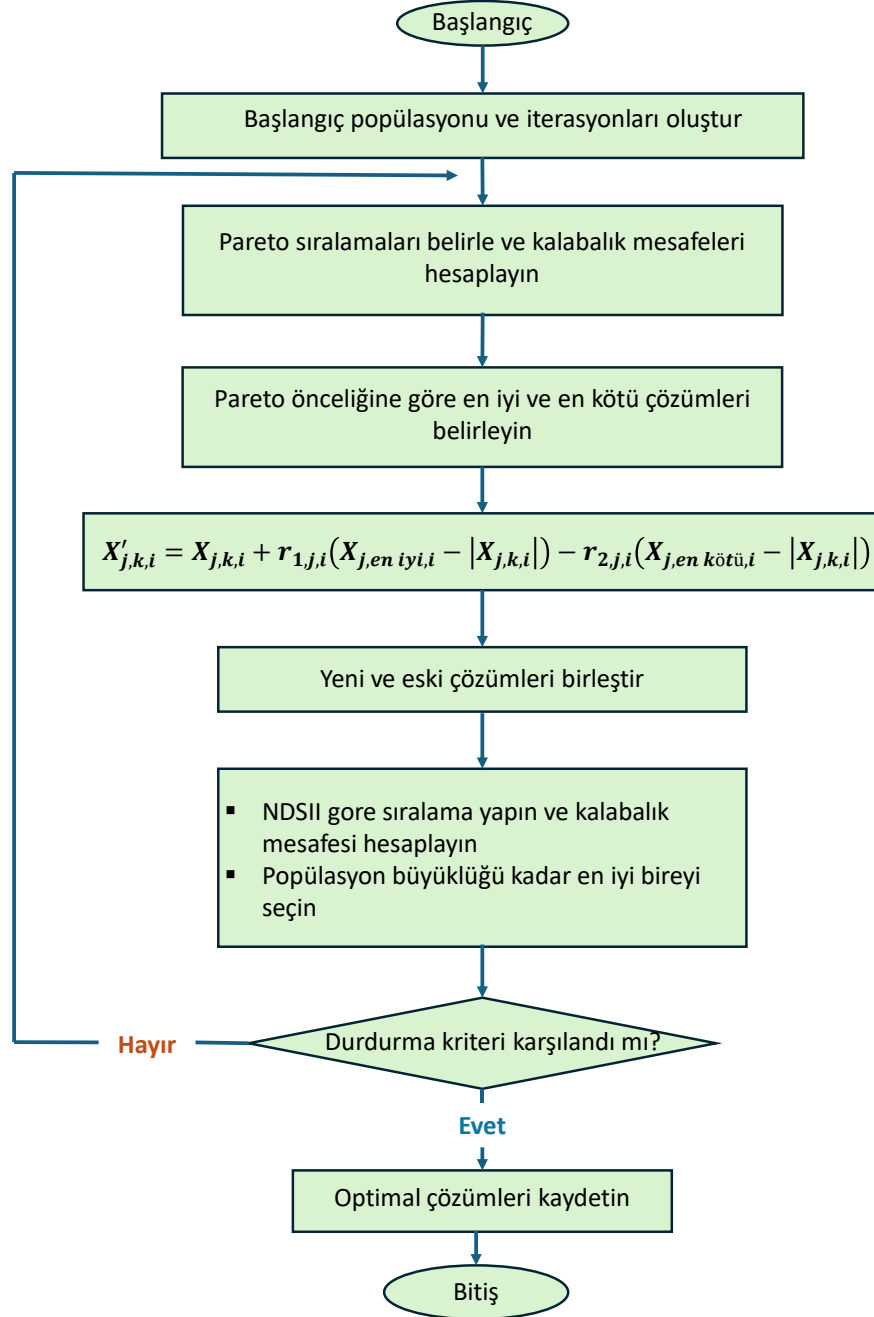
baskın olmayan çözüm sıralama kabiliyeti ile Jaya algoritmasının basitlik, yönsüz arama ve hızlı yakınsama gibi dikkat çeken özelliklerini birleştirmektedir. Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII)-Jaya algoritması sürecine ilişkin akış şeması, şekil 4'te sunulmuştur.

NDS-II-Jaya algoritması, bileşen yöntemlerinin özgün özelliklerini bir araya getiren birleşik bir yapıya sahiptir.

NDS-II: NDS-II yaklaşımı, baskın olmayan çözümleri bulma ve sürdürebilme yeteneğine, popülasyonu baskınlık ilişkilerine göre sıralama kapasitesine ve kalabalık mesafe hesaplamaları yoluyla çeşitliliği koruma özelliğine sahiptir.

Jaya: Jaya algoritması ise, uygulanma kolaylığı, parametresiz çalışabilme yeteneği ve aynı anda hem en iyi çözüme yönelme hem de en kötü çözümden uzaklaşma kavramlarına dayanması bakımından öne çıkmaktadır.

Önerilen NDSII-Jaya algoritması, Jaya algoritmasının sadeliğini ve parametre gerektirmeyen yapısını, NDS-II yaklaşımının çeşitliliği koruyan ve sıralama odaklı mekanizmalarıyla birleştirerek; iyi dağılmış, yüksek kaliteli bir Pareto sınırı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle NDSII-Jaya algoritması, çok sayıda birbiriyle çelişen hedefin aynı anda göz önünde bulundurulması gereken karmaşık inşaat projeleri için son derece uygun bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır.



Şekil 4. NDSII-Jaya'nın akış şeması

2.5. Çok Amaçlı Optimizasyonda Performans Ölçütü

Çok amaçlı optimizasyonda, karar vericiler çoğu zaman birbirine zıt birden fazla hedef arasında denge kurma sorunu ile karşı karşıya kalmaktadır. Tek amaçlı optimizasyondan farklı olarak, bu tür problemler tek bir en iyi çözüm yerine, Pareto sınırı olarak bilinen çeşitli

ödünleşimli çözüm kümeleri sunar. Pareto sınırı, pratikte oldukça büyük hatta sonsuz sayıda çözüm içerebileceğinden, amaç bu sınırı temsilen küçük fakat anlamlı bir alt küme çözüm elde etmektir. Literatürde, elde edilen çözüm kümelerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi için çeşitli kalite göstergeleri (quality indicators) önerilmektedir. Örneğin, Spread metriği, çözümlerin Pareto sınırı boyunca ne ölçüde dengeli dağıldığını belirlerken; C-metric (Coverage Indicator), bir çözüm kümesinin diğerine göre üstünlük düzeyini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Hiper Hacim (Hypervolume, HV) metriği, hem Pareto sınırına yakınlığı hem de çözüm çeşitliliğini eşzamanlı olarak değerlendirebilme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. HV, belirli bir referans noktasına göre çözüm kümesinin kapladığı çok boyutlu hacmi ölçerek algoritmalar arasında sezgisel, kapsamlı ve güvenilir bir kıyaslama sağlamaktadır.

2.5.1. Hiper Hacim

Pareto sınırı yaklaşımlarının kalitesini değerlendirmek amacıyla, Zitzler ve Thiele (1998) tarafından ilk kez önerilen hiper hacim (HV) göstergesi diğer adıyla Lebesgue ölçüsü veya S-metrik yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir Pareto çözümünden oluşan küme Ω olarak tanımlanır. Bu kümedeki her çözüm X_i için, X_i ile referans noktası W arasında köşe oluşturacak şekilde bir hiperküp v_i tanımlanır. Tüm çözümlerin kapsanmasını sağlamak adına, referans noktası, genellikle en kötü amaç fonksiyonu değerlerinden biraz daha kötü olacak biçimde tanımlanır. Hiper hacim değeri (HV), bu hiper küplerin birleşiminden oluşan ve amaç uzayında domine edilen bölgeyi temsil eden toplam hacim olarak hesaplanır. HV değeri ne kadar yüksekse, çözüm kümesinin performansı o denli üstün kabul edilir; çünkü bu durum, amaç uzayında daha geniş bir alanın domine edildiğini göstermektedir. Son olarak, hiper küplerin birleşiminden oluşan toplam hacim, yani hiper hacim (HV), tüm v_i hiperküplerinin birleşim hacmi olarak belirlenir; bu hesaplama yapılırken çakışan alanların birden fazla kez sayılmamasına dikkat edilir.

$$HV = \bigcup_{i=1}^{|\Omega|} v_i \quad (7)$$

3. BULGULAR

Bu çalışmada yapı projelerinde zaman maliyet risk ödünleşimi için Pareto-optimal çözümler üretmek üzere Jaya algoritmasını baskın olmayan sıralama II ile birleştiren çok amaçlı bir optimizasyon modeli (NDSII-Jaya) önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansı ve geçerliliği, literatürden sırasıyla 11, 13, 18 ve 25 aktivite içeren dört kıyaslama vaka çalışması kullanılarak gösterilmiştir. MATLAB'da yazılan programı çalıştırmak için 2.30GHz ve 2.40GHz özelliklerinde çalışan Intel(R) Core (TM) i5-6200U CPU'ya sahip bir kişisel bilgisayar kullanılmıştır. İstatistiksel güvenilirlik için, her bir örnek problem geliştirilen programda 10'ar defa çözülmüştür. Baskın olmayan çözümleri belirlemek doğası gereği zor olsa da, bu teknik karar vericilerin tercihlerine dayalı olarak üstün alternatifler arasından uygun çözümleri seçer. Bu çok amaçlı teknikle oluşturulan Pareto çözümleri Pareto çözümleri, proje yöneticilerine etkili zaman-maliyet-güvenlik riski kararları oluşturmada daha fazla esneklik sağlar. NDSII-Jaya modelinin sonuçları, çözüm kalitesini ve verimliliği değerlendirmek için literatürde tanımlanan MOGA, NSGAI, NDSII-WOA, NDSII-Rao-2 ve NDSII-GWO gibi iyi bilinen algoritmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların adil ve tutarlı olabilmesi için popülasyon büyüklüğü ve nesil sayısı, literatürde kullanılan parametre ayarlarıyla uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece elde edilen performans farklılıklarının parametre ayarlarından değil, algoritmaların yapısal özelliklerinden kaynaklandığı güvence altına alınmıştır. Bu yaklaşım, NDSII-Jaya'nın sunduğu çözüm kalitesinin ve verimliliğinin nesnel bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

3.1. 11 Aktiviteli Örnek

11 aktiviteli örnek ilk olarak Özcan-Deniz vd. (2012) tarafından sunulmuş ve zaman, maliyet ve çevresel etki dikkate alınmıştır. Kaveh ve diğerleri (2021) daha sonra bu çalışmayı altı hedefi içerecek şekilde genişletmiştir: zaman, maliyet, kalite, kaynak, güvenlik riski ve çevresel etki. Çalışmadaki her aktivitede iki ila dört alternatif yürütme yöntemi sunmaktadır. Daha yakın zamanda, Yılmaz ve Dede (2024) üç hedefe odaklanmıştır: zaman, maliyet ve güvenlik riski. 11 aktiviteden oluşan Zaman Maliyet Güvenlik Riski örnek probleminin ayrıntıları Tablo 5' de sunulmuştur.

