T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

HASSAS ORMANCILIK YAKLAŞIMIYLA BIM YAZILIMI KULLANILARAK OPTİMİZE ORMAN YOLU GÜZERGAHININ BELİRLENMESİ

Murat ÖZMEN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Mustafa AKGÜL

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Necmettin ŞENTÜRK

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Doktora Programı

Ağustos, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Murat ÖZMEN tarafından, **Doç. Dr. Mustafa AKGÜL** danışmanlığında hazırlanan **" HASSAS ORMANCILIK YAKLAŞIMIYLA BIM YAZILIMI KULLANILARAK OPTİMİZE ORMAN YOLU GÜZERGÂHININ BELİRLENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **08/08/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Mustafa AKGÜL İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Murat DEMİR İstanbul Üniversitesi-Cerrahapaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Abdullah Emin AKAY Bursa Teknik Üniversitesi Orman Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Hüseyin YURTSEVEN İstanbul Üniversitesi-Cerrahapaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Sercan GÜLCİ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Orman Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Murat ÖZMEN

(İmza)

İTHAF

Tüm Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

HASSAS ORMANCILIK YAKLAŞIMIYLA BIM YAZILIMI KULLANILARAK OPTİMİZE ORMAN YOLU GÜZERGÂHININ BELİRLENMESİ

Bu tez çalışması YÖK 100/2000 doktora bursu ve TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez danışman hocalarım Sayın Doç.Dr Mustafa Akgül ve Doç.Dr Necmettin Şentürk'e, araştırmam boyunca bana rehberlik eden, değerli öneri ve geri bildirimleri ile çalışmamı şekillendiren anlayışlı ve sabırlı tutumları için içtenlikle teşekkür ederim. Onların bilgi ve tecrübesi, bu tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Buna ek olarak, tez çalışmam sırasında bana sağladıkları kaynaklar ve verdikleri bilgilerle katkıda bulunan Prof. