



Alternatif orman yolu güzergâhlarının performans açısından CRITIC temelli MOORA yöntemiyle değerlendirilmesi

Murat Özmen^{1*}, Mustafa Akgül¹, Necmettin Şentürk¹

¹Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Orman Fakültesi, Orman İnşaatı ve Transportu Anabilim Dalı, 34473, Bahçeköy, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

MAKALE KÜNYESİ

Geliş Tarihi: 27/06/2024

Kabul Tarihi : 07/08/2024

<https://doi.org/10.53516/ajfr.1505668>

*Sorumlu Yazar:

murat.ozmen@ogr.iuc.edu.tr

ÖZ

Giriş ve Hedefler Bu çalışmada, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nda mevcut bir yol güzergâhı seçilmiştir. Araştırma kapsamında, sayısal arazi modeli (SAM) kaynağı olarak havasal LiDAR verisi kullanılmış ve BIM ortamında bu güzergâha alternatif olarak 7 farklı yol güzergâhı geliştirilmiştir.

Yöntemler Birisi mevcut yol güzergâhı olmak üzere toplamda 8 farklı yol güzergâhı için BIM modelleri oluşturulmuştur. Yol geometrisi ve güzergâhlarının ekolojik etkilerini değerlendirmek amacıyla 14 farklı kriter belirlenmiştir. Bu modellerden elde edilen bilgilerle, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olan CRITIC metodu kullanılarak kriterler ağırlıklandırılmıştır. Belirlenen alternatifler ekolojik açıdan karşılaştırılmış ve MOORA yöntemi ile en optimum çözüm bulunacak şekilde yol güzergâhları sıralanmıştır.

Bulgular Ekolojik açıdan yapılan sıralamaya göre en iyi performans sıralaması mevcut yolda iken, en düşük performansı ise 4 numaralı yol almıştır. Mevcut yol güzergâhının tüm teknik kıstasları sağlayacak bir şekilde tasarlanmış, planlanmış ve inşa edilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuçlar Çalışma sonuçları göstermiştir ki, yol projelendirilmesi sırasında ÇKKV yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanılarak, farklı yol güzergâhları arasında optimum çözümü bulmada, etkin bir karar destek aracı olduğu görülmektedir. Ayrıca, BIM yazılımları ve ÇKKV yöntemlerinin entegrasyonu, orman yolu projelendirmesinde önemli avantajlar sunduğu, bu entegrasyon ile alternatif yol güzergâhlarının belirlenmesinde hem zaman tasarrufu sağlayacağı hem de doğruluğunun artırılacağı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: ÇKKV, yapı bilgi sistemi, sayısal arazi modeli

Araştırma Makalesi

Evaluation of alternative forest road routes in terms of performance using the CRITIC-based MOORA method

ABSTRACT

Background and aims In this study, an existing road route in Istanbul University-Cerrahpaşa Forestry Faculty Education Research and Application Forest was selected. The research involved the use of aerial LiDAR data as a digital terrain model (DEM) source, with the development of seven different road routes as alternatives to this route in a Building Information Modelling (BIM) environment.

Methods BIM models were created for a total of eight different road routes, with one of these being an existing road route. In order to evaluate the ecological impacts of road geometry and routes, 14 different criteria were determined. The information obtained from these models was then weighted using the CRITIC method, one of the multi-criteria decision-making (MCDM) methods. The alternatives were then compared ecologically, and the road routes were ranked by MOORA method to find the most optimum solution.

Results The ecological ranking revealed that the existing road exhibited the most optimal performance, while road number 4 exhibited the least optimal performance. It is evident that the existing road route has been designed, planned, and constructed in a manner that aligns with all technical criteria.

Conclusions The results of the study indicate that the effective utilisation of CRMV methods during road design serves as an effective decision-support tool for identifying the most optimal solution between different road routes. Furthermore, it was demonstrated that the integration of BIM software and CRM methods provides substantial benefits in the design of forest road projects. This integration will result in reduced timeframes and enhanced accuracy in the identification of alternative road routes.

Key Words: MCDM, building information modelling, digital elevation modelling

Bu makaleye atf:

Özmen, M., Akgül, M., Şentürk, N. 2024. Alternatif orman yolu güzergâhlarının performans açısından CRITIC temelli MOORA yöntemiyle değerlendirilmesi. Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 10(2), 22-35.



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International Licence.

1. Giriş

Orman yolu projelendirmesi ve planlaması, çeşitli faktörlerin bütünlük olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık, zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir (Akgül ve ark., 2018; Akay ve ark., 2018). Bu faktörler arasında projenin sürdürülebilirliği, ekolojik uyumu (Smith ve Johnson, 2018), bitki örtüsü, habitatlar, biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkiler (Brown, 2019), arazinin topoğrafyası (Matinnia ve ark., 2018), hidrolojisi (Kastridis, 2020), erozyon riski (Kastridis, 2020) sediment riski (Akay ve ark., 2023) ve toprak stabilitesi (Jaafari ve ark., 2017) bulunmaktadır. Orman yollarının tasarımı, planlanması ve inşası, ormancılık üretim operasyon planlarının en pahalı ve zaman alıcı kısmıdır (Ghajar ve ark., 2013; Şentürk ve ark., 2018).

Bu bağlamda, orman yolu tasarımında, yol geometrik standartları ve yukarıda belirtilen faktörler dikkate alınarak optimal yol güzergâhlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Tasarımcı, teknik ve ekolojik gereksinimleri karşılayan ve toplam maliyeti en düşük olan alternatif yollar arasından nihai yol güzergâhını seçmelidir (Akay ve ark., 2014). Ancak, büyük ormanlık alanlarda yol ağı tasarlamak, birçok alternatifin eş zamanlı olarak analiz edilmesini (Chung ve ark., 2008) ve değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Yol planlamasında, sayısal arazi modeli (SAM) kaynağının çözünürlüğü, projenin gerçeğe en yakın şekilde sonuçlandırılması için kritik ve temel bir faktörlerden biridir (Najafi ve Mohammadi, 2010). Orman yollarının inşasında temel maliyet genellikle kazı-dolgu işleridir. Bu da, özellikle ve dağlık arazilerde toplam inşaat maliyetinin %80'inden fazlasını oluşturur (Akay, 2006; Najafi ve ark., 2008; Stükelberger ve ark., 2006). Maliyet kontrolü ve bütçelemeyi iyileştirmek için kazı-dolgu hacimlerinin doğru tahmini önemlidir (Contreras ve ark., 2012). Geleneksel topoğrafik harita tabanlı planlama, genellikle alternatif güzergâhları ve yol geometrisiyle ilgili unsurları yeterince doğru belirleyememektedir (Chung ve Sessions, 2001). Bu nedenle, son yirmi yılda yaygın olarak kullanılan yüksek çözünürlük ve hassasiyete sahip LİDAR (Light Detection and Ranging) tabanlı SAM verileri, araziye gerçeğe en yakın şekilde temsil eden modeller oluşturmakta ve doğru kübaj tahminleri sağlamaktadır (Contreras ve ark., 2012).

Planlama aşamasında, farklı teknik yol kriterlerinin ve karmaşık algoritmik kısıtların değerlendirilmesine olanak sağlayacak yol projelendirme yazılımlarının da seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çeşitli özelliklere sahip CAD (Computer-Aided Design) tabanlı yazılımlar geliştirilmiştir. Ancak, farklı vektörel ve raster veri setlerinin planlama sürecinde etkili olması nedeniyle, çeşitli yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada, ilk kez 1970 yılında ortaya çıkan Yapı Bilgi Sistemi (BIM: Building Information Modeling) tabanlı yazılımlar öne çıkmaktadır. BIM yazılımları, farklı fiziksel altyapıları planlayan, tasarlayan, inşa eden, işleten ve bakımını yapan profesyoneller, işletmeler ve kamu kurumları tarafından kullanılmaktadır (El-Diraby ve ark., 2017). Ayrıca, BIM, yapı sistemlerinin fiziksel ve işlevsel özelliklerinin dijital temsillerinin oluşturulması ve yönetilmesi süreçlerini kapsamaktadır (Kalach ve ark., 2018). Chan ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında, BIM kullanımının yol projelerinde tasarım hatalarını azaltma, doğru ve detaylı bilgilerin elde edilmesi, paydaşlar arasında daha iyi koordinasyon sağlama ve proje

verilerinin görselleştirilmesi gibi avantajlar sunduğu vurgulanmıştır. BIM süreci yönetiminde, proje limit-tasarım parametrelerinin ve kısıtlamalarının BIM ortamına tanıtılması da proje başarısı açısından kritik bir süreçtir. Bu amaçla geliştirilen açık kaynaklı programlama aracı olan Dynamo, hem programlama bilgisi olan hem de olmayan kullanıcılar için görsel betik yazma ve metin tabanlı programlama dillerini kullanma imkânı sunmaktadır (Dynamoprimer, 2016).