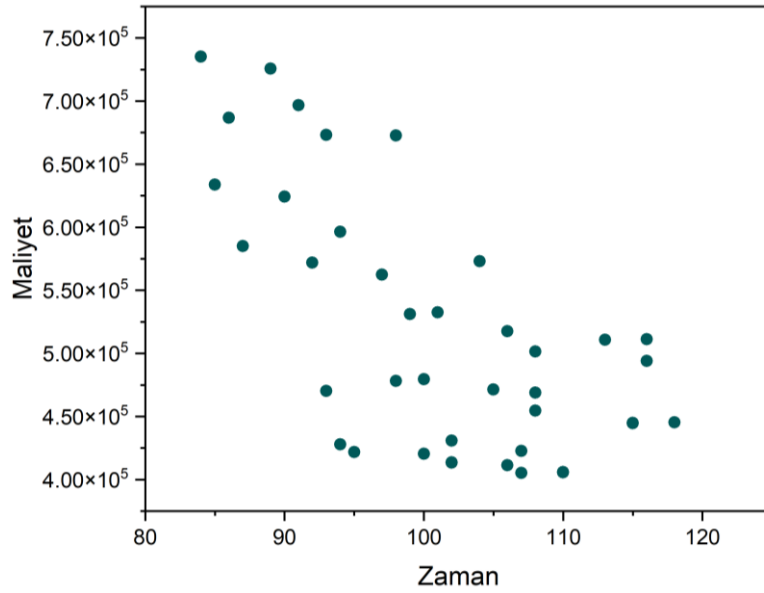
Tablo 5. 11 aktiviteli problemi için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri

Aktivite	Aktivite Sayısı	Halef aktivite	Mod	Zaman (Gün)	Maliyeti (\$)	RL	RS
Saha Çalışması	1	2	1	4	5039.71	2	2
			2	4	4924.93	2	3
Kazı Çalışmaları	2	3	1	2	360.71	3	3
			2	2	297.05	4	4
Temel	3	4	1	6	84232.67	3	5
			2	5	90392.28	4	6
Temel duvarı	4	5	1	13	76650.79	2	5
			2	8	86174.94	3	6
Döşeme	5	6	1	11	14636.05	3	4
			2	7	16758.59	2	5
Dış duvar	6	7	1	6	25959.52	4	5
			2	14	65399.94	1	5
			3	5	127542.42	3	5
İç Duvar	7	11	1	18	27970.53	1	3
			2	10	35650.22	2	2
			3	15	27508.21	1	4
			4	8	34365.99	3	4
Döşeme	8	–	1	16	28341.6	2	5
			2	12	45616.48	2	4
			3	8	36554.88	3	5
Dış Yüzey İşlemleri	9	–	1	31	69659.78	2	2
			2	23	233034.5	3	3
İç Yüzey İşlemleri	10	–	1	3	4006.8	1	2
			2	4	1746.55	1	3
Çatı	11	8,9,10	1	21	117851.84	3	6
			2	23	69253.17	4	5

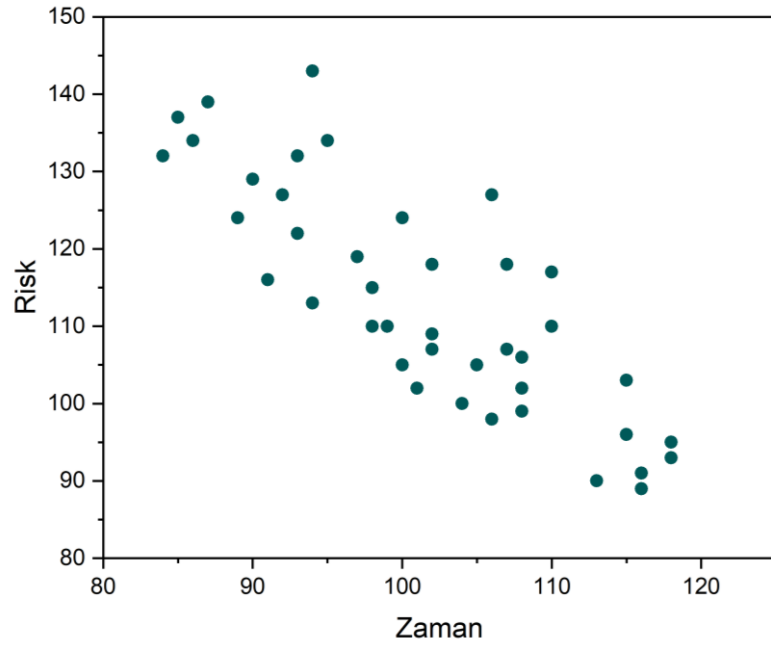
NDSII-Jaya, Tablo 5'de sunulan verileri kullanarak, 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 iterasyon ile örneği analiz etmek için kullanılmıştır. NDSII-Jaya 5050 olası farklı programı incelemiştir. Sonuç olarak, Fonksiyon Değerlendirme Sayısı (NFE) $= (50 \times 100) + 50$ olarak hesaplanan fonksiyon değerlendirmeleri 5050 olabilir. Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, NDSII-Jaya'nın 11 aktiviteli probleme uygulanmasıyla elde edilen pareto çözümlerini göstermektedir. Tablo 6'da Pareto çözümlerinin ayrıntılı bir sunumu yer almaktadır.

Tablo 6. 11 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları

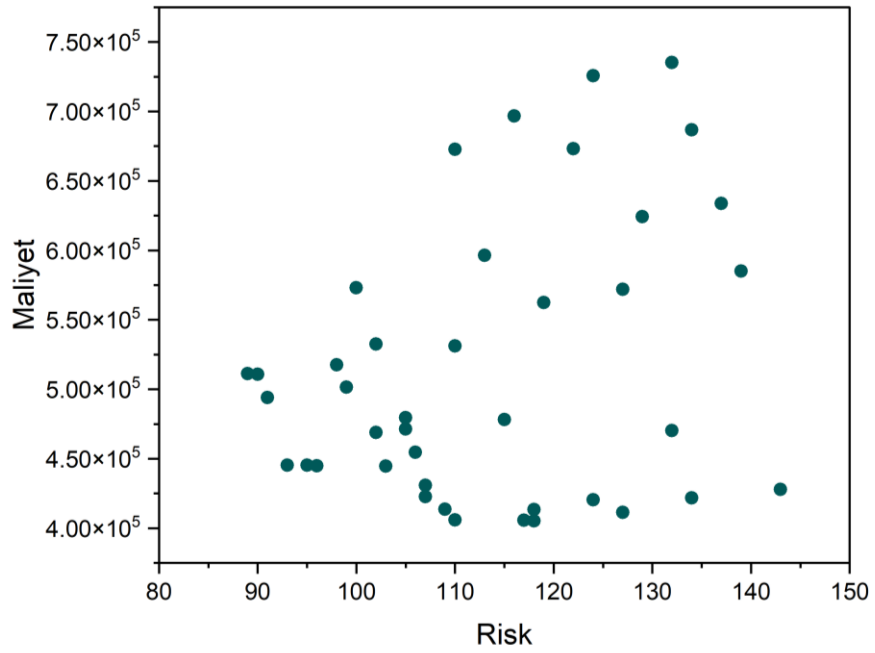
Pareto no	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk	Optimal Modlar										
1	107	405332,86	118	2	2	1	1	2	1	3	1	1	2	2
2	116	511287,55	89	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1
3	84	735271,02	132	2	2	1	2	2	3	4	1	2	2	1
4	110	405858,84	110	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2
5	118	445299,26	95	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2
6	94	427874,4	143	2	2	2	2	2	1	4	1	1	2	2
7	89	725746,87	124	2	2	1	1	2	3	4	1	2	2	1
8	113	510825,23	90	1	1	1	1	2	2	3	2	1	2	1
9	101	532511,07	102	1	1	1	1	2	3	2	2	1	2	2
10	85	633688,14	137	2	2	1	2	2	1	4	1	2	2	1
11	104	572967,69	100	1	1	1	1	2	3	3	2	1	2	1
12	97	562372,15	119	2	2	1	1	2	3	4	1	1	2	1
13	98	672614,37	110	2	1	1	1	2	3	3	1	2	1	2
14	87	585089,51	139	2	2	1	2	2	1	4	1	2	2	2
15	91	696747,03	116	2	1	1	1	2	3	4	2	2	1	2
Ortalama	99,60	583526,54	114,93	NOP:50, NOI:100										
NOP = Popülasyon sayısı, NOI=İterasyon sayısı														



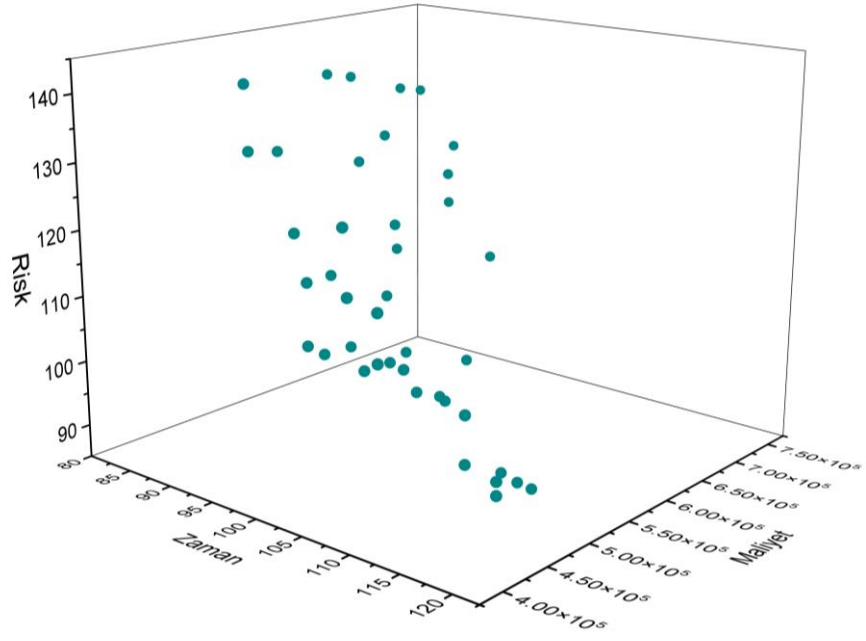
Şekil 5. 11 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümler



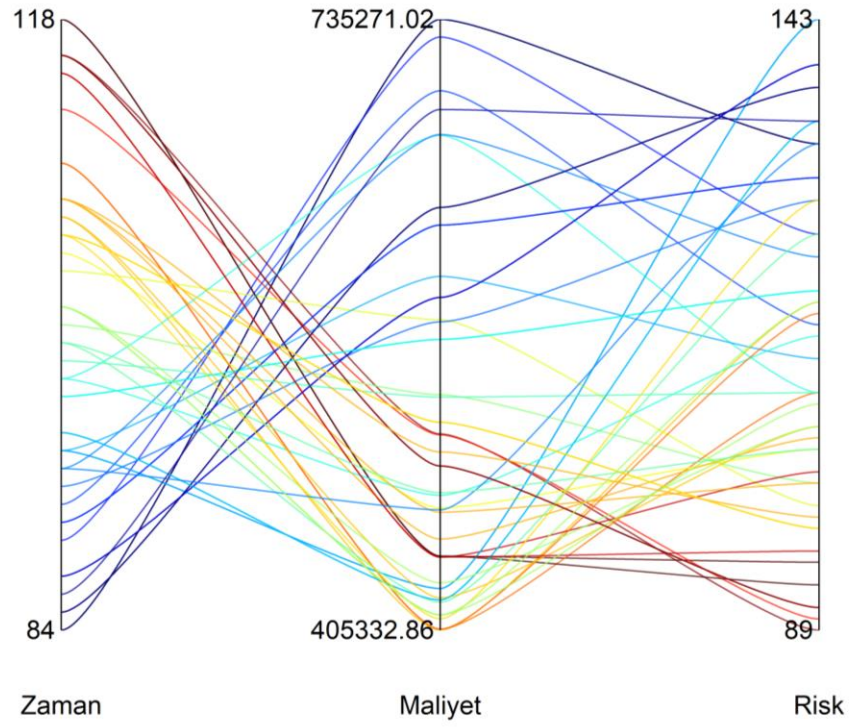
Şekil 6. 11 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri



Şekil 7. 11 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri



Şekil 8. 11 aktiviteli problemi için pareto çözümleri



Şekil 9. 11 aktiviteli problemi için pareto çözümleri

NDSII-Jaya modelinin performansı, Tablo 7'de gösterilen 11 aktiviteli bir proje üzerinden, aynı hesaplama parametreleri (popülasyon büyüklüğü = 50, iterasyon sayısı = 100, NFE = 5000) kullanılarak NDSII-WOA (Yılmaz ve Dede, 2024) ile karşılaştırılmıştır. NDSII-Jaya, zaman odaklı senaryoda WOA'nın belirlediği minimum proje süresi olan 83 güne ulaşamasa da 84 gün ile oldukça yakın bir değer elde etmiş; buna karşılık, güvenlik riski açısından anlamlı düzeyde üstünlük göstermiştir (132'ye karşı 141) ve toplam proje maliyetini de daha düşük seviyede tutmuştur (735.271,02 \$'a karşı 741.430,69 \$). Maliyet odaklı senaryoda ise, NDSII-Jaya algoritması proje süresini dört gün azaltmayı başarmış (107 güne karşı 111 gün), bununla birlikte yalnızca %0,5 oranında ek maliyete yol açarak zaman çizelgesi performansını çok az bir artışla iyileştirmiştir. Risk odaklı bulgular açısından değerlendirildiğinde, her iki algoritma benzer proje süreleri üretmiş (113 ve 116 gün); ancak NDSII-Jaya, güvenlik riski düzeylerini korurken tutarlı biçimde daha düşük maliyet değerleri sunmuştur.

Tablo 7. NDS-II-Jaya kullanılarak 11 aktiviteli problemi için karşılaştırma

	WOA (Yılmaz and Dede, 2024)			NDSII-Jaya (Bu çalışma)		
Durum	Zaman(gün)	Maliyet (\$)	Güvenlik Risk	Zaman(gün)	Maliyet (\$)	Güvenlik Risk
Zaman	83	741430,69	141	84	735271,02	132
	84	737709,77	122	85	633688,14	137
Maliyet	111	403388,76	111	107	405332,86	118
	114	403672,64	119	110	405858,84	110
Güvenlik Risk	116	513547,84	88	116	511287,55	89
	113	513085,52	89	113	510825,23	90
NOP	50			50		
NOI	100			100		
NFE	5050			5050		

3.2. 13 Aktiviteli Örnek

Sharma ve vd. (2023), Yılmaz ve Dede (2024) tarafından kullanılan 13 aktiviteli içeren bir vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Bu aktivitelerin her biri iki ve dört alternatif yürütme modu sunmaktadır. Tablo 8, bu 13 aktiviteli kapsayan Zaman Maliyet ve Güvenlik Risk örnek probleminin özelliklerini sunmaktadır.

Tablo 8. 13 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri

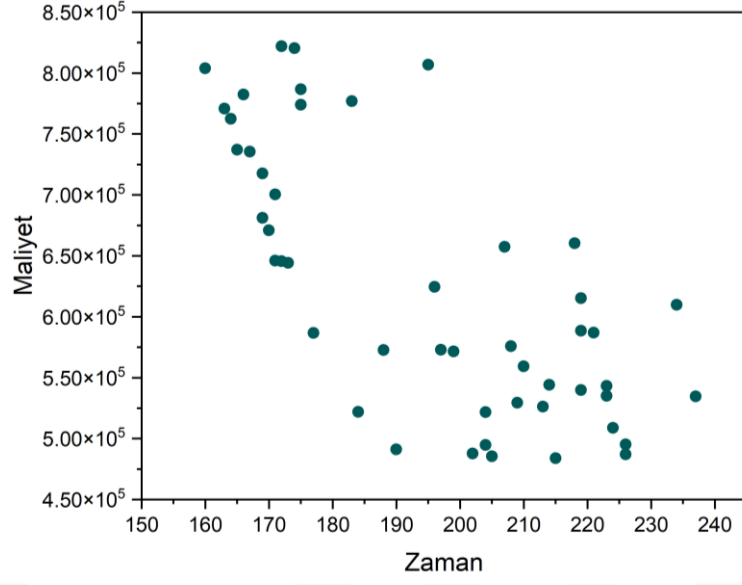
Aktivite	Aktivite Sayısı	Halef aktivite	Mod	Zaman (Gün)	Maliyeti (\$)	Güvenlik Riski-1		Güvenlik Riski-2		Güvenlik Riski-3	
						RL	RS	RL	RS	RL	RS
Saha Temizliği	1	2	1	8	10039,42	1	1	1	1	1	1
			2	8	9849,86	1	2	1	2	1	2
Kazı	2	3	1	6	1082,13	3	3	1	1	3	2
			2	6	891,05	3	4	2	1	4	3
Temel	3	4	1	12	15545,67	3	2	4	2	3	2
			2	10	17039,34	2	2	3	3	3	2
Kalıp	4	5	1	5	562,13	3	5	2	1	2	2
			2	4	590,32	2	4	3	2	3	4
İstinat duvarı	5	6	1	26	15834,49	3	3	2	2	1	2
			2	16	17274,94	2	4	3	3	1	1
Bodrum katı	6	7	1	32	74124,65	2	3	4	5	3	3
			2	29	76345,78	3	4	4	6	4	4
			3	23	84312,34	4	5	5	6	3	3
Döşeme	7	8	1	22	32646,05	4	5	3	3	3	4
			2	11	29759,59	4	6	4	4	4	4
Dış duvar	8	9	1	18	65959,52	2	3	2	4	2	3
			2	29	105296,94	2	2	3	3	1	2
			3	11	157433,42	2	2	3	2	2	3
İç duvar	9	13	1	37	58570,35	2	3	2	4	2	1
			2	21	59999,39	2	2	3	3	1	2
			3	32	57668,29	2	2	3	2	2	2
			4	17	63321,11	2	2	3	3	2	3
Döşeme	10	-	1	34	38411,5	2	3	2	4	2	1
			2	17	65326,48	2	2	3	3	1	2
			3	12	50214,22	2	2	3	2	2	3
Dış Yüzey İşlemleri	11	-	1	9	12216,23	2	5	2	2	2	3
			2	12	3846,23	3	6	3	3	3	3
İç Yüzey İşlemleri	12	-	1	41	90219,78	1	2	2	3	1	3
			2	31	233034,5	2	3	3	3	2	3
Çatı	13	10,11,12	1	23	127641,84	2	3	3	4	2	4
			2	24	81323,17	3	4	4	5	3	5

Tablo 8'de sunulan verileri kullanarak, NDSII-Jaya, 50 popülasyon büyüklüğü ve 100 iterasyon ile örneği analiz etmek için kullanılmıştır. NDSII-Jaya 5050 olası farklı programı incelemiştir. Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14'da NDSII-Jaya'nın 13 aktiviteli

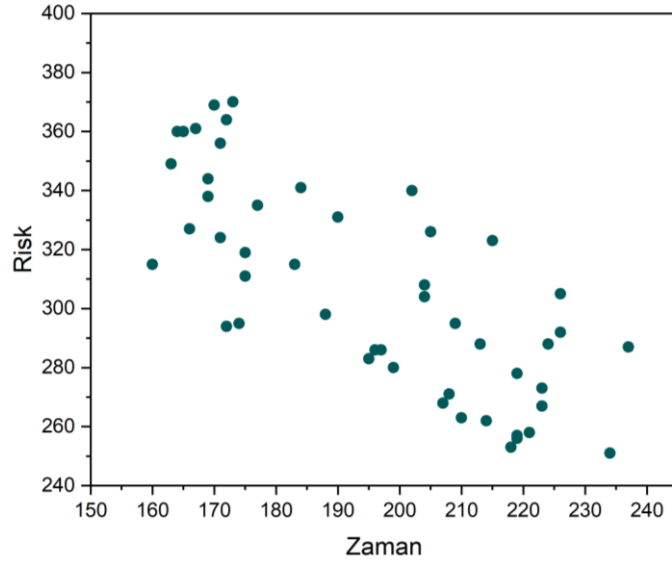
problemine uygulanmasıyla elde edilen Pareto çözümlerini göstermektedir. Tablo 9, Pareto çözümlerinin ayrıntılı bir sunumunu sağlamaktadır.

Tablo 9. 13 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları

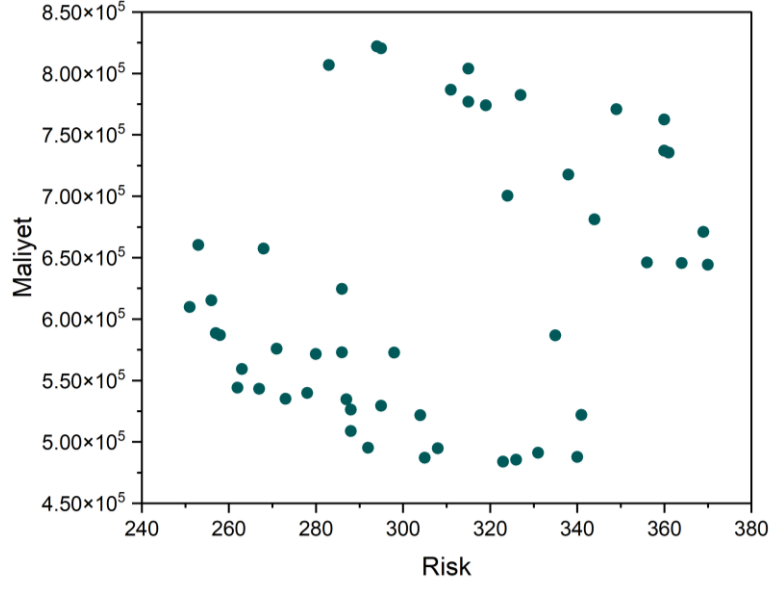
Pareto no	Time	Cost	Safety Risk	Optimal Modlar												
1	215	483995,93	323	2	2	1	1	1	1	2	1	3	1	2	1	2
2	160	803959,36	315	1	1	2	2	2	3	2	3	4	3	1	2	1
3	234	609697,73	251	1	1	2	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1
4	172	821929,89	294	1	1	2	1	2	3	1	3	4	2	1	2	1
5	237	534589,81	287	2	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	2
6	173	644119,80	370	2	2	1	2	2	3	2	1	4	1	2	2	2
7	169	717544,49	338	2	1	1	2	2	3	2	1	4	2	2	2	1
8	195	806816,84	283	1	1	1	1	2	2	1	3	3	2	1	2	1
9	164	762480,49	360	2	2	1	1	2	3	2	3	4	2	2	2	2
10	169	681059,82	344	1	2	2	1	2	3	2	1	4	2	1	2	2
11	205	485436,38	326	2	2	1	1	2	1	2	1	3	1	2	1	2
12	163	770878,68	349	2	2	1	2	2	3	2	3	4	2	1	2	2
13	175	786644,91	311	1	1	2	1	2	3	1	3	4	1	2	2	1
14	210	559407,20	263	1	1	1	1	1	1	1	1	4	3	1	1	1
15	196	624500,20	286	1	1	1	1	1	1	2	3	2	1	2	1	1
16	226	487071,95	305	1	2	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	2
17	218	660340,54	253	1	1	1	1	1	1	1	3	3	2	1	1	1
18	208	575822,05	271	1	2	2	1	1	1	1	1	4	2	1	1	1
19	224	508738,34	288	1	2	2	1	1	1	1	1	3	3	1	1	2
20	188	572721,00	298	2	2	1	2	2	1	2	1	4	2	1	1	1
Ortalama	195,05	644887,77	305,75	NOP:50, NOI:100												
NOP = Popülasyon sayısı, NOI=İterasyon sayısı																