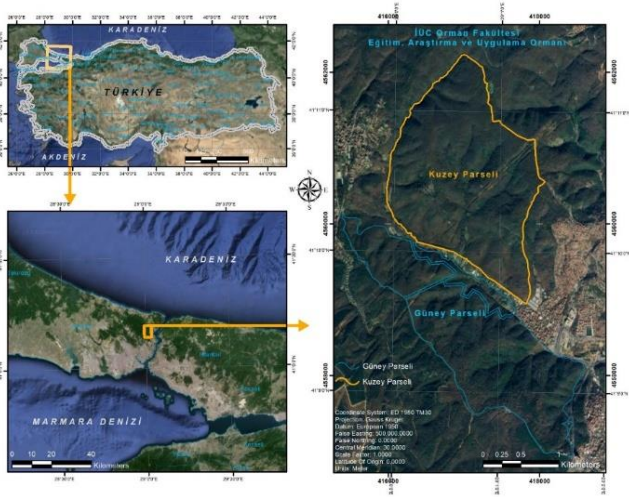
Yol planlaması sırasında, yol geometrik kısıtları dahilinde iki nokta arasında farklı güzergâhlar oluşturulabilir. Her bir alternatif güzergâh teknik olarak doğru olsa da bu alternatifler arasından hangisinin seçileceği karmaşık bir karar verme sürecini gerektirir. Bu aşamada, birden fazla alternatifin ve bu alternatiflere ilişkin çeşitli kriterlerin olduğu durumlarda, en uygun sonucu ulaşmayı kolaylaştıran ve benzer sonuçları değerlendirme olanağı sağlayan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır (Demircioğlu ve Coşkun, 2018). Karar verme problemlerinde temel amaç, alternatifler arasından en iyisini seçmek, alternatifleri sıralamak ve sınıflandırmaktır (Mohammadi ve Rezaei, 2020). Bu tür problemleri çözmek için VIKOR, SAW ve TOPSIS gibi çeşitli seçim yöntemleri ile MOORA, WASPAS ve ANP gibi farklı sıralama yöntemleri kullanılmaktadır. Her bir yöntem, kendine özgü kapsamı ve performans özelliklerine sahiptir ve hangi yöntemin kullanılacağına kullanıcı karar vermektedir.

Bu çalışmada, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi, Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı içinde mevcut bir yol güzergâhı belirlenmiştir. SAM kaynağı olarak havasal LiDAR verisi kullanılmış ve bu veriler Autodesk tabanlı BIM yazılımında analiz edilerek, mevcut yol güzergâhına alternatif olarak çeşitli yol güzergâhları elde edilmiştir. Elde edilen güzergâhlar arasındaki farklar ve kriterlerin ağırlıklandırılması için ÇKKV yöntemlerinden biri olan CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) metodu kullanılmıştır. Ayrıca, belirlenen kriterlere bağlı olarak elde edilen alternatiflerin sıralanmasında ise MOORA (Multi-Objective Optimization Ratio Analysis) yöntemi kullanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Araştırma alanı

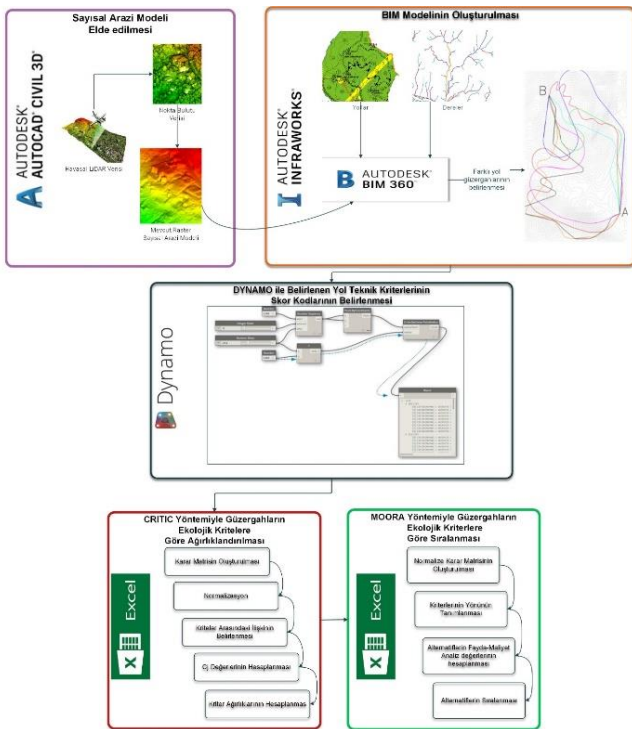
Çalışma alanı olarak İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa (İÜC) Orman Fakültesi, Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı Kuzey parseli seçilmiştir. Araştırma alanı Marmara Bölgesi'nin Trakya yakasında Greenwich'e göre 28° 59' 17" - 29° 32' 25" doğu boylamları ile 41° 09' 15" - 41° 11' 01" kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanı yaklaşık 2.724,16 m genişliğinde ve 4.006,86 m uzunluğunda olup 391,8 ha'lık bir alanı kapsamaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı

2.2 Yöntem

Çalışmada, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı içinde mevcut bir yol güzergâhı belirlenmiştir. İlk olarak SAM kaynağı olarak havasal LiDAR verisi kullanılmış ve bu veriler Autodesk tabanlı BIM yazılımında analiz edilerek, mevcut yol güzergâhına alternatif olarak çeşitli yol güzergâhları elde edilmiştir. Elde edilen güzergâhlar arasındaki farklar ve kriterlerin ağırlıklandırılması için ÇKKV yöntemlerinden biri olan CRITIC metodu kullanılmıştır. Ayrıca, kriterlere bağlı olarak elde edilen yol güzergâhı alternatiflerinin sıralanmasında MOORA yöntemi kullanılmıştır (Şekil 2).

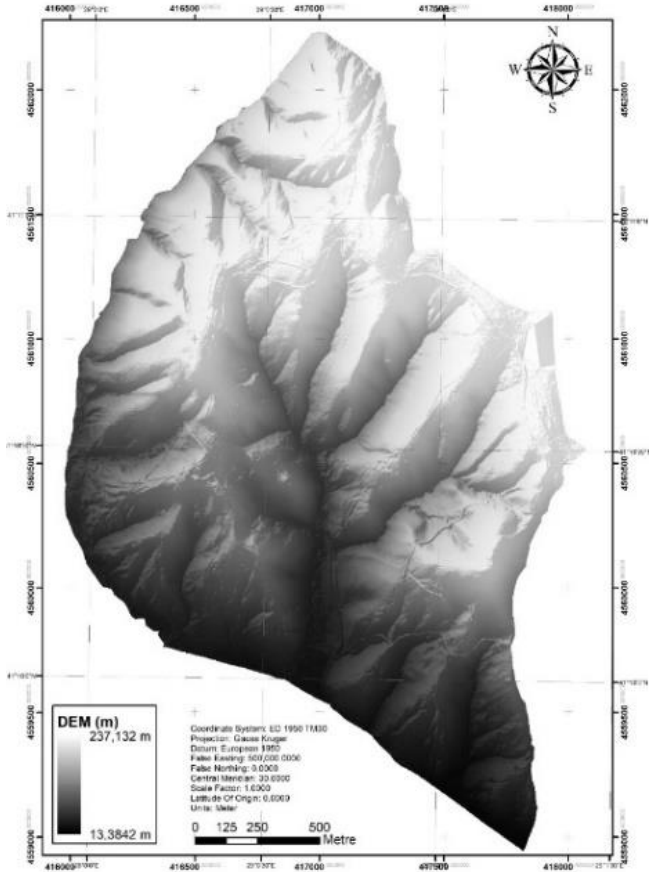


Şekil 2. Çalışmada kullanılan iş akış diyagramı

2.2.1 LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli

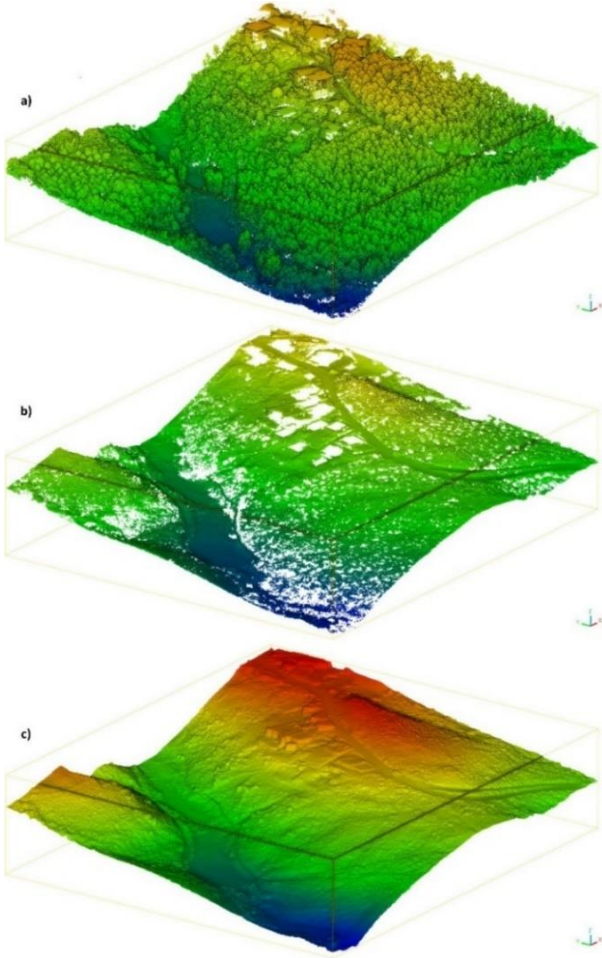
Çalışmada kullanılan LiDAR tabanlı SAM verileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 0,25 m çözünürlükle üretilmiştir. Bu veriler, Riegl Q680i marka lazer tarayıcı kullanılarak elde edilen ve nokta yoğunluğu yaklaşık 16 nokta/m² olan ham nokta bulutu verilerinden, lineer enterpolasyon tekniği ile oluşturulmuştur.

LiDAR tabanlı SAM verilerine göre, yükseklikler deniz seviyesinden 13,38 m ile 237,13 m arasında değişmektedir (Şekil 3). Topoğrafik olarak incelendiğinde, alanın homojen bir yükselti dağılımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Çalışma alanına ait LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli (SAM)

LiDAR verileri, ormancılık çalışmaları için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyelin temel nedeni, LiDAR ışık ışınlarının vejetasyonun içerisindeki küçük boşluklardan geçerek yeryüzüne ve vejetasyonun farklı katmanlarına (gövde, dal, alt katman) ulaşabilmesidir. Bu da bu bölgelerin modellenmesine olanak tanımaktadır (Amakhchan, 2022). LiDAR verilerinden elde edilen noktalar çeşitli filtreleme ve sınıflandırma işlemlerine tabi tutulur ve bu işlemler sonucunda istenilen obje veya yüzeylere ilişkin bilgiler çıkarılabilir. Örneğin, çıplak arazi yüzeyi oluşturmak için gerekli dayanak noktaları, filtreleme işlemiyle elde edilebilir (Şekil 4). Çıplak zemin SAM üretimi, iki ana adımdan oluşur: zemin filtreleme ve filtrelenmiş zemin noktalarının enterpolasyon rutini içinde işlenmesidir (Aryal, 2017).