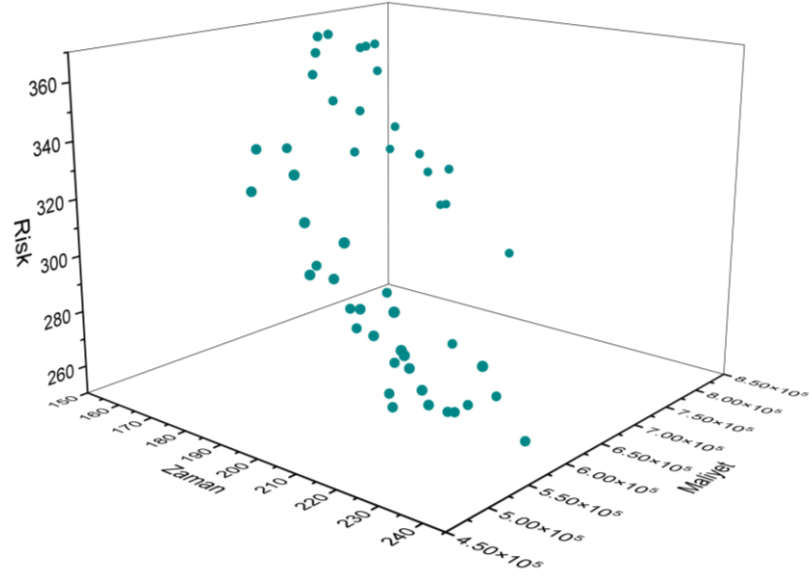
Şekil 10. 13 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümleri



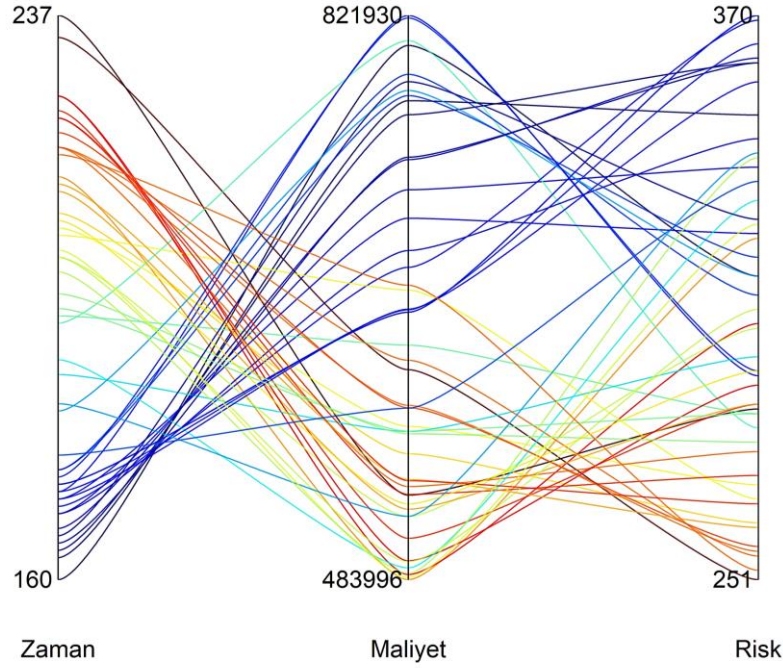
Şekil 11. 13 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri



Şekil 12. 13 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri



Şekil 13. 13 aktiviteli problemi için pareto çözümleri



Şekil 14. 13 aktiviteli problemi için pareto çözümleri

NDSII-Jaya modelinin performansı, NSGAIİ (Sharma ve Trivedi, 2020) ve NDSII-Rao-2 (Yılmaz ve Dede, 2024) algoritmalarıyla karşılaştırmalı olarak, Tablo 10'ta belirtilen 13 aktiviteli proje kullanılarak değerlendirilmiştir. NDSII-Jaya 160 güne ulaşarak zamanı optimize eder. Bu, Rao-2'ye eşdeğerdir ve NSGAIİ'den %24 daha iyi performans gösterir. Rao-2 ve NDSII-Jaya maliyet optimizasyonu için eşit minimum maliyetler elde etmektedir. Rao-2 (215 gün, \$484,185.49, 320 risk) için çözüm sağlamaktadır. NDSII-Jaya ise (205 gün, 485.436,38 \$, 326 risk) ile zaman kısıtının öncelikli olduğu senaryolarda tercih edilebilir bir çözüm sunmaktadır. Bu, projenin süresini 10 gün azaltırken maliyeti yalnızca %0,3 oranında artırmaktadır. NDSII-Jaya, güvenlik riski için minimum 251 değerine ulaşır. Bu değer NSGAIİ'den %15,8 daha iyidir ve Rao-2'nin en iyi performansına eşittir. Ayrıca, 661.834,25 \$ maliyetle sonuçlanan ve 252 risk puanına sahip Rao-2 ile karşılaştırıldığında, NDSII-Jaya, 253 risk puanıyla 660.340,54 \$ ile biraz daha uygun maliyetlidir. NDSII-Jaya zaman, maliyet ve güvenlik riski optimizasyonu açısından dengeli ve etkili çözümler sunmaktadır.

Tablo 10. NDS-II-Jaya kullanılarak 13 aktiviteli problemi için karşılaştırma

	NSGAI (Sharma ve Trivedi, 2020)			Rao-2 (Yılmaz ve Dede, 2024)			NDSII-Jaya (Bu çalışma)		
Durum	Zaman (gün)	Maliyet (\$)	Güvenlik Risk	Zaman (gün)	Maliyet (\$)	Güvenlik Risk	Zaman (gün)	Maliyet (\$)	Güvenlik Risk
Zaman	211	500788	298	160	795589,40	331	160	803959,36	315
				161	819043,47	309	163	770879,68	349
Maliyet				215	483995,93	323	215	483996,93	323
				215	484185,49	320	205	485436,38	326
Güvenlik Risk				234	609697,77	251	234	609698,73	251
				216	661834,25	252	218	660341,54	253
NOP	-			50			50		
NOI	-			100			100		
NFE	-			5050			5050		

3.3. 18 Aktiviteli Örnek

İlk olarak Feng ve diğerleri (1997) tarafından ortaya konan vaka çalışmasına akademik literatürde geniş ölçüde atıfta bulunulmuştur. Afshar ve Dolabi (2014) bu çalışmanın kapsamını güvenlik riski hususlarını da dahil ederek genişletmiştir. Ayrıca araştırma, hesaplamalarına günlük 200 dolarlık dolaylı maliyeti de dahil etmiştir. İki ila beş alternatif mod kullanılarak 18 faaliyetli bir örnek uygulanmıştır. Bu 18 faaliyetli problem için proje detayları Tablo 11'de sunulmuştur.

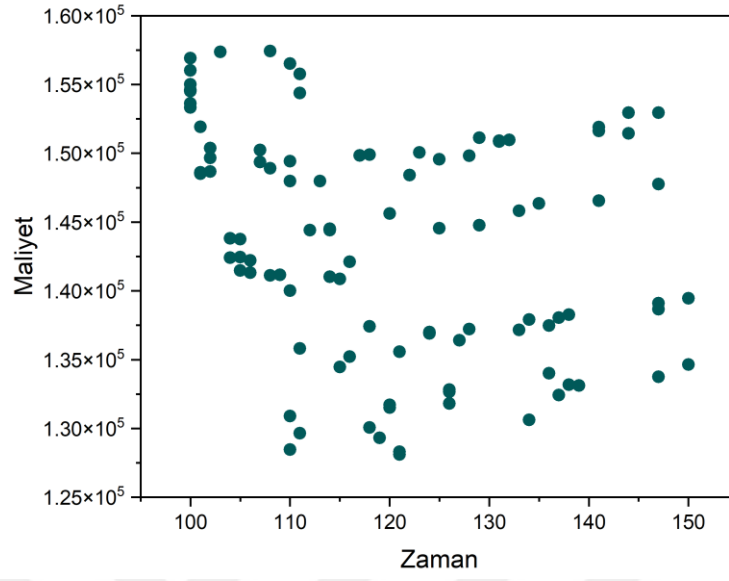
NDSII-Jaya, 100 popülasyon büyüklüğü ve 100 iterasyon ile Tablo 11'de sunulan verileri kullanarak örneği analiz etmek için kullanılmıştır. NDSII-Jaya 10100 olası farklı programı incelemiştir. NDSII-Jaya'nın 18 aktiviteli problemine uygulanmasıyla elde edilen Pareto çözümleri Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19'da gösterilmektedir. Tablo 12'de Pareto çözümlerinin ayrıntılı bir sunumu yer almaktadır.

Tablo 11. 18 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri

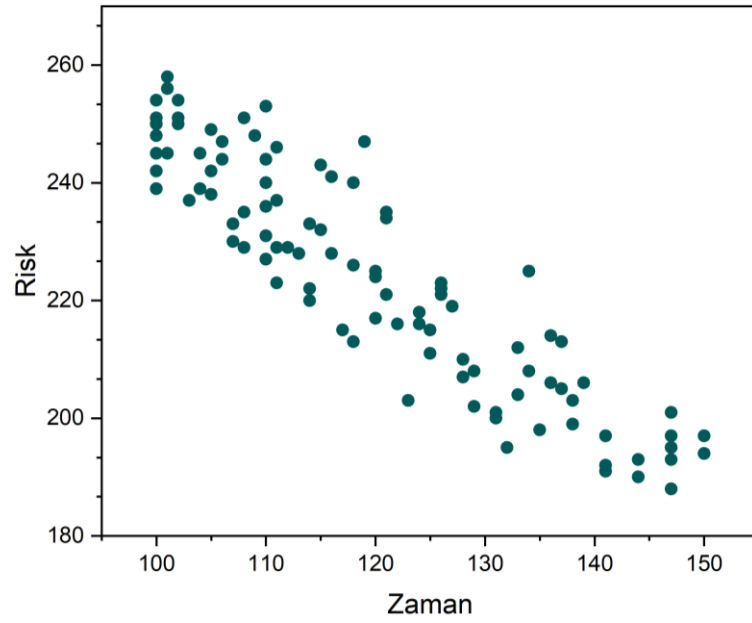
Aktivite	Öncül aktivite	Mod 1			Mod 2			Mod 3			Mod 4			Mod 5		
		Zaman	Maliyeti (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR
1	–	14	2400	12	15	2150	9	16	1900	12	21	1500	8	24	1200	5
2	–	15	3000	30	18	2400	24	20	1800	20	23	1500	20	25	1000	18
3	–	15	4500	20	22	4000	24	33	3200	14						
4	–	12	45000	5	16	35000	5	20	30000	4						
5	1	22	20000	12	24	17500	8	28	15000	5	30	10000	9			
6	1	14	40000	12	18	32000	5	24	18000	9						
7	5	9	30000	24	15	24000	20	18	22000	12						
8	6	14	220	0	15	215	0	16	200	0	21	208	0	24	120	0
9	6	15	300	6	18	240	4	20	180	8	21	150	3	25	100	4
10	2,6	15	450	9	22	400	12	33	320	8						
11	7,8	12	450	3	16	350	5	20	300	4						
12	5,9,10	22	2000	30	24	1750	36	28	1500	24	30	1000	20			
13	3	14	4000	15	18	3200	18	24	1800	24						
14	4,10	9	3000	16	15	2400	15	18	2200	16						
15	12	12	4500	25	16	3500	30									
16	13,14	20	3000	10	22	2000	3	24	1750	6	28	1500	8	30	1000	6
17	11,14,15	14	4000	36	18	3200	36	24	1800	20						
18	16,17	9	3000	20	15	2400	18	18	2200	12						