Şekil 4. LiDAR nokta bulutu verilerinin filtrelenmesi ve SAM üretimi. a) Filtrelenmemiş nokta bulutu. b) Çıplak yeryüzüne ait filtrelenmiş nokta bulutu. c) Raster sayısal arazi modeli

2.2.3 BIM ortamında alternatif yol güzergâhlarının oluşturulması

Autodesk Infracore ortamında farklı kısıtlar dikkate alınarak, elde edilen yol güzergâhlarına ait teknik kısıtlar aşağıda belirtilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Yol alternatifleri için kullanılan teknik kısıtlar

Alternatif no	Yol Proje Tasarım Hızı (km/sa)	Kazı Eğimi (yatay/düsey)	Dolgu Eğimi (yatay/düsey)	Maksimum Yol Boyuna Eğimi (%)	Minimum Kurp Yarıçapı (m)
1	30	0,5	0,7	20	20
2	40	0,5	0,7	8	50
3	20	0,5	0,5	10	14,63
4	50	1,0	1,0	9,25	99,75
5	30	1,0	1,0	9,25	100
6	40	0,5	0,7	15	70
7	30	1,0	0,7	9,25	33,86

2.2.4 Ekolojik kriterlerinin belirlenmesi ve BIM ortama entegrasyonu

Çalışmada, orman yollarının ekolojik açıdan değerlendirilmesi için 14 farklı kriter kullanılmış ve kriterlerin ekolojik açıdan pozitif veya negatif katkıları değerlendirilmiştir. Ancak, her bir kriterin sonucu baskın olarak hangi yönde

etkilediğine karar verilmiş ve tersi yöndeki etkiler dikkate alınmamıştır. Dikkate alınan kriterler aşağıda listelenmiştir.

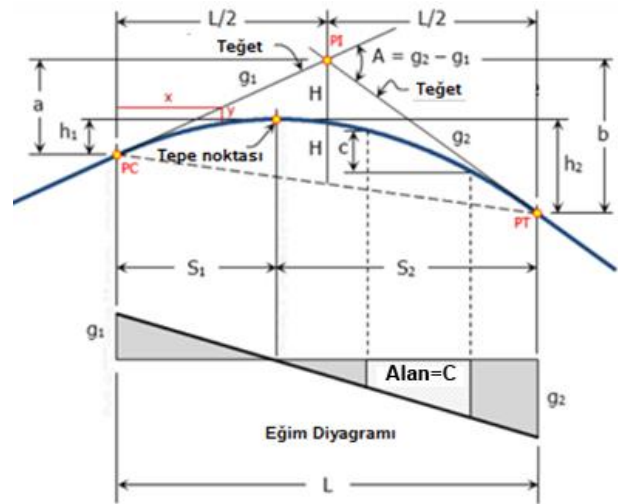
Düşey kurp değerleri: Düşey kurp uzunluğunun hesaplanmasında simetrik parabol geometrisi esas alınmaktadır (Şekil 5) (Denklem 1-2).

$$a = \frac{1}{2} g_1 L \tag{1}$$

$$b = \frac{1}{2} g_2 L \tag{2}$$

a ve *b*, parabol x ve y eksenine simetri gösteren eksenli boyunca olduğunda, parabolün genişlik ve yüksekliğini temsil eden parametrelerdir. “*g*₁ ve *g*₂” ise x eksenli etrafındaki ikinci dereceden terimlerin katsayısıdır.

L ise, parabol düzleminin uzunluğu olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5. Simetrik parabol geometrisi

Yol inşası sırasında zeminin doğal yapısının asgari düzeyde bozulması yerel bitki ve hayvan türlerinin yaşam alanlarının korunmasına yardımcı olabilir. Yol standartlarını geliştirmek için uzun bir düşey eğri kullanmak, eğimin daha yumuşak bir şekilde değişmesini sağlar, ancak bu da yolu mevcut arazi profiline göre uygulamak için daha fazla kazı ve dolgu işlemi gerektirebilir. Yollar, suyun akışını etkileyen topoğrafik arazi unsurlarında farklı davranışlar sergiler. Örneğin, suyun yoğunlaştığı konkav alanlar, nemli manzaralarda suyun çoğunu taşır. Ancak yollar üzerinde kesim yüksekliği ile konkavite arasında bir ilişki vardır, bu nedenle kesim yükseklikleri en yüksek olan sırtlar ve kesim yükseklikleri en düşük olan alçak alanlardır. Bu durum, suyun en çok nerede toplandığının önemli olduğunu gösterir (Luce,2002).

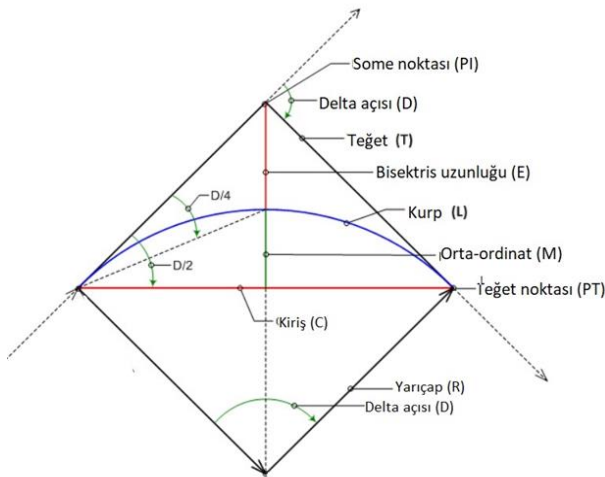
Yatay kurp yarıçapı: Yatay güzergâhtaki küçük kurp yarıçapları, orman yollarının doğal araziye daha iyi uyum sağlamasını yardım eder ve çevresel etkiyi azaltır. Bu tasarım, habitat bozulmasını ve arazi kullanımını minimize ederek ekosistem üzerindeki baskıyı azaltır. Yol tasarımında doğal topoğrafyayı korumak, biyolojik çeşitliliği ve doğal habitatları koruma çabalarında önemli bir rol oynar.

Yatay kurp geometrisine (Şekil 6) ait parametrelerinin hesaplanmasında ise aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Denklem 3-4-5).

$$L = \frac{R12\pi}{360} \tag{3}$$

$$T = \frac{Rtan}{2D} \tag{4}$$

$$R = \frac{5729.78}{D} \quad (5)$$



Şekil 6. Yatay kurp geometrik elemanları

Yol boyuna eğimi: Düşük boyuna eğimler, orman yollarında önemli çevresel faydalar sunar. Bu eğimler, su akışını daha kontrol edilebilir hale getirir, böylece erozyonu azaltır ve doğal su döngüsünü korur. Ayrıca, suyun doğal yollarla akmasını sağlayarak yakındaki su ekosistemlerinin sağlığını korur. Özellikle orman yolları, suyun hızla yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde tasarlandığında, yolun yüzey ve alt yapısının erozyona uğraması önlenebilir. Bu durum, yolun ömrünü uzatırken çevresel bütünlüğü de korur.

Yol tasarım hızı: Orman yolları genellikle yüksek hızlı seyahat için tasarlanmadığından ve trafik hızının ölüm oranlarıyla ilişkili olduğundan, büyük memeliler için doğrudan ölüm genellikle önemli bir faktör değildir (Lyon, 1984). Düşük hız limitlerine sahip yollar, orman yolları, nda yaban hayatı üzerindeki olumsuz etkileri azaltmada önemli bir rol oynar. Bu yollar, hayvanların güvenli bir şekilde yol geçişlerini sağlar ve araçlar ile yaban hayatı arasındaki çatışmaları en aza indirir.

Dere geçiş sayısı: Yol yapımı ve kullanımı sırasında taşınan çamur, yağ, yakıt, pestisitler ve diğer kirleticiler dere geçişlerinde doğrudan suya karışabilir, bu da su kalitesinin düşmesine ve sucul habitatların zarar görmesine yol açabilir. Yollar, balıklar ve diğer sucul canlılar için önemli olan üreme, beslenme ve göç yollarını keserek popülasyonların izole olmasına ve genetik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Yol yapımı sırasında doğal su yollarının değiştirilmesi, sel riskini artırabilir ve su akış rejimlerini bozarak sucul ekosistemlerin sağlığını olumsuz etkileyebilir. Yolların güneş ışığını emerek çevreye sıcaklık yayması, özellikle sıcaklık hassasiyetine sahip türler için potansiyel bir tehlike oluşturabilir (Ryan ve diğerleri, 2004).

Dolambaçlılık faktörü: Yatay dolambaçların sayısının azaltılması, doğal arazinin daha az değiştirilmesi anlamına gelir, bu da toprak ve habitat bozulmasını minimize eder. Yol inşaatı sırasında yapılan kesim, kazı ve dolgu işlemleri azalır, bu da orman içi ekosistem üzerindeki stresi azaltır ve flora ile fauna için daha stabil bir ortam sağlar (Denklem 6).

$$\text{Dolambaçlılık faktörü} = \frac{\text{Yolun yataydaki gerçek uzunluğu}}{\text{iki nokta arasındaki doğrusal mesafe}} \quad (6)$$

Kıvrımlılık faktörü: Orman yolları, genellikle dolgu ve kazı alanları nedeniyle tek bir eğimle seyredemez. Bu dolaylı olarak eğim kırıklıklarına veya ters eğimlere yol açar, bu da yolun kıvrımlı bir yapıda inşa edilmesine neden olur. Ancak, Öklit bağıntısına göre iki nokta arasındaki en kısa mesafe dik olan mesafedir (Eker ve Ada, 2011) (Denklem 7). Orman yollarının boyuna kesitleri, bu eğimlerle ilişkilendirildiğinden dolayı kıvrımlı bir yapı gösterir. Bu sapma, kıvrımlılık faktörü olarak hesaplanmıştır (Erdaş, 1997).

$$\text{Kıvrımlılık faktörü} = \frac{\text{yolun gerçek uzunluğu}}{\text{kıvrımlı hat uzunluğu}} \quad (7)$$

Yüksek kıvrımlılık faktörü, orman yollarında daha az toprak hareketi ve doğal habitat bozulması anlamına gelir, çünkü yol doğal arazi konturlarına daha iyi uyum sağlar. Bu özellikle eğimli ve dağlık bölgelerde erozyonu ve yüzey akışını azaltarak su kalitesini koruma açısından önemli avantajlar sunar. Ayrıca, arazi topografyasıyla uyumlu yol düzenlemesi, toprak işlerini en aza indirerek çevresel etkileri minimize eder (Ryan ve ark., 2004).