Tablo 12. 18 aktiviteli problemi için Pareto sonuçları

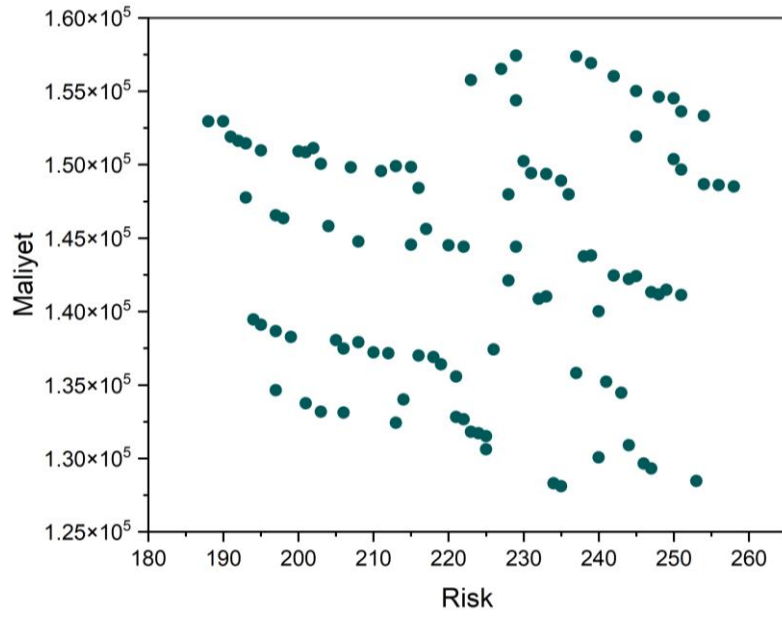
Pareto no	Zaman	Cost	Güvenlik Risk	Optimal Modlar																	
				1	5	3	3	3	1	3	5	1	1	2	1	3	2	1	2	1	1
1	100	154520	250	1	5	3	3	3	1	3	5	1	1	2	1	3	2	1	2	1	1
2	147	152958	188	5	5	3	3	3	2	3	4	4	1	1	4	1	2	1	2	3	3
3	121	128100	235	2	5	3	3	4	3	3	3	1	1	3	1	3	3	1	5	3	1
4	108	157420	229	1	5	3	3	3	1	3	5	1	1	1	4	1	2	1	2	1	1
5	150	134640	197	5	5	3	3	4	3	3	3	2	1	1	4	1	2	1	2	3	3
6	101	148520	258	1	5	3	3	4	1	3	5	1	1	2	1	3	3	1	5	1	1
7	144	152960	190	5	5	3	3	3	2	3	5	2	1	1	4	1	1	1	2	3	3
8	127	136400	219	4	5	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	1	2	3	1
9	150	139455	194	5	5	3	3	3	3	3	2	2	1	1	4	1	3	1	2	3	3
10	147	138670	197	5	5	3	3	3	3	3	5	1	1	3	4	1	3	1	2	3	3
11	141	151908	191	5	5	3	3	3	2	3	4	1	1	1	4	1	2	1	2	3	3
12	105	143750	238	2	5	3	3	4	2	3	3	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1
13	119	129320	247	1	5	3	3	4	3	3	5	1	1	2	1	3	3	1	5	1	3
14	135	146360	198	2	5	3	3	4	2	3	5	2	1	3	4	1	2	1	2	3	3
15	144	151440	193	5	5	3	3	3	2	3	3	2	1	1	4	2	3	1	2	3	3
16	141	146558	197	5	5	3	3	4	2	3	4	1	1	3	4	1	3	1	2	3	3
17	139	133120	206	3	5	3	3	4	3	3	5	1	1	1	4	1	2	1	2	3	3
18	129	151120	202	1	5	3	3	3	2	3	5	1	1	1	3	1	2	1	2	3	3
19	110	140008	240	1	5	3	3	2	3	3	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
20	116	135220	241	1	5	3	3	3	3	3	5	1	1	2	3	3	2	1	2	1	1
Ortalama	128,7	143622,35	215,5	NOP:100, NOI:100																	
NOP = Popülasyon sayısı, NOI=İterasyon sayısı																					



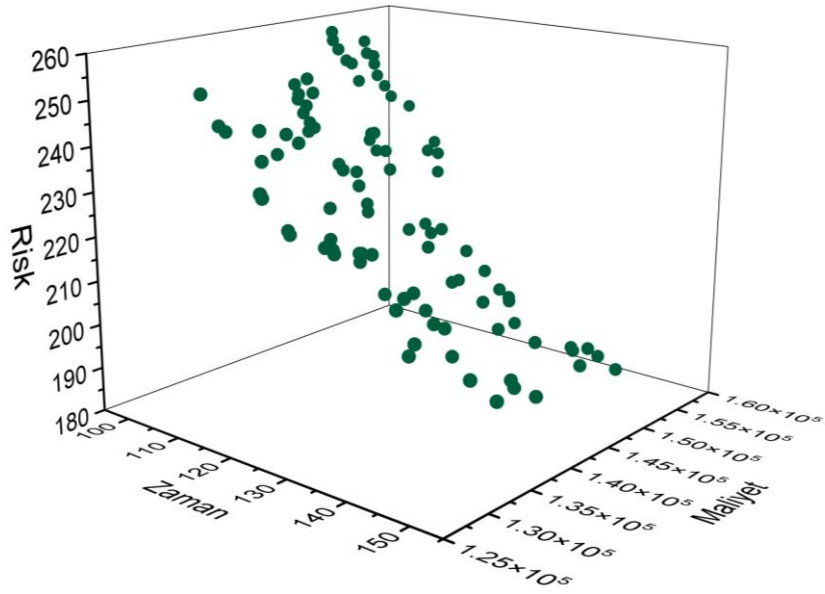
Şekil 15. 18 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümleri



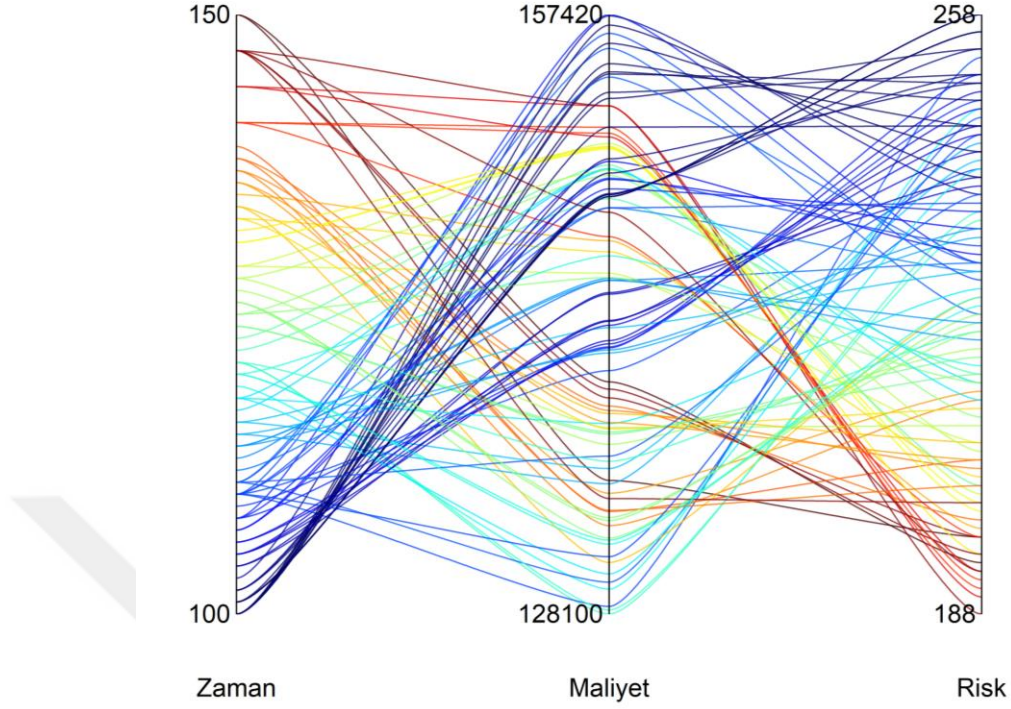
Şekil 16.18 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri



Şekil 17. 18 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri



Şekil 18. 18 aktiviteli problemi için pareto çözümleri



Şekil 19. 18 aktiviteli problemi için pareto çözümleri

NDSII-Jaya modelinin performansı, MOGA (Afshar and Dolabi, 2014) ve NDSII-Rao-2 (Yılmaz ve Dede, 2024) algoritmalarıyla karşılaştırmalı olarak, Tablo 13'te belirtilen 18 aktiviteli proje kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm modellerin 100 popülasyona ve 100 iterasyona sahip olduğu düşünülmüştür. Zaman optimizasyonu ile ilgili olarak, tüm yöntemler CPM'e göre minimum 100 günlük bir proje süresine ulaşmıştır. Veriler, NDSII-Jaya'nın kabul edilebilir maliyetleri korurken güvenlik riski optimizasyonunda üstün olduğunu göstermektedir. Minimum güvenlik riski puanı 188 olan NDSII-Jaya, MOGA (193) ve NDSII-Rao-2'den (189) daha iyi performans göstermektedir. NDSII-Jaya'nın minimum maliyeti (128.100 \$) ile NDSII-Rao-2 (127.820 \$) arasındaki fark önemsizdir. NDSII-Jaya her bir optimizasyon alanı için mükemmel ödünleşim çözümleri sunmaktadır. NDSII-Jaya (132 gün, 150.970 \$, 195 risk), MOGA tarafından aynı süre için sunulan çözümlerin üzerinde %7,1'lik bir güvenlik artışı göstermektedir. Benzer şekilde NDSII-Jaya, 123 günlük süre aşamasında 203 güvenlik riski değeri sunarak aynı proje süresi için her iki algoritmasından daha iyi performans gösterir. Bu ılımlı çözümler NDSII-Jaya'nın güvenlik avantajını korurken hem zaman hem de maliyet boyutlarında rekabetçi performansını sürdürmektedir.

Tablo 13. NDS-II-Jaya kullanılarak 18 aktiviteli problemi için karşılaştırma

	MOGA (Afshar and Dolabi, 2014)			NDSII-Rao-2 (Yılmaz and Dede, 2024)			NDSII-Jaya (Bu çalışma)		
	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk	Maliyet	Zaman	Güvenlik Risk	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk
1	100	156908	239	100	153320	254	100	154520	250
2	112	129720	247	112	128170	254	112	144420	229
3	118	132070	232	118	157820	214	118	149898	213
4	123	143765	213	123	144620	209	123	150058	203
5	127	137165	212	127	128720	229	127	136400	219
6	132	132605	210	132	128470	233	132	150970	195
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N	144	153158	193	149	153170	189	147	152958	188
NOP	100			100			100		
NOI	100			100			100		
NFE	10100			10100			10100		

3.4. 25 Aktiviteli Örnek

İlk olarak Marzouk ve diğerleri (2008) tarafından sunulan 25 aktiviteli problem, daha sonra Sharma ve Trivedi (2023) ile Yılmaz ve Dede (2024) tarafından yapılan çalışmalarda da kullanılmıştır. Bu vaka çalışması bir ila dört farklı mod kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 14, 25 aktiviteli problem için proje özelliklerinin kapsamlı bir özetini sunmaktadır.