Yol eksen uzunluğu: Motorlu araçların yollar üzerindeki kullanımı, belirli vahşi yaşam alanlarında üreme fonksiyonlarına doğrudan müdahale eder ve göçleri engelleyebilir (Bennett, 1991). Uzun orman yolları, habitat parçalanmasına ve yaşamsal alanların küçülmesine yol açarak ekosistem bağlantılarını koparabilir ve erozyon ile sedimentasyonu artırabilir. Kısa orman yolları ise yapısal müdahaleleri azaltarak daha az ağaç kesimi ve habitat bozulması sağlar, böylece çevresel ayak izini azaltır ve orman ekosistemlerini korur (Ryan ve ark., 2004).

İnşaat alanı: Büyük ölçekli yol inşaatları, doğal habitatları böler, ekosistemleri parçalar ve özellikle üreme koşullarına duyarlı türler için zararlı olabilir (Çalışkan, 2013). Yol yapımı sırasında artan sedimentasyon, su gövdelerinde bulanıklığa yol açarak sucul yaşamı olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, yollar gürültü kirliliği yaratır ve bu da özellikle gürültüye hassas türler için yaşam alanlarının azalmasına neden olabilir (Smith ve ark., 2018).

Kazı şevi eğimi: Yamaç kararlılığını etkileyen faktörler arasında gözenek suyu basıncı, toprak dayanım parametreleri, yamaç dikliği ve derinliği önemlidir (Eker ve Aydın, 2014). Kazı şev değerlerinin doğal şev açısına dikey eğime yakın olması, yolun daha dar bir alana sığdırılmasını sağlayarak çevredeki habitatın korunmasına katkıda bulunabilir.

Ters eğimlerin sayısı: Doğal arazi konturlarını takip eden ters eğimli yollar, büyük toprak hareketleri gerektiren düz yolların aksine çevresel etkiyi azaltabilir. Bu yaklaşım, habitat bozulmasını minimize eder ve yerel ekosistemlere daha az müdahale edilmesini sağlar. Ayrıca, ters eğimler suyun eşit şekilde dağılmasını ve doğal drenaj hatlarına uygun bir şekilde akmasını destekleyerek erozyonu azaltabilir ve su kaynaklarının korunmasına katkı sağlayabilir.

Kazı ve dolgu yükseklikleri: Kazı ve dolgu yüksekliklerinin hesaplanmasında Denklem (8) kullanılmıştır:

$$\Delta h = h_{\text{design}} - h_{\text{existing}} \quad (8)$$

h_{design} : Tasarım yüzeyinin yüksekliği.

h_{existing} : Mevcut yüzeyin yüksekliği.

Δh : Yükseklik farkı (Dolgu için pozitif, kazı için negatif).

Eğer $\Delta_h > 0$, bu bir dolgu yüksekliğidir, Eğer $\Delta_h < 0$, bu bir kazı yüksekliğidir.

Bu formül, mevcut yüzey (existing ground) ve tasarım yüzeyi (design surface) arasındaki yükseklik farkını belirler. Eğer tasarım yüzeyi mevcut yüzeyden daha yüksekse, fark pozitif olur ve bu dolgu gerektirir. Eğer tasarım yüzeyi mevcut yüzeyden daha düşükse, fark negatif olur ve bu kazı gerektirir.

Yüksek dolgu ve derin kazı işlemleri doğal yaşam alanlarını büyük ölçüde etkiler ve ekosistemleri bozar. Bu durum, yerel bitki ve hayvan türleri için önemli habitat kayıplarına yol açabilir, özellikle hassas veya endemik türler bu değişikliklerden olumsuz etkilenir (Forman ve Alexander, 1998). Büyük kazılar ve dolgular, yüzey erozyonunu artırarak sedimanların yakın su kaynaklarına taşınmasına neden olabilir. Bu da su kalitesini düşürür ve sucul yaşam için olumsuz koşullar yaratır (Bilby ve Ward, 1989).

Kazı/Dolgu dengesi: Yol yapımında kazı ve dolgu işlemlerinin denge önemlidir, özellikle eğimli ve yağışlı alanlarda aşırı malzeme çıkarma veya fazla doldurma su akışını değiştirebilir ve erozyonu artırabilir. Denge kazı ve dolgu planlaması suyun doğal akışını korur, yol yapısını korur ve erozyon riskini azaltır. Ayrıca, toprak miktarının dengelenmesi çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltabilir. Doğal arazi konturlarına uygun kazı ve doldurma işlemleri habitat bozulmasını ve diğer çevresel zararları en aza indirir. Ayrıca, malzeme taşıma ihtiyacını azaltarak karbon emisyonlarını düşürür ve inşaat süresini kısaltır. Yol tasarımı, arazi topografyasına en uygun şekilde yapılmalı ve toprak işleri en aza indirilmelidir (Ryan ve ark., 2004).

2.2.5 ÇKKV yöntemleriyle alternatif güzergâhların değerlendirilmesi

Çalışmada, alternatif güzergâhların ekolojik performanslarının değerlendirilmesinde, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden faydalanılmıştır. Kriterler arasındaki çatışmayı ve bilgi içeriğini objektif bir şekilde yorumlamak için CRITIC yöntemi, ağırlıklandırma aşamasında kullanılmıştır. Alternatiflerin sıralaması için ise basit, esnek ve güçlü bir yöntem olan MOORA yöntemi tercih edilmiştir. CRITIC yönteminin temeli, karar verme süreçlerindeki karşıtlık yoğunluğuna dayanır (Diakoulaki ve ark., 1995). Bu yöntem, ÇKKV literatüründe ve uygulamalarında önemli bir etkiye sahip olup, farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz etmek için matematiksel ve istatistiksel tekniklerden yararlanır.

CRITIC yöntemi beş adımdan oluşmaktadır (Diakoulaki ve ark., 1995):

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Karar matrisi X , m adet alternatif ve n adet kriterlerden oluşmaktadır. Karar matrisindeki her bir x_{ij} değeri, i 'nci alternatifin j 'nci kriterdeki performansını gösterir (Denklem 9).

$$X = [X_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$X_j^{max} = J$.kriterin alternatifleri arasındaki maksimum değeri.
 $X_j^{min} = J$.kriterin alternatifleri arasındaki minimum değeri.
 $i=1,2,3\dots, m$ alternatifleri, $j=1,2,3\dots, n$ kriterleri ifade eder.

Adım 2: Karar matrisinin normalizasyon işlemi

Bu adımda fayda yönlü kriterler ve maliyet yönlü kriterlerin değerlerinin hesaplanması sağlanır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (10)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (11)$$

r_{ij} : Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen, i -nci alternatifin j -nci kriterdeki normalize edilmiş değeridir.

X_{ij} : Orijinal karar matrisindeki, i -inci alternatifin j -inci kriterdeki ham değeri.

$\min(x_j)$: j -inci kriterin karar matrisindeki minimum değeri.

$\max(x_j)$: j -inci kriterin karar matrisindeki maksimum değeri.

Maksimum fayda kriterleri için Denklem (10), minimum maliyet kriterleri için ise Denklem (11) hesaplanır, karar matrisinin X_{ij} elemanlarına normalizasyon işlemi uygulanarak r_{ij} değerleri sonucuna ulaşılır.

Adım 3: Kriterler arası ilişki derecesinin belirlenmesi

Normalizasyon sonucunda hesaplanan r_{ij} değerleri kullanılarak Denklem (12) yardımıyla j kriteri ile k kriteri arasındaki korelasyon değerleri P_{jk} bulunur. Bu değer, kriterler arasındaki bağlantının gücünü gösterir.

Burada dikkat edilmesi gereken kısım normalize edilen kararlılık matrisindeki kriterlere ait değerlerin normal dağılıma sahip olma durumudur. Bu kısımda normal dağılım testleri dikkate alınmaktadır. Normal dağılım test sonucuna göre veriler normal dağılıyorsa Denklem (12)'de görülen Pearson korelasyon katsayısı formülü hesaplanmalıdır.

$$P_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)(r_{ik} - r_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{ik} - r_k)^2}} \quad (12)$$

$j, k=1,2,3\dots, n$: n adet kriterin her birini temsil eder.

Korelasyon katsayısı P_{jk} : j -inci ve k -inci kriterler arasındaki korelasyonu gösterir.

Veriler normal dağılıma sahip değilse Spearman sıra korelasyon katsayısı formülü Denklem (13) ile kriterler arası ikili korelasyon katsayısı bulunabilir. (Kiracı ve Bakır, 2019).

$$P_{jk} = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^m d^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (13)$$

İfadelerden d iki kriterin sıralamaları arasındaki farkı gösterir, n ise kriter büyüklüğünü ifade eder.

Adım 4: Kriterlere ait bilgi miktarı değerlerinin (C_j) hesaplanması

Bu adımda her bir kritere ait bilgi miktarı (C_j) Denklem (14) kullanılarak belirlenir. Eşitlikte yer alan σ_j ifadesi j . kritere ait standart sapma değeri olup, Denklem (15) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_j)^2}{m}} \quad (14)$$

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - P_{jk}) \quad (15)$$

σ_j : j. Kriterin standart sapma değeri

Adım 5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması

Son adım olarak ise her bir j kriterinin C_j değeri, tüm kriterlerin değerlerinin toplamına oranlanarak nesnel ağırlık değerleri hesaplanmaktadır. Denklem (16) en yüksek değerden en düşük değere kadar kriterler sıralandığında ortaya çıkan en yüksek ağırlığa sahip kriterin belirlenmesi için kullanılır.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_k} \quad (16)$$

Alternatiflerin önem sıralamasında kullanılan MOORA yöntemi ise Brauers ve Zavadskas tarafından 2006 yılında ortaya konulmuştur. Diğer sıralama yöntemlerine göre nispeten yeni bir yöntem olmasına karşın birçok farklı disiplinde kullanılmaktadır. Yöntem diğer sıralama yöntemleriyle karşılaştırıldığında hesaplama/veri çözümü, basitlik derecesi, kolay anlaşılabilir olması ve esnekliği açısından öne çıkmakla beraber tüm öznelilikleri ve bunların görece önemini dikkate almaktadır (Sarkar ve ark., 2015). Bu yaklaşımın uygulaması aşağıda belirtilen detaylı anlatımlarda ifade edilen 4 aşamanın sıralı bir şekilde uygulanması ile gerçekleştirilmektedir (Brauers ve Zavadskas, 2006; Ersöz ve Atav, 2011).

Adım 1: Normalize karar matrisinin oluşturulması

Karar matrisi, kriterlerden oluşan değerlerin normalize edilmesiyle oluşan matristir (Denklem 17).

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad (17)$$

Adım 2: Kriterlerin yönünün tanımlanması

Kriterlerin fayda ve maliyet anlamda durumunun değerlendirilmesidir. Fayda yönlü ise maksimum alınması gereken katsayı, maliyet yönlü ise minimum alınması gereken değer tanımlanır.

Adım 3: Alternatiflerin fayda-maliyet analizi değerlerinin hesaplanması

Normalize karar matrisinde kriter değerleri olan w_k ile çarpılır, Denklem (18) ile tanımlanan ölçütlere göre her bir karar alternatifinin performansı belirlenir.

$$y_i = \sum_{j=1}^g (w_k * x_{ij}^*) - \sum_{j=g+1}^n (w_k * x_{ij}^*) \quad (18)$$

$y_i = i$ alternatifinin performans değeri

$w_k = k$ kriterinin ağırlık değeri

$x_{ij} =$ Karar matrisindeki i alternatifinin j kriterine ait normalize değeri

$g =$ Fayda kriterlerinin sayısı

$n =$ Toplam kriter sayısı

$i=1,2,\dots,n =$ Alternatiflerin indeksi

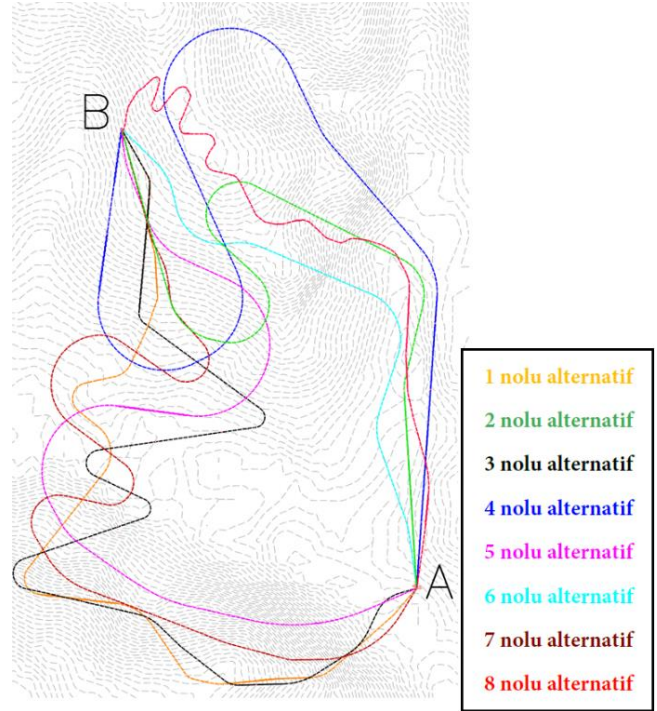
Adım 4: Alternatiflerinin Sıralaması

Bu adımda, y_i^* olarak belirtilen fayda-maliyet analizi değerleri yüksek değerden düşük olana kadar sıralanır. Bu sıralamada yüksek olan alternatif tercih edilmesi gereken olarak belirtilirken, son sırada yer alan için tercih edilme olasılığı en düşük olan olarak belirlenir.

3. Bulgular

3.1 Alternatif yol güzergâhlarına ait geometrik bulgular

Autodesk Infracore yazılımında, farklı teknik yol parametreleri (Ek 1) dikkate alınarak yedi farklı yol alternatifi oluşturulmuştur (Şekil 7). Parametreler arasında yol geometrisi (düşey ve sağ kurpların uzunlukları, yol eğimi, dolambaçlılık oranı, kıvrımlılık oranı), ulaşım performansı (maksimum hız limiti, dere sayısı), yol uzunluğu (yol eksen uzunluğu), inşaat ölçütleri (inşaat alanı, kazı ve dolgu seviyeleri), ve zorluklar (ters eğim sayısı, kazı/dolgu oranı) bulunmaktadır. Elde edilen verilere göre, her yol alternatifi belirli bir parametre açısından diğerlerinden farklılık göstermektedir. Örneğin, yol 5 sağ kurplar açısından diğerlerinden belirgin bir şekilde farklılık gösterirken, Mevcut yol ise en yüksek ters eğim sayısına sahiptir. Bu parametrelerin ayrıntılı analizi, karar verme sürecinde hangi yolun seçileceğine yönelik kritik bilgiler sunmaktadır, bu da projenin başarıyla tamamlanması için önemlidir.



Şekil 7. Alternatif yollara ait plan görünümü

3.2 Ekolojik kriterler açısından ağırlıklandırma sonuçlarına ait bulgular

CRITIC yöntemiyle 14 farklı kriterin ağırlıkları dikkate alınarak alternatifler arasında bir fayda-maliyet analizi yapılmıştır. Buna ilişkin karar verme matrisi ekler kısmında belirtilmiştir. (Ek 2). Bu analiz sonucunda, çalışmadaki alternatif güzergâhların ekolojik sıralamaları belirlenmiştir. Öncelikle kriter ağırlıklarını belirlemek için CRITIC yöntemi uygulanmıştır. CRITIC yöntemi uygulaması kapsamında oluşturulan normalizasyon aşamasında kullanılan kriterlerinin minimum ve maksimum değerleri Ek 3'te belirtilen matrisinde listelenmiştir.

CRITIC yöntemi karar matrisi verisiyle yöntemin ilk aşamasında Ek 4'te ifade edilen CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan CRITIC yöntemi normalizasyon matrisiyle, yöntemin ikinci aşamasında korelasyon matrisi elde edilmiştir. İlgili korelasyon matrisi Ek 5'te belirtilmiştir. Korelasyon katsayısı ve standart sapma ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşan sonuçları yansıtan *Pjk* katsayıları, yöntemin üçüncü aşamasında yer alan denklemlerle oluşturularak Ek 6'da ifade edilmiştir.

Daha sonra *Pjk* Katsayılarına, yöntemin son aşamasında belirtilen formülün uygulanması ile hesaplanan tüm kriter ağırlık değerlerine ilişkin sonuçlar, Ek 7'de sunulmuştur. Standart sapma değerleri incelendiğinde, parametreler arasında genel bir tutarlılık olduğu görülmektedir. Değerlerin çoğu 0,30 ile 0,40 arasında değişmektedir, bu da ölçümlerin orta derecede değişkenlik gösterdiğini gösterir. *Cj* katsayılarına bakıldığında, belirli parametrelerin diğerlerine göre daha fazla değişkenlik gösterebileceği ve ölçümlerin biraz daha değişken olduğu görülmektedir. Özellikle, yol eğimi parametresinin yüksek *Cj* katsayısına sahip olduğu göze çarpmaktadır, bu da bu parametrenin diğerlerine göre daha fazla değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. *Wj* ağırlıkları incelendiğinde, her bir parametrenin genel değerlendirmedeki katkısının benzer olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu bulgular, parametrelerin değerlendirilmesinde genel bir tutarlılık

olduğunu ve değerlendirmede her bir parametrenin benzer öneme sahip olduğunu göstermektedir.

3.3 Ekolojik kriterlerin sıralama sonuçlarına ait bulgular

Ekolojik kriterlerin MOORA sıralama yöntemi kapsamında oluşturulan normalizasyon matrisi sonuçları Ek 8'de belirtilmiştir. Takip eden aşamada ise CRITIC yöntemi ile elde edilen kriter ağırlık değerlerinin her birinin ilgili kritere ilişkin sütün vektörü ile çarpılmasıyla, Ek 9'da gösterilen MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı ile ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

MOORA Önem katsayısı yaklaşımının son aşamasında ise belirtilen formül uygulanarak, ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisinde her bir kriterin fayda yönlü kriterlerde aldığı değerlerin toplamının maliyet yönlü kriterlerde aldığı değerlerin toplamından çıkarılması ile her alternatif için fayda-maliyet analizi değerleri Çizelge 2'de ifade edildiği üzeredir. Buna göre en iyi performans sıralaması mevcut yolda iken, en düşük performansı ise 4 numaralı yol almıştır. Çizelge 2'de verilmiş olan bu sıralamadan, mevcut yol güzergâhının tüm teknik kıstasları sağlayacak bir şekilde tasarlanmış, planlanmış ve inşa edilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 2. Fayda-maliyet analizi değerleri

Alternatif	1	2	3	4	5	6	7	Mevcut yol
Yi	-0,16959	-0,21119	-0,21401	-0,31606	-0,25503	-0,21509	-0,22173	-0,16938
Sıralama	2	3	4	8	7	5	6	1

4. Sonuç

Yunanistan'da yapılan bir çalışmada orman yollarının sürdürülebilir kalkınmaya katkısı incelenmiştir (Drosos ve diğ.ö 2020). Çalışmada kullanılan kriterler ölçülebilir olup alternatif orman yolu güzergâhlarının çevresel kaynaklar üzerindeki etkileri analiz edilmektedir. Yunanistan'ın Kozani Bölgesi'ndeki Vlastis – Emporiou Kamu Ormanı'nda yapılan çalışmada, inşaat sahasının boyutunun ekolojik ve sosyal etkileri de incelenmiştir. Dolgu yükseklikleri, yamaç yükseklikleri ve eğimler bu çalışmada olduğu gibi dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda, iki alternatiften hangisinin daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Yol inşaatı çözümlerinin, inşaat başlamadan önce karşılaştırmalı olarak belirlenmesinin çevresel etkilerin minimize edebileceği sonucuna varılmıştır.