Tablo 14. 25 aktiviteli örnek için zaman maliyeti ve güvenlik riski verileri

Aktivite	Öncül aktivite	Mod 1			Mod 2			Mod 3			Mod 4		
		Zaman	Maliyet (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR	Zaman	Maliyet (\$)	GR	Zaman	Maliyeti (\$)	GR
1		20	40000	1,49	18	50400	3,39	15	54000	3,73	14	58800	4,79
2	1	7	25400	4,82	5	29000	2,79	4	31000	3,85			
3	2	140	15000	3,79									
4	3	3	20000	3,43	1	20800	4,1						
5	4	3	38000	2,71	2	39000	2,11	1	39400	3,58			
6	5	1	28000	3,96									
7	6	5	8000	3,8	3	9000	4,28	2	10000	2,18			
8	7	7	76000	4,25	5	77200	4,67	3	77600	3,39	2	78000	3,79
9	8	4	50000	3,72	3	55000	2,96	2	60000	3,28			
10	9	10	6000	2,86	8	6800	3,53	5	8000	3,16			
11	10	3	26000	2,38	2	26500	2,23	1	27000	1,49			
12	11	1	20000	4,12									
13	12	8	16000	3,47	5	20000	3,59						
14	13	15	30000	4,75	12	34000	2,17	10	36000	2,19			
15	14	5	19000	2,91	3	24000	3,83						
16	15	2	16000	3,98	1	16400	2,93						
17	16	2	35400	2,45	1	36000	2,23						
18	17	1	24000	3,23									
19	18	3	7000	3,55	2	8000	3,77						
20	19	5	70000	2,38	3	72000	3,4	2	75000	3,28			
21	20	3	40000	2,81	2	45000	3,59						
22	21	8	6000	2,49	5	6800	4,8						

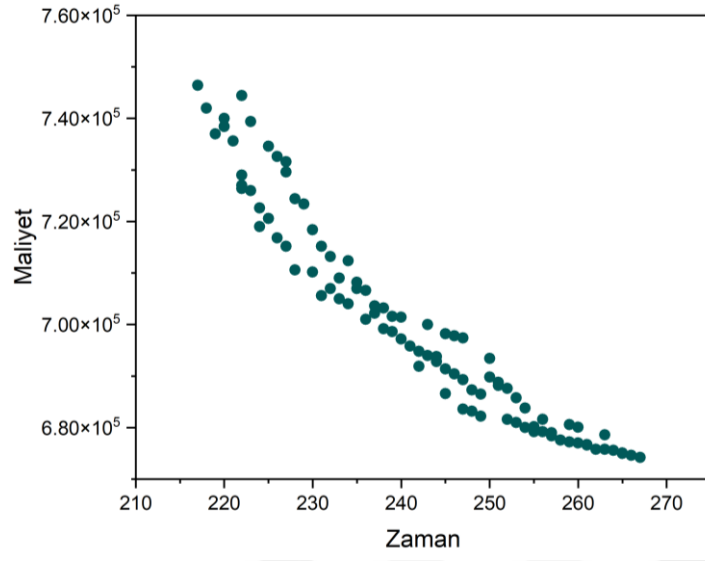
Tablo 14'ün devamı

23	22	3	24000	2,7	2	24800	2,93						
24	23	1	18000	3,12									
25	24	8	16000	3,76									

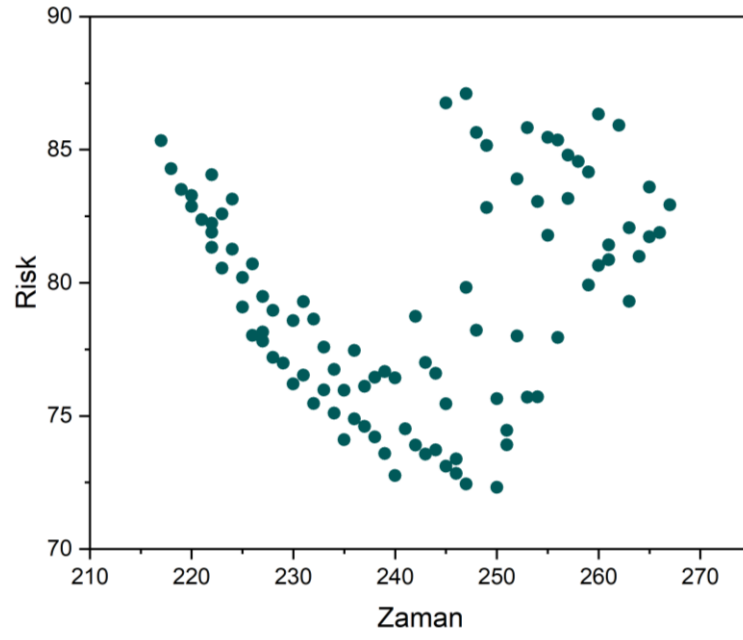
NDSII-Jaya, Tablo 14'te sunulan verileri kullanarak, 100 popülasyon büyüklüğü ve 150 iterasyon ile örneği analiz etmek için kullanılmıştır. NDSII-Jaya 15100 olası farklı programı incelemiştir. Şekil 20, Şekil 21, Şekil 22, Şekil 23, Şekil 24' da NDSII-Jaya'nın 25 aktiviteli problemine uygulanmasıyla elde edilen Pareto çözümlerini göstermektedir. Tablo 15'de Pareto çözümlerinin ayrıntılı bir sunumu yer almaktadır.

Tablo 15. 25 aktiviteli problemi için pareto sonuçları

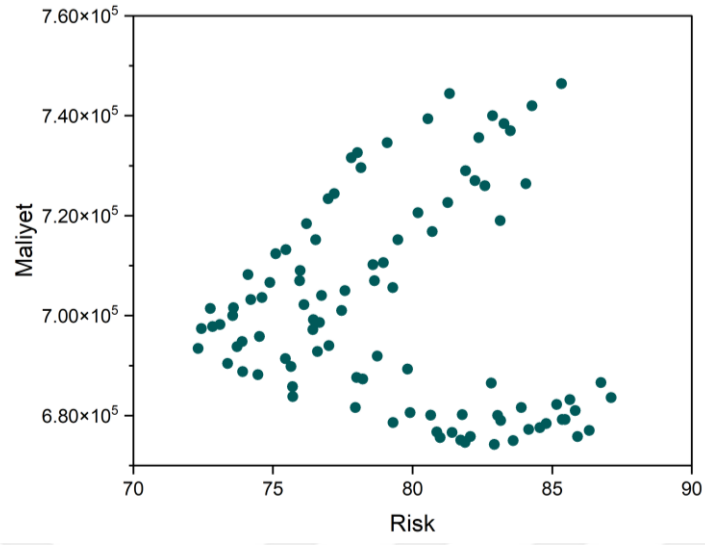
Pareto no	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk	Optimal Modlar																								
				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	267	674200	82,93	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	217	746400	85,34	4	3	1	2	3	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	2	2	2	1	1
3	217	746400	85,34	4	3	1	2	3	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	2	2	2	1	1
4	247	683600	87,11	1	1	1	2	3	1	2	4	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1
5	250	693400	72,32	1	2	1	1	2	1	3	3	2	1	3	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
6	267	674200	82,93	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	218	742000	84,28	3	3	1	2	3	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	2	2	2	1	1
8	225	720600	80,2	1	2	1	2	3	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	1	2	2	1	1
9	258	677600	84,56	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
10	219	737000	83,5	3	3	1	2	3	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	1	2	2	1	1
11	221	735600	82,37	4	3	1	2	2	1	3	3	2	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	1	2	2	1	1
12	227	731600	77,81	3	2	1	2	2	1	3	3	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	1	3	1	1	1	1	1
13	225	734600	79,09	3	3	1	2	2	1	3	3	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	1	1	1	1	1
14	241	695800	74,52	1	2	1	1	1	1	3	4	1	3	3	1	2	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
15	229	723400	76,98	1	2	1	2	2	1	3	4	3	3	3	1	2	3	2	2	2	1	1	3	2	1	2	1	1
16	234	712400	75,1	1	2	1	2	2	1	3	3	3	3	3	1	2	3	1	2	1	1	1	3	1	1	2	1	1
17	249	682200	85,16	1	1	1	2	2	1	1	4	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1
18	226	716800	80,71	1	3	1	2	3	1	3	4	2	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	3	1	2	1	1	1
19	245	686600	86,75	1	1	1	2	3	1	1	4	1	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1
20	222	727000	82,24	3	2	1	2	3	1	3	4	2	3	3	1	2	3	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1
Ortalama	158,7	569405,36	298,25	NOP:100, NOI:150																								
NOP = Popülasyon sayısı, NOI=İterasyon sayısı																												



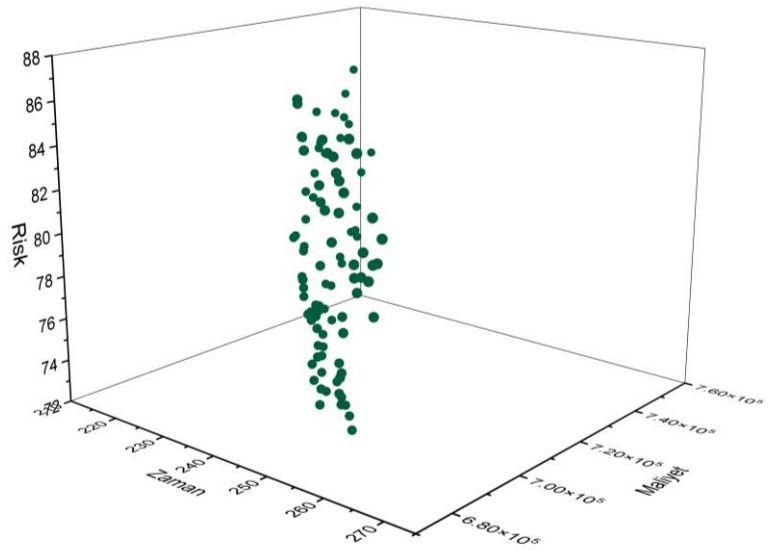
Şekil 20. 25 aktiviteli probleminin zaman-maliyet pareto çözümler



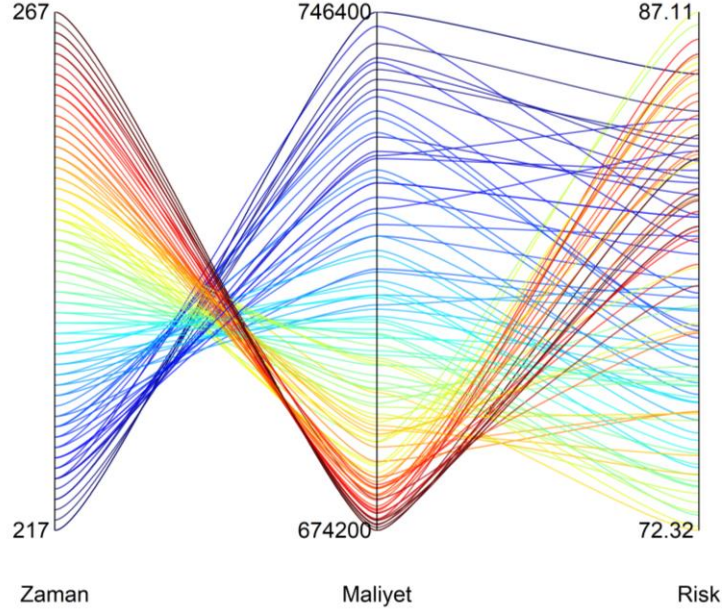
Şekil 21.25 aktiviteli probleminin zaman-risk pareto çözümleri



Şekil 22. 25 aktiviteli probleminin maliyet-risk pareto çözümleri



Şekil 23. 25 aktiviteli problemi için pareto çözümleri



Şekil 24. 25 aktiviteli problemi için pareto çözümleri

NDSII-Jaya modelinin performansı, Tablo 16'da listelenen 25 aktiviteli bir proje kullanılarak NDSII-GWO ve NDSII-Rao-2 algoritmaları (Yılmaz ve Dede, 2024) ile karşılaştırılmıştır. Zaman optimizasyonunda, NDSII-Jaya 217 günlük minimum süre ile NDSII-Rao-2'ye benzer sonuçlar elde ederken, NDSII-GWO 222 gün elde etmiştir. Maliyet optimizasyonunda NDSII-Jaya, NDSII-GWO'nun 676.600 '\$'ından daha iyi performans gösterirken NDSII-Rao-2'nin 673.800 '\$'ı ile karşılaştırılabilir. Tüm yöntemlerin benzer maliyet verimliliklerine ulaştığı görülebilir. Güvenlik riskinin azaltılmasında NDSII-Jaya, NDSII-GWO ve NDSII-Rao-2'den biraz daha iyi performans göstererek 694300 '\$'lık en düşük maliyetle 72,32 minimum risk değerine ulaşmıştır. Bu da NDSII-Jaya'nın maliyet ve zaman açısından rekabetçi bir performans sunarken güvenlik riski açısından hafif bir avantaj sağladığını göstermektedir. Genel olarak, NDSII-Jaya hesaplama verimliliğini korurken üç hedefi etkili bir şekilde dengeler.