Türkiye'de yapılan bir çalışmada orman yollarının kalitesinin belirlenebilmesi için ölçüt ve gösterge setlerinin oluşturulmasına ilişkin bir yöntem bilim geliştirilmiştir (Eker ve Aydın, 2014). Ekolojik ölçütlerini de içeren bir sette hiyerarşik bir analiz seti içinde yer bulmuştur. Orman yollarının orman ekosistemine olan etkilerini değerlendirerek kapsamlı bir kalite değerlendirme yöntemi sunmaktadır ve gelecek çalışmalarda yeni kriterler ve ölçütler eklenebileceğini bildirmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda olduğu gibi ekolojik kriterleri değerlendirerek sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunma hedeflenmiş ve ayrıca benzer şekilde, çalışmamızda CRITIC ve MOORA yöntemleri kullanılarak ekolojik, teknik, sosyal ve ekonomik kriterler detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve alternatif güzergâhların çevresel etkileri minimize edilmiştir. Eker ve Aydın (2014) tarafından geliştirilen hiyerarşik analiz

seti, yol kalitesini çok boyutlu bir bakış açısıyla değerlendirmeye olanak tanımıştır. Benzer bir şekilde, çalışmamız da orman yolu güzergâhlarının seçimi için ÇKKV yöntemlerini kullanarak daha kapsamlı bir yaklaşım sunulmuştur.

Araziyi temsil eden sayısal altlıkların (SAM) hassasiyeti kazı-dolgu miktarlarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Liu (2008) çalışmasında düşük hacimli yol inşaatlarında sayısal yükseklik modeli üretiminin en önemli süreç olduğunu vurgulamaktadır. Şentürk ve diğerleri tarafından 2018'de yapılan çalışmada, yol planlama ve projelendirme çalışmalarında kullanılan eş yükselti eğrili haritaların yerini, gelişen bilgisayar destekli çizim yazılımları sayesinde daha hassas ve doğru veri sağlayan yöntemlere bıraktığı vurgulanmaktadır. Geleneksel yöntemlerle belirli mesafelerde alınan enkesitler yerine, artık istenilen aralıklarda (metre ve/veya santimetre) enkesitler alınarak kazı-dolgu hacimlerinin daha gerçekçi tahmin edilebildiği belirtilmektedir. Ayrıca, hassasiyeti yüksek sayısal altlıkların seçilmesi, bilgisayar destekli yol projelendirme yazılımları ile eş zamanlı karar verme imkânı sunduğu ifade edilmektedir. Benzer şekilde, Akay ve diğ. (2014), LiDAR tabanlı modellerin orman yolu planlamasında nasıl kullanılabileceğini araştırmışlardır. Bu çalışmalar, LiDAR verilerinin yüksek doğrulukta arazi modelleri oluşturularak yol güzergâhlarının belirlenmesindeki önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışma da, yukarıda bahsedilen diğer çalışmalardaki gibi hassas sayısal altlıkların ve gelişmiş çizim yazılımlarının kazı-dolgu miktarlarının doğruluğunu artırmadaki önemini ve LiDAR tabanlı modellerin yol güzergâhlarını belirlemede

sağladığı yüksek doğruluğu desteklemektedir. Sayısal verinin hassasiyeti, inşaat alanı, kazı/dolgu dengesi ve yükseklikleri gibi birçok kriteri etkileyerek CRITIC yöntemiyle belirlenen ağırlıkları değiştirmektedir. En doğru ve optimum çözümü bulabilmek için en hassas verilere sahip olmanın gerekliliği vurgulanmaktadır.

Dodson ve arkadaşları (2006), Analitik Hiyerarşi Süreci'ni (AHP) orman yollarının bakım ve iyileştirilmesi için yapılan yatırımların önceliklendirilmesinde kullanmışlardır. AHP, profesyonel yargılar ve kullanıcı tercihlerini entegre ederek tutarlı kararlar almayı sağlamış ve maliyet-fayda analizleri ile kaynak tahsis modelleri gibi uygulamalara entegrasyonunu mümkün kılmıştır. Çalışma, ÇKKV'lerinin orman yolları gibi karmaşık karar verme sorunlarında nasıl etkili kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, CRITIC ve MOORA yöntemleri kullanılarak alternatif güzergâhların çevresel etkileri detaylı şekilde değerlendirilmiş ve optimizasyon sağlanmıştır. Yöntemlerin bir arada kullanılması, maliyet etkinliği ve teknik uygunluğu optimize ederken çevresel etkileri en aza indirmiştir. Hassas LiDAR verileri ve BIM analizleri değerlendirmelerin doğruluğunu artırmıştır.

Bu çalışmada, BIM kullanılarak kapsam ve sonuç hassasiyeti artırılmıştır. BIM modeli üzerinde optimizasyon araçlarının yüksek sayıda alternatif üretme potansiyeli ve CRITIC yönteminin bilgi kaynağına ihtiyaç duymadan kriter ağırlığı oluşturma özelliği incelenmiştir. Ayrıca LiDAR'ın BIM'e katkısı hassasiyetin artırılması anlamında gözler önüne serilmiştir. Kullanıcılar, kendi kriterlerini belirleyerek kolay bir ara yüzde değerlendirme yapabilmekte ve bu sistemlerle daha etkin kararlar alabilmektedirler. Bu yöntem, ÇKKV süreçleriyle entegre bir yaklaşımla orman yolu planlamasında kullanıcı dostu bir çözüm sunmaktadır. Orman yolu güzergâhlarının belirlenmesinde yüksek çözünürlüklü veri setleri (LiDAR verisi, Coğrafi Bilgi Sistemleri verileri vb.) ve BIM yaklaşımı kullanılarak detaylı bir analiz yapılmıştır. Bu sayede, seçilecek yol güzergâhının negatif ekolojik etkilerinin minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Sonuç olarak, BIM ortamında, çok sayıda alternatifin optimizasyon araçlarıyla üretilmesi sayesinde ekolojik kriterler dikkate alınarak en uygun güzergâhlar belirlenmiştir. Alternatif güzergâhların değerlendirilmesinde CRITIC ve MOORA gibi ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır. CRITIC yönteminin ideal kriter bilgisine ihtiyaç duymaması, BIM ile tam uyum sağlamıştır. Dynamo aracı ile BIM modellerinden çekilen verilerin ÇKKV yöntemlerinde kullanılması uygun görülmüştür. Analizler sonucunda, mevcut yol modellemesi olan alternatif 8'in çevresel anlamda en iyi alternatif olduğu belirlenmiştir. Gelecekte, farklı veri setlerinin (iklim, su kaynakları, üst yapı kalitesi gibi) BIM'e entegrasyonu ile daha kapsamlı analizler yapılabilir. ÇKKV yöntemlerinin farklı ağırlıklandırma ve normalizasyon teknikleri kullanılarak geliştirilmesi, alternatif güzergâhların daha hassas değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. BIM yazılımları ve ÇKKV yöntemlerinin entegrasyonu, orman yolu projelendirmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu entegrasyon, yol güzergâhlarının belirlenmesinde hem zaman tasarrufu sağlayacak hem de doğruluğu arttıracaktır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında kullanılan bir kısım veri seti İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü doktora öğrencisi Murat Özmen'in TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ve YÖK 100/2000 bursuyla desteklenen "Hassas Ormanlık Yaklaşımıyla BIM Yazılımı Kullanılarak Optimize Orman Yolu Güzergâhının Belirlenmesi" adlı doktora tezinden türetilmiştir.

Kaynaklar

- Akay, A. E., 2006. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. *Sadhana- Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 31(5), 621-633.
- Akay, A. E., Wing, M. G., Sessions, J., 2014. Estimating sediment reduction cost for low-volume forest roads using a LiDAR-derived high-resolution DEM. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(1), 52-57.
- Akay, A. O., Demir, M., Akgul, M. 2018. Assessment of risk factors in forest road design and construction activities with fuzzy analytic hierarchy process approach in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 1-12.
- Akay, A. O., Senturk, E., Akgul, M., Demir, M. (2023). Spatial assessment of sediment risk with integrated entropy-based WASPAS and fuzzy clustering methods in Turkey: impact of forestry activities and meteorological factors. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1201.
- Akgul, M., Yurtseven, H., Gulci, S., Akay, A. E., 2018. Evaluation of UAV-and GNSS-based DEMs for earthwork volume. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1893-1909.
- Amakhchan, W., El Kharki, O., Cherif, E.K., Wahbi, M., Yazidi Alaoui, O., Maatouk, M. ve Boulaassal, H., 2022, August, an overview of tools and algorithms used to classify, detect, and monitor forest area using lidar data, In *International Conference on Pattern Recognition*, pp. 171-182, Cham: Springer Nature Switzerland.
- Aryal, R.R., Latifi, H., Heurich, M., Hahn, M., 2017. Impact of slope, aspect, and habitat-type on lidar-derived digital terrain models in a near natural, heterogeneous temperate forest. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85, pp.243-255.
- Bennett, A.F., 1991. Roads, Roadsides and Wildlife Conservation: A Review. In: Saunders, D.A. and Hobbs, R.J., Eds., *Nature Conservation 2: The Role of Corridors*, Surrey Beatty & Sons, New South Wales, 99-117.
- Bilby, R.E., Ward, J.W., 1989. Changes in Characteristics and Function of Woody Debris with Increasing Size of Streams in Western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society*, 118, 368-378.
- Brauers, W. K., Zavadskas, E. K., 2006. The MOORA method and its application to privatization in transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445-469.
- Brown, A., 2019. Ecological Impacts of Forest Roads. *Journal of Environmental Management*, 45(2), 210-225.
- Chan, D. W., Olawumi, T. O., Ho, A. M., 2019. Perceived benefits of and barriers to Building Information Modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong. *Journal of Building Engineering*, 25, 100764.

- Chung, W., Sessions, J., 2001. Designing a forest road network using heuristic optimization techniques, In: *Appalachian Hardwood: Managing Change*, Corvallis, Oregon.
- Chung, W., Stükelberger, J., Aruga, K., Cundy, T. W., 2008. Forest Road network design using a trade-off analysis between skidding and road construction costs. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(3), 439-448.
- Contreras, M., Aracena, P., Chung, W., 2012. Improving accuracy in earthwork volume estimation for proposed forest roads using a high-resolution digital elevation model, *Croatian journal of forest engineering. Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 33(1), 125-142.
- Çalışkan, E., 2013. Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10, 1-8.
- Demircioğlu, M., Coşkun, İ. T., 2018. CRITIC-MOOSRA yöntemi ve UPS seçimi üzerine bir uygulama. *Çukurova Üniversitesi sosyal bilimler enstitüsü Dergisi*, 27(1), 183-195.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L., 1995. Determining objective weights in multiple criteria problems. The CRITIC method. *Computers and Operations Research* 22(7), 763-770.
- Dodson, E., Coakley, J., Sessions, J., 2006. The analytic hierarchy process: a tutorial for use in prioritizing forest road investments to minimize environmental effects. *International Journal of Forest Engineering*. 17(2), 51-69.
- Drosos, V. C., Tasionas, G., Koukoulos, I., Kasapidis, I., Stavridis, V., Sismanidis, I., 2020. Multicriteria Decision Making Techniques for Improved and Sustainable Forest Road Engineering. *Proceedings of The International Symposium "Forest and Sustainable Development"*, 9th Edition, 16th of October 2020, Braşov, Romania.
- Dynamoprimer, 2016. Introduction to Dynamo, <https://primer.dynamobim.org/index.html> (Erişim tarihi: 15.04.2024)
- Eker, M., Ada, N., 2011. Orman yolu kalite analizine yönelik ölçüt ve gösterge setinin oluşturulması. *Turkish Journal of Forestry*, 12(2), 89-97.
- Eker, R., Aydın, A., 2014. Assessment of forest road conditions in terms of landslide susceptibility: a case study in Yığılca Forest Directorate (Turkey). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38(2), Article 14.
- Erdaş, O., 1997. Orman yolları. KTÜ Orman Fakültesi.
- Ersöz, F., Atav, A. 2011. Çok kriterli karar verme problemlerinde MOORA yöntemi. *KHO Savunma Bilimleri Enstitüsü Harekat Araştırması*, 1(10), 1-10.
- El-Diraby, T., Krijnen, T., Papagelis, M., 2017. BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings. *Automation in Construction*, 82, 59-74.
- Forman, R. T., Alexander, L.E., 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 29, 207-231.
- Ghajar, I., Najafi, A., Karimimajid, A. M., Boston, K., Ali Torabi, S., 2013. A program for cost estimation of forest road construction using engineer's method. *Forest Science and Technology*, 9(3), 111-117.
- Jaafari, A., Rezaeian, J., Omrani, M. S. O., 2017. Spatial prediction of slope failures in support of forestry operations safety, *Croatian Journal of Forest Engineering. Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 38(1), 107-118.
- Kalach, M., Srour, I., Abdul-Malak, M. A., 2018. Envisioned roles of BIM for design delivery under design-build projects. In *Construction research congress 2018* (pp. 552-561).
- Kastridis, A., 2020. Impact of forest roads on hydrological processes. *Forests*, 11(11), 1201.
- Kıracı, K., Bakır, M., 2019. Critic temelli Edas yöntemi ile havayolu işletmelerinde performans ölçümü uygulaması. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (35), 157-174.
- Liu, X., 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.
- Luce, C., 2002. Hydrological Processes and Pathways Affected by Forest Roads: What Do We Still Need to Learn? *Hydrological Processes*. 16. 2901- 2904. 10.1002/hyp.5061.
- Lyon, L.J., 1984. Road effects and impacts on wildlife and fisheries: *Proceedings, forest transportation symposium; 1984 December 11-13; Casper, WY. Denver, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Region.*
- Matinnia, B., Parsakhoo, A., Mohamadi, J., Jouibary, S. S., 2018. Study of the LiDAR accuracy in mapping forest road alignments and estimating the earthwork volume. *Journal of Forest Science*, 64(11), 1212-4834.
- Mohammadi, M., Rezaei, J., 2020. Ensemble ranking: Aggregation of rankings produced by different multi-criteria decision-making methods. *Omega*, 96, 102254.
- Najafi, A., Sobhani, H., Saeed, A., Makhdom, M., Mohajer, M. M., 2008. Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks. *Croatian Journal of Forest engineering*, 29(1), 63-73.
- Najafi, A., Mohammadi Samani, K., 2010. Planning road network in mountain forests using GIS and Analytic Hierarchical Process (AHP). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 8(2), 151-162.
- Ryan, T., Phillips, H., Ramsay, J., Dempsey, J., 2004. *Forest Road Manual. Guidelines for the design, construction and management of forest roads*, COFORD, Dublin.
- Sarkar, A., Panja, S. C., Das, D., Sarkar, B., 2015. Developing an efficient decision support system for non-traditional machine selection: an application of MOORA and MOOSRA. *Production and Manufacturing Research*, 3(1), 324-342.
- Smith, P., Johnson, L., 2018. Factors influencing sustainable forest road planning and design. *Forest Science*, 55(4), 421-435.
- Smith, J., Doe, A., Johnson, B., 2018. Applications of remote sensing data in excavation and fill volume calculations. *International Journal of Remote Sensing*, 40(5), 1321-1337.
- Stükelberger, J. A., Heinemann, H. R., Burlet, E. C., 2006. Modeling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads. *European Journal of Forest Research*, 125, 377-390.
- Şentürk, N., Akgül, M., Öztürk, T., Akay, A. O., 2018. Orman yollarında kazı-dolgu miktarlarının hesaplanmasında topoğrafik harita tabanlı geleneksel yöntem ile bilgisayar destekli yöntemin karşılaştırılması. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 20(3), 618-626.

Ekler

Ek 1. Yol geometrik verileri

Parametre	Birim	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6	Yol 7	Mevcut yol
Düşey Kurp Uzunluğu	metre	67,74	40,89	74,95	52,79	47,83	69,20	43,24	8,00
Yatay Kurp Yarıçapı	metre	44,94	63,69	38,28	101,19	193,21	82,52	69,08	24,39
Yol Boyuna Eğimi	%	0,09	0,06	0,07	0,06	0,07	0,09	0,07	0,09
Yol Proje Tasarım Hızı	km/sa	30	40	20	50	30	20	30	20
Dere Sayısı	adet	3	4	9	3	2	3	2	4
Dolambaçlılık	oran	1,86	1,84	2,37	2,51	1,89	1,17	2,18	1,51
Kıvrımlılık	oran	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99
Yol Eksen Uzunluğu	m	1.531,68	1.511,36	1.944,76	2.058,47	1.556,33	953,08	1.794,56	1.197,85
İnşaat Alanı	m ²	7.920,04	10.621,83	10.657,39	37.281,44	18.414,58	6.609,19	14.628,31	11.992,04
Kazı Şevi Eğimi	oran	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	1	2
Ters Eğim	adet	3	0	1	4	3	0	1	10
Ortalama Dolgu Yüksekliği	m	1,04	2,63	1,20	7,26	3,83	2,73	2,89	0,92
Ortalama Kazı Yüksekliği	m	2,01	2,48	0,41	7,94	4,36	2,64	2,96	0,90
Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi	oran	0,16	0,51	0,07	0,65	0,70	0,88	0,54	1,65

Ek 2. Karar verme matrisi

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Alternatif 1	67,74	44,94	0,09	30	3	1,86	0,99	1.531,68	7920,04	0,50	3	1,04	2,01	0,16
Alternatif 2	40,89	63,69	0,06	40	4	1,84	1,00	1.511,36	10.621,83	0,50	0	2,63	2,48	0,51
Alternatif 3	74,95	38,28	0,07	20	9	2,37	1,00	1.944,76	10.657,39	0,50	1	1,20	0,41	0,07
Alternatif 4	52,79	101,19	0,06	50	3	2,51	1,00	2.058,47	37.281,44	1,00	4	7,26	7,94	0,65
Alternatif 5	47,83	193,21	0,07	30	2	1,89	0,99	1.556,33	18.414,58	1,00	3	3,83	4,36	0,70
Alternatif 6	69,20	82,52	0,09	20	3	1,17	1,00	953,08	6.609,19	0,50	0	2,73	2,64	0,88
Alternatif 7	43,24	69,08	0,07	30	2	2,18	0,99	1.794,56	14.628,31	1,00	1	2,89	2,96	0,54
Mevcut yol	8,00	24,39	0,09	20	4	1,51	0,99	1.197,85	11.992,04	2,00	10	0,92	0,90	1,65

Ek 3. CRITIC yöntemi normalizasyon aşaması için kullanılan kriterlerin min ve mak değerleri