Tablo 16. NDS-II-Jaya kullanılarak 25 aktiviteli problemi için karşılaştırma

Durum	NDSII-GWO (Yılmaz and Dede, 2024)			NDSII-Rao-2 (Yılmaz and Dede, 2024)			NDSII-Jaya (Bu çalışma)		
	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk	Zaman	Maliyet	Güvenlik Risk
Zaman	222	739200	82,49	217	746000	85,34	217	746400	85,34
	223	727100	84,39	218	741000	84,56	219	737000	83,5
Maliyet	261	676600	81,69	268	673800	82,93	267	674200	82,93
	263	676800	81,54	267	674200	81,88	258	677600	84,56
Güvenlik Risk	249	693800	72,55	248	695000	72,34	250	693400	72,32
	246	697800	72,67	247	695800	72,57	241	695800	74,52
Populasyon hacmi	100			100			100		
İterasyon sayısı	150			150			150		
NFE	15100			15100			15100		

3.5. Zaman-Maliyet-Risk Optimizasyonunda Çözüm Kalitesi

Pareto-optimal çözümlerin kalitesi, hem ideal ön cepheye yakınlık (convergence) hem de çözüm çeşitliliğini (spread) dikkate alan hiper-hacim (hypervolume) ölçütü aracılığıyla değerlendirilmiştir. Dört farklı vaka çalışmasından elde edilen sonuçlar, NDSII-Jaya algoritmasının üstün performansını tutarlı bir biçimde ortaya koymuştur. Algoritma, dört projeden üçünde en yüksek hiper-hacim değerine ulaşmış ve bu sayede yakınsama ve çeşitlilik açısından diğer NDSII tabanlı varyantlara kıyasla önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

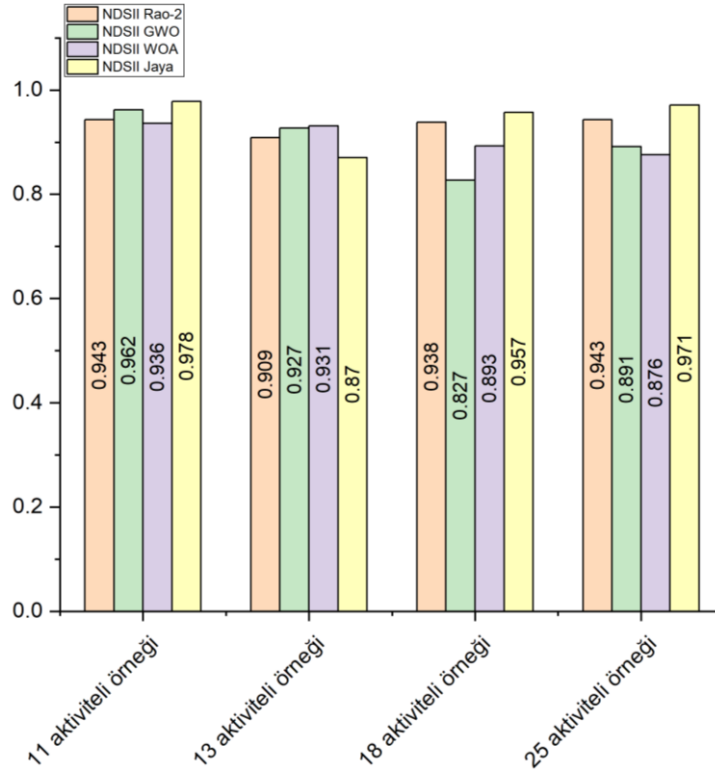
Özellikle 18 ve 25 aktiviteden oluşan daha karmaşık örneklerdeki tutarlı üstünlük, algoritmanın sağlamlık ve uyarlanabilirlik özelliklerini açıkça ortaya koymaktadır. Her ne kadar 13 aktivite içeren örnekte göreceli olarak daha düşük bir hiper-hacim değeri elde edilmiş olsa da, bu durum büyük olasılıkla söz konusu problemin yapısından kaynaklanmaktadır; zira bu yapı, ödünleşim alanını sınırlandırmakta ya da daha katı kısıtlar getirmektedir. Bununla birlikte, NDSII-Jaya algoritması bu durumda bile rekabet gücünü korumayı başarmıştır.

Genel olarak elde edilen bulgular, NDSII-Jaya algoritmasının, inşaat proje yönetiminde zaman, maliyet ve risk unsurlarının eşzamanlı olarak optimize edilmesinde güvenilir ve etkili bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Tablo 17, farklı büyüklüklerdeki problem senaryoları kapsamında NDSII-Jaya ve karşılaştırmalı diğer algoritmalara ait hiper-hacim (HV) performans metriklerini sunmaktadır. Dört farklı proje örneğinde

gerçekleştirilen değerlendirmeler, önerilen yaklaşımın değişken karmaşıklık düzeylerine sahip inşaat zamanlama problemleriyle başa çıkma konusundaki esnekliğini ve etkinliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 17. NDSII tabanlı algoritmaların hiper hacim performans karşılaştırması

	NDSII Rao-2 (Yılmaz ve Dede, 2024)	NDSII GWO (Yılmaz ve Dede, 2024)	NDSII WOA (Yılmaz ve Dede, 2024)	NDSII Jaya (Bu çalışma)
11 aktiviteli problemi	0,943	0,962	0,936	0,978
13 aktiviteli problemi	0,909	0,927	0,931	0,870
18 aktiviteli problemi	0,938	0,827	0,893	0,957
25 aktiviteli problemi	0,943	0,891	0,876	0,971



Şekil 25. Hiper hacim performans karşılaştırması

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, NDSII-Jaya algoritmasının, yapım proje yönetiminde zaman, maliyet ve güvenlik risk arasındaki kritik ödünleşimi çözmeye konusundaki uyarlanabilirliğini ve etkinliğini açık biçimde ortaya koymuştur. Jaya optimizasyon algoritması ile Baskın Olmayan Sıralama II (NDSII) tekniğinin entegrasyonu ile geliştirilen bu yöntem, iyi dağılmış, pareto-optimal çözümler üretebilen, güvenilir, esnek ve uygulanabilir bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Gerçekleştirilen örnek çalışmaların sonuçları, NDSII-Jaya algoritmasının sıklıkla çelişen hedefler olan proje süresinin kısaltılması, toplam maliyetlerin azaltılması ve güvenlik risklerinin sınırlandırılması arasında etkili bir denge sağladığını göstermiştir. Algoritmanın başarımını değerlendirmek amacıyla hiper-hacim analizi kullanılmış ve bu metrik, Pareto-optimal çözümlerin çeşitliliğini ve yakınsama derecesini doğru biçimde yansıttığı için tercih edilmiştir. Elde edilen bulgular, NDSII-Jaya algoritmasının hiper-hacim değerleri açısından benzer yöntemleri tutarlı biçimde geride bıraktığını ve bu yönüyle Zaman-Maliyet-Güvenlik Risk optimizasyonunda daha kapsamlı ve üstün ödünleşim çözümleri geliştirme kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Algoritma, parametre ayarı gerektirmeyen yapısı ve özellikle karmaşık ve gerçekçi proje senaryolarında gösterdiği tutarlı performans, onu gerçek dünya inşaat projeleri için ideal bir çözüm aracı hâline getirmektedir. Bir diğer önemli avantajı ise, farklı proje kısıtlarına göre farklı hedeflerin önceliklendirilmesine olanak tanıyan yüksek kaliteli ve çeşitli çözüm kümeleri sunabilmesidir; bu yönüyle karar vericilere stratejik esneklik sağlar.

Bu çalışmada gerçekleştirilen ileri düzey çok amaçlı optimizasyonun kapsamlı incelenmesi ve uygulanması, hem akademik literatüre hem de inşaat sektörüne anlamlı katkılar sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, karar verme süreçlerinin iyileştirilmesine, inşaat parametrelerinin optimize edilmesine ve karmaşık proje kısıtlarının yönetilmesi yoluyla proje çıktılarına olumlu katkı sağlanmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca, algoritmanın uygulama kolaylığı ve esnek yapısı, onu günümüz inşaat sektöründe sıkça karşılaşılan dinamik ve değişken koşullar için özellikle uygun hâle getirmektedir.

Gelecekteki çalışmalar için, algoritmanın daha büyük ölçekli projelerde test edilmesi, ilave gerçek dünya kısıtlarının modele dâhil edilmesi ve diğer meta-sezgisel yaklaşımlarla hibritleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, algoritmanın değişken kaynak kullanılabilirliği, farklı risk senaryoları ve çeşitli proje boyutları gibi farklı koşullar altındaki performansının

da incelenmesi yerinde olacaktır. Önerilen optimizasyon yaklaşımı, aynı zamanda kaynak sürdürülebilirliği, çevresel etki ve kalite performansı gibi yeni hedefleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Buna ek olarak, gerçek zamanlı veri analitiği ve makine öğrenmesi yaklaşımlarının entegrasyonu, algoritmanın uyarlanabilirlik ve öngörü kapasitesini daha da artırarak, karmaşık inşaat projelerine yönelik akıllı ve genişletilmiş bir çözüm çerçevesi sunabilir.



5. KAYNAKLAR

- Afshar, A., & Zolfaghar Dolabi, H. R. (2014). Multi-objective optimization of time-cost-safety using genetic algorithm. *Iran University of Science & Tehnology*, 4(4), 433-450.
- Almufti, S. M. (2015). U-turning ant colony algorithm powered by great deluge algorithm for the solution of TSP problem (Doctoral dissertation, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)).
- Almufti, S. M. (2019). Historical survey on metaheuristics algorithms. *International Journal of Scientific World*, 7(1), 1.
- Almufti, S., Marqas, R., & Ashqi, V. (2019). Taxonomy of bio-inspired optimization algorithms. *Journal of Advanced Computer Science & Technology*, 8(2), 23. <https://doi.org/10.14419/jacst.v8i2.29402>
- Amoozad Mahdiraji, H., Razavi Hajiagha, S. H., Hashemi, S. S., & Zavadskas, E. K. (2016). A grey multi-objective linear model to find critical path of a project by using time, cost, quality and risk parameters. *E a M: Ekonomie a Management*, 19(1), 49–61. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2016-1-004>
- Anh Nguyen, D., Nguyen, N. T., Tran, Q., & Tran, D. H. (2023). Tradeoff different construction project goals in using a novel multi-objective sea horse algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 82, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.09.059>
- Askarifard, M., Abbasianjahromi, H., Sepehri, M., & Zeighami, E. (2021). A robust multi-objective optimization model for project scheduling considering risk and sustainable development criteria. *Environment, Development and Sustainability*, 23(8), 11494–11524. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01123-z>
- Auger, A., Bader, J., Brockhoff, D., & Zitzler, E. (2009, January). Theory of the hypervolume indicator: Optimal μ -distributions and the choice of the reference point. In *Proceedings of the tenth ACM SIGEVO workshop on Foundations of Genetic Algorithms* (pp. 87-102).
- Audet, C., Bignon, J., Cartier, D., Le Digabel, S., & Salomon, L. (2021). Performance indicators in multiobjective optimization. *European journal of operational research*, 292(2), 397-422.
- Babalola, A., Manu, P., Cheung, C., Yunusa-Kaltungo, A., & Bártolo, P. (2023). A systematic review of the application of immersive technologies for safety and health management in the construction sector. *Journal of Safety Research*, 85, 6685. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.01.007>
- Bäck, T., & Schwefel, H. P. (1993). An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary computation*, 1(1), 1-23.

- Banihashemi, A., & Khalilzadeh, M. (2022). Time-cost-quality-risk Trade-off Project Scheduling Problem in Oil and Gas Construction Projects: Fuzzy Logic and Genetic Algorithm. In *Jordan Journal of Civil Engineering* (Vol. 16, Issue 2).
- Bader, J., & Zitzler, E. (2011). HypE: An algorithm for fast hypervolume-based many-objective optimization. *Evolutionary computation*, 19(1), 45-76.
- Baradan, S., & Usmen, M. A. (2006). Comparative injury and fatality risk analysis of building trades. *Journal of construction engineering and management*, 132(5), 533-539.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268-308.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems* (No. 1). Oxford university press.
- Cooke, B., & Williams, P. (2024). *Construction planning, programming and control*. John Wiley & Sons.
- Cooper, D. (2005). *Project risk management guidelines*. John wiley & sons, Inc.
- Dantzig, G. B. (2016). *Linear programming and extensions*. Princeton University Press.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). *An outline of the building description system research* (Report No. 50). Institute of Physical Planning.
- Eastman, C. M., Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-28753-7.
- El-Rayes, K., & Khalafallah, A. (2005). Trade-off between safety and cost in planning construction site layouts. *Journal of construction engineering and management*, 131(11), 1186-1195.
- El-Sayegh, S. M. (2008). Risk assessment and allocation in the UAE construction industry. *International journal of project management*, 26(4), 431-438.
- Fareed, G., Nawaz, M. J., Iqbal, S., Ummara, U., & Hamza, A. (2024). Examining the impact of operational strategy and employee motivation on project performance in the construction projects. *Migration Letters*, 21(S8), 86-101. <https://doi.org/10.59670/ml.v21is8.9232>
- Fateminia, S. H., Seresht, N. G., & Fayek, A. R. (2019, May 21-24). Evaluating risk response strategies on construction projects using a fuzzy rule-based system. In *Proceedings of*

the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019). Banff, AB, Canada.

- Feng, C. W., Liu, L., & Burns, S. A. (1997). Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems. *Journal of computing in civil engineering*, 11(3), 184-189.
- Flanagan, R., Jewell, C., & Johansson, J. (2007). Riskhantering i praktiken. Byggnadsekonomi, Institutionen för bygg-och miljöteknik, Centrum för management i byggsektorn (CMB). Göteborg: Chalmers Repro.
- Ghaeb, H. O., & Mahjoob, A. M. R. (2023). Risk Response in Construction Project: A Review Study. *Journal of Engineering*, 29(08), 121–137. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.08.09>
- Hallowell, M. R., & Gambatese, J. A. (2010). Qualitative research: Application of the Delphi method to CEM research. *Journal of construction engineering and management*, 136(1), 99-107.
- Hegazy, T. 2002, Computer-based construction project management, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). Introduction to operations research. McGraw-Hill.
- Hinze, J. (2012). Construction planning and scheduling. Pearson Education.
- Holland, J. H. (1992). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press.
- Iqbal, S., Nawaz, M. J., Ali, A., Osman, E., & Hamza, A. (2024). Investigating the impact of project planning on construction project success through the mediating role of risk management and safety climate. *International Journal of Organizational Leadership*, 13(First Special Issue 2024), 119-139.
- Jain, S., & Dubey, K. K. (2023). Employing the latin hypercube sampling to improve the NSGA III performance in multiple-objective optimization. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(8), 3319-3330.
- Jannadi, O. A., & Almishari, S. (2003). Risk assessment in construction. *Journal of construction engineering and management*, 129(5), 492-500.
- KarimiAzari, A., Mousavi, N., Mousavi, S. F., & Hosseini, S. (2011). Risk assessment model selection in construction industry. *Expert systems with applications*, 38(8), 9105-9111.
- Kelley Jr, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. In Papers presented at the December 1-3, 1959, eastern joint IRE-AIEE-ACM computer conference (pp. 160-173).
- Kerzner, H. (2025). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.

- Kerzner, H., & Saladis, F. P. (2017). Project management workbook and PMP/CAPM exam study guide. John Wiley & Sons.
- Lakshminarayanan, S., Gaurav, A., & Arun, C. (2010). Multiobjective optimization of time-cost-risk using ant colony optimization. *International Journal of Project Planning and Finance*, 1(1), 22-38.
- Laufer, A., & Ledbetter, W. B. (1986). Assessment of safety performance measures at construction sites. *Journal of construction engineering and management*, 112(4), 530-542.
- Long, L. D., Tran, D. H., & Nguyen, P. T. (2019). Hybrid multiple objective evolutionary algorithms for optimising multi-mode time, cost and risk trade-off problem. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 60(3), 203-214.
- Lo, W., & Kuo, M. E. (2013). Cost impact of float loss on a project with adjustable activity durations. *Journal of the Operational Research Society*, 64(8), 1147-1156.
- Mahmoudi, A., & Feylizadeh, M. R. (2018). A grey mathematical model for crashing of projects by considering time, cost, quality, risk and law of diminishing returns. *Grey Systems*, 8(3), 272–294. <https://doi.org/10.1108/GS-12-2017-0042>
- Mansell, P., & Philbin, S. P. (2020). Measuring sustainable development goal targets on infrastructure projects. *The Journal of Modern Project Management*, 8(1). <https://doi.org/10.19255/jmpm02303>
- Maravas, A., & Pantouvakis, J. P. (2025). Schedules Anima: Dynamic Visualization of Gantt Charts and Resource Usage Graphs in Project Scheduling. *Buildings*, 15(3), 393.
- Mhetre, K., Konnur, B. A., & Landage, A. B. (2016). Risk management in construction industry. *International Journal of Engineering Research*, 5(1), 153-155.
- Mohammadipour, F., & Sadjadi, S. J. (2016). Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem. *Computers and Industrial Engineering*, 95, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.025>
- Morse, P. M., & Kimball, G. E. (2012). *Methods of operations research*. Courier Corporation.
- Nassar, A., & Reiter, S. (2024, February 23). Why a circular built environment makes economic and environmental sense [Commentary]. Reuters. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/comment-why-circular-built-environment-makes-economic-environmental-sense-2024-02-23/>
- Nederveen, G.A. and Tolman, F.P. (1992) Modelling Multiple Views on Buildings. *Automation in Construction*, 1, 215-224. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B)
- Odeh, A. M., & Battaineh, H. T. (2002). Causes of construction delay: traditional contracts. *International journal of project management*, 20(1), 67-73.

- Okate, A., & Kakade, V. (2019). Risk management in road construction projects: High volume roads. In *Proceedings of Sustainable Infrastructure Development & Management (SIDM) 2019*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3375904>
- Ozcan-Deniz, G., Zhu, Y., & Ceron, V. (2012). Time, cost, and environmental impact analysis on construction operation optimization using genetic algorithms. *Journal of management in engineering*, 28(3), 265-272.
- Panahi, A., Habibirad, A., & Safari, S. (2023). Developing a mathematical programming model to determine the optimal portfolio of capital projects in oil and gas companies to achieve the strategic goals. *Project Management Research*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.22050/pbr.2023.340014.1262>
- Panwar, A., & Jha, K. N. (2021). Integrating Quality and Safety in Construction Scheduling Time-Cost Trade-Off Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001979](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001979)
- Peters, L. (2023, June 11). Construction risk management: Identifying and managing project risks. Document Crunch. <https://www.documentcrunch.com/blog/construction-risk-management>
- Potts, K., & Ankrah, N. (2014). *Construction cost management: learning from case studies*. Routledge.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (7th ed.)*. Project Management Institute
- Que, B. C. (2002). Incorporating practicability into genetic algorithm-based time-cost optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(2), 139-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:2(139))
- Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.
- Salem, M., Asim, M., & Banerjee, R. (2022). Identification of success factors in construction projects-a systematic literature review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(5), 1437–1439. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.42526>
- Sampaio, A. Z., Gomes, N. R., Gomes, A. M., & Sanchez-Lite, A. (2022). Multi-project in an integrated BIM model: Clash detection and construction planning. *Journal of Software Engineering and Applications*, 15(10), 345-358.
- Schatteman, D., Herroelen, W., Van de Vonder, S., & Boone, A. (2008). Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 134(11), 885-893.
- Schieg, M. (2006). Risk management in construction project management. *Journal of Business Economics and Management*, 7(2), 77-83.

- Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2023). Optimization in construction management using adaptive opposition slime mould algorithm. *Advances in Civil Engineering*, 2023(1), 7228896.
- Sharma, H., & Trivedi, M. K. (2020). Integrating the safety risk in time-cost analysis of construction projects. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 8(8), 1-6. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.32135>
- Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2022). 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*, 22(16), 3158–3168. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1843769>
- Sharma, K., Soni, A., & Trivedi, M. K. (2023). A Particle Swarm Optimization-Based Model for Quality–Safety Trade-Off Optimization Under Constraint Duration and Cost of Construction Project. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 115–126. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9285-8_12
- Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2023a). Modelling the resource constrained time-cost-quality-safety risk-environmental impact trade-off using opposition-based NSGA III. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(8), 3083–3098. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00696-0>
- Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2023b). Discrete OBNSGA III method-based robust multi-objective scheduling model for civil construction projects. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24, 2247–2264. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00638-w>
- Shishehgarkhaneh, M. B., Azizi, M., Basiri, M., & Moehler, R. C. (2022). BIM-Based Resource Tradeoff in Project Scheduling Using Fire Hawk Optimizer (FHO). *Buildings*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/buildings12091472>
- Smith, N. J., Merna, T., & Jobling, P. (2006). *Managing risk in construction projects* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- Tanojo, F. H., Hidayat, S., & Azis, S. (2018). The analysis of risk management implementation on hospital construction projects. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(7), 574-583.
- Tembo-Silungwe, C. K., & Khatle, N. (2017). Deciphering priority areas for improving project risk management through critical analysis of pertinent risks in the Zambian construction industry. *Acta Structilia*, 24(2), 1-43. <https://doi.org/10.18820/24150487/as24i2.1>
- Tran, D. H., & Long, L. D. (2018). Project scheduling with time, cost and risk trade-off using adaptive multiple objective differential evolution. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(5), 623–638. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2017-0085>

- Vijayan, V., Riyana, M. S., & Jayakrishnan, R. (2018). Time-cost-risk optimization in construction work by using ant colony algorithm. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(04).
- Ward, S., & Chapman, C. (2003). Transforming project risk management into project uncertainty management. *International Journal of Project Management*, 21(2), 97-105.
- Winch, G. M. (2012). *Managing construction projects*. John Wiley & Sons.
- Winegard, L. A., & Warhoe, S. P. (2003). Understanding risk to mitigate changes and avoid disputes. *AACE International Transactions*, RI12.
- Zou, P. X., Zhang, G., & Wang, J. (2007). Understanding the key risks in construction projects in China. *International journal of project management*, 25(6), 601-614.
- Yilmaz, M., & Dede, T. (2024). Multi-objective time-cost-safety risk trade-off optimization for the construction scheduling problem. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2024-0249>
- Zhan, Z., Hu, Y., Xia, P., & Ding, J. (2024). Multi-objective optimization in construction project management based on NSGA-III: Pareto front development and decision-making. *Buildings*, 14(7), 2112. <https://doi.org/10.3390/buildings14072112>
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257-271.
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., & Da Fonseca, V. G. (2003). Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 7(2), 117-132.

ÖZGEÇMİŞ

Theint Shwe Sin, lisans eğitimine 2012 yılında West Yangon Technological University (Batı Yangon Teknoloji Üniversitesi) İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2017 yılında Teknoloji Lisans diplomasını aldı. 2019 yılında aynı üniversiteden İnşaat Mühendisliği alanında 2019 yılında Mühendislik Lisans diplomasını tamamladı. Ayrıca, Birleşik Krallık merkezli Ticari Yönetim Enstitüsü (Institute of Commercial Management) tarafından verilen Proje Yönetimi alanında tek derslik diploma programını tamamladı. 2019-2021 yılları arasında özel sektörde saha mühendisi olarak görev yaptı. 2022 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi (Karadeniz Technical University), Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Burmaca, İngilizce ve Türkçe dillerini akıcı şekilde konuşmaktadır.

Yayınlar

- Sin, T. S., & Dede, T. (2024). A Review for the Multi-Objective Optimization of Time-Cost-Risk Trade-off in Construction. *ISERDAR*, 2(3), 54-63.
- Dede, T., Sin, T. S., Yılmaz, M., Uçan, H. A., & Rao, R. V. (2025). Integrated Risk Management in Construction Project: Utilizing NDSII-BMR and NDSII-BWR for Time-Cost-Safety Trade-offs (Manuscript submitted for publication.)