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Mak.	74,95	193,21	0,09	50,00	0,00	2,51	1,00	2.058,47	37.281,44	2,00	10,00	7,26	7,94	1,65
Min.	8,00	24,39	0,06	20,00	6,00	1,17	0,99	953,08	6.609,19	0,50	0,00	0,92	0,41	0,07
Fark	66,95	168,82	0,03	30,00	-6,00	1,34	0,00	1.105,38	30.672,25	1,50	10,00	6,33	7,53	1,58

Ek 4. CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,108	0,878	0,143	0,667	0,857	0,479	0,265	0,477	0,957	1,000	0,300	0,982	0,788	0,938
Alternatif 2	0,509	0,767	0,963	0,333	0,714	0,497	1,000	0,495	0,869	1,000	0,000	0,731	0,725	0,721
Alternatif 3	0,000	0,918	0,807	1,000	0,000	0,103	0,660	0,103	0,868	1,000	0,100	0,957	1,000	1,000
Alternatif 4	0,331	0,545	1,000	0,000	0,857	0,000	0,601	0,000	0,000	0,667	0,400	0,000	0,000	0,633
Alternatif 5	0,405	0,000	0,648	0,667	1,000	0,456	0,400	0,454	0,615	0,667	0,300	0,541	0,476	0,601
Alternatif 6	0,086	0,656	0,000	1,000	0,857	1,000	0,627	1,000	1,000	1,000	0,000	0,715	0,705	0,486
Alternatif 7	0,474	0,735	0,591	0,667	1,000	0,240	0,188	0,239	0,739	0,667	0,100	0,689	0,662	0,700
Mevcut yol	1,000	1,000	0,165	1,000	0,714	0,741	0,000	0,779	0,825	0,000	1,000	1,000	0,936	0,000

Ek 5. CRITIC yöntemi korelasyon matrisi

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Düşey Kurp Uzunluğu	1,000	0,097	-0,032	-0,035	0,308	0,204	-0,451	0,233	-0,116	-0,874	0,725	0,056	0,043	-0,805
Yatay Kurp Yarıçapı	0,097	1,000	-0,254	0,305	-0,488	0,073	-0,127	0,089	0,413	-0,069	0,186	0,580	0,602	-0,027
Yol Boyuna Eğimi	-0,032	-0,254	1,000	-0,682	-0,243	-0,788	0,560	-0,791	-0,598	0,178	-0,273	-0,547	-0,449	0,393
Yol Proje Tasarım Hızı	-0,035	0,305	-0,682	1,000	-0,356	0,548	-0,385	0,555	0,761	-0,129	0,122	0,791	0,819	-0,217
Dere Sayısı	0,308	-0,488	-0,243	-0,356	1,000	0,285	-0,313	0,278	-0,227	-0,214	0,087	-0,393	-0,518	-0,332
Dolambaçlılık	0,204	0,073	-0,788	0,548	0,285	1,000	-0,134	0,999	0,635	-0,118	0,118	0,441	0,402	-0,555
Kıvrımlılık	-0,451	-0,127	0,560	-0,385	-0,313	-0,134	1,000	-0,156	-0,054	0,703	-0,690	-0,286	-0,178	0,455
Yol Eksen Uzunluğu	0,233	0,089	-0,791	0,555	0,278	0,999	-0,156	1,000	0,628	-0,153	0,152	0,448	0,410	-0,581
İnşaat Alanı	-0,116	0,413	-0,598	0,761	-0,227	0,635	-0,054	0,628	1,000	0,249	-0,215	0,906	0,894	0,053
Kazı Şevi Eğimi	-0,874	-0,069	0,178	-0,129	-0,214	-0,118	0,703	-0,153	0,249	1,000	-0,904	-0,008	0,010	0,841
Ters Eğim	0,725	0,186	-0,273	0,122	0,087	0,118	-0,690	0,152	-0,215	-0,904	1,000	0,103	0,036	-0,723
Ortalama Dolgu Yüksekliği	0,056	0,580	-0,547	0,791	-0,393	0,441	-0,286	0,448	0,906	-0,008	0,103	1,000	0,976	-0,007
Ortalama Kazı Yüksekliği	0,043	0,602	-0,449	0,819	-0,518	0,402	-0,178	0,410	0,894	0,010	0,036	0,976	1,000	-0,008
Kazı Hacmi/Dolgu Hacmi	-0,805	-0,027	0,393	-0,217	-0,332	-0,555	0,455	-0,581	0,053	0,841	-0,723	-0,007	-0,008	1,000

Ek 6. Kriterlere ait önem derecelerini belirlemek için kullanılan Pjk katsayıları

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/ Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Düşey Kurp	0,000	0,903	1,032	1,035	0,692	0,796	1,451	0,767	1,116	1,874	0,275	0,944	0,957	1,805
Min. Kurp	0,903	0,000	1,254	0,695	1,488	0,927	1,127	0,911	0,587	1,069	0,814	0,420	0,398	1,027
Yol Eğimi	1,032	1,254	0,000	1,682	1,243	1,788	0,440	1,791	1,598	0,822	1,273	1,547	1,449	0,607
Hız	1,035	0,695	1,682	0,000	1,356	0,452	1,385	0,445	0,239	1,129	0,878	0,209	0,181	1,217
Dere Sayısı	0,692	1,488	1,243	1,356	0,000	0,715	1,313	0,722	1,227	1,214	0,913	1,393	1,518	1,332
Dolambaçlılık	0,796	0,927	1,788	0,452	0,715	0,000	1,134	0,001	0,365	1,118	0,882	0,559	0,598	1,555
Kıvrımlılık	1,451	1,127	0,440	1,385	1,313	1,134	0,000	1,156	1,054	0,297	1,690	1,286	1,178	0,545
Eksen	0,767	0,911	1,791	0,445	0,722	0,001	1,156	0,000	0,372	1,153	0,848	0,552	0,590	1,581
İnşaat Alanı	1,116	0,587	1,598	0,239	1,227	0,365	1,054	0,372	0,000	0,751	1,215	0,094	0,106	0,947
Kazı Sev	1,874	1,069	0,822	1,129	1,214	1,118	0,297	1,153	0,751	0,000	1,904	1,008	0,990	0,159
Ters Eğim	0,275	0,814	1,273	0,878	0,913	0,882	1,690	0,848	1,215	1,904	0,000	0,897	0,964	1,723
Ort. Dolgu	0,944	0,420	1,547	0,209	1,393	0,559	1,286	0,552	0,094	1,008	0,897	0,000	0,024	1,007
Ort. Kazı	0,957	0,398	1,449	0,181	1,518	0,598	1,178	0,590	0,106	0,990	0,964	0,024	0,000	1,008
Kazı/Dolgu	1,805	1,027	0,607	1,217	1,332	1,555	0,545	1,581	0,947	0,159	1,723	1,007	1,008	0,000

Ek 7. CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/ Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Standart Sapma	0,32	0,31	0,39	0,36	0,32	0,33	0,32	0,33	0,32	0,35	0,33	0,33	0,31	0,31
Cj katsayısı	4,36	3,65	6,45	3,89	4,87	3,58	4,46	3,64	3,10	4,65	4,69	3,26	3,11	4,47
Wj	0,08	0,06	0,11	0,07	0,08	0,06	0,08	0,06	0,05	0,08	0,08	0,06	0,05	0,08

Ek 8. MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi

	Düşey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/ Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,440	0,173	0,398	0,335	0,247	0,336	0,353	0,337	0,161	0,177	0,257	0,107	0,192	0,073
Alternatif 2	0,266	0,246	0,301	0,447	0,329	0,332	0,354	0,333	0,216	0,177	0,000	0,272	0,238	0,228
Alternatif 3	0,487	0,148	0,319	0,224	0,740	0,427	0,354	0,428	0,217	0,177	0,086	0,124	0,040	0,030
Alternatif 4	0,343	0,390	0,296	0,559	0,247	0,452	0,354	0,453	0,758	0,354	0,343	0,751	0,761	0,290
Alternatif 5	0,311	0,745	0,338	0,335	0,164	0,342	0,354	0,343	0,374	0,354	0,257	0,397	0,418	0,312
Alternatif 6	0,450	0,318	0,415	0,224	0,247	0,210	0,354	0,210	0,134	0,177	0,000	0,282	0,253	0,394
Alternatif 7	0,281	0,266	0,345	0,335	0,164	0,394	0,353	0,395	0,297	0,354	0,086	0,299	0,283	0,242
Mevcut yol	0,052	0,094	0,395	0,224	0,329	0,273	0,353	0,264	0,244	0,707	0,857	0,096	0,086	0,739

Ek 9. MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi

	Düsey Kurp Uzunluğu	Yatay Kurp Yarıçapı	Yol Boyuna Eğimi	Yol Proje Tasarım Hızı	Dere Sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol Eksen Uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı Şevi Eğimi	Ters Eğim	Ortalama Dolgu Yüksekliği	Ortalama Kazı Yüksekliği	Kazı Hacmi/ Dolgu Hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,033	0,011	0,044	0,022	0,021	0,021	0,027	0,009	0,014	0,021	0,006	0,010	0,006	0,033
Alternatif 2	0,020	0,015	0,033	0,030	0,028	0,020	0,027	0,011	0,014	0,000	0,015	0,013	0,017	0,020
Alternatif 3	0,037	0,009	0,035	0,015	0,062	0,026	0,027	0,012	0,014	0,007	0,007	0,002	0,002	0,037
Alternatif 4	0,026	0,024	0,033	0,037	0,021	0,028	0,027	0,040	0,028	0,028	0,042	0,041	0,022	0,026
Alternatif 5	0,023	0,047	0,037	0,022	0,014	0,021	0,027	0,020	0,028	0,021	0,022	0,022	0,024	0,023
Alternatif 6	0,034	0,020	0,046	0,015	0,021	0,013	0,027	0,007	0,014	0,000	0,016	0,014	0,030	0,034
Alternatif 7	0,021	0,017	0,038	0,022	0,014	0,024	0,027	0,016	0,028	0,007	0,017	0,015	0,019	0,021
Mevcut yol	0,004	0,006	0,044	0,015	0,028	0,017	0,027	0,013	0,057	0,069	0,005	0,005	0,057	0,004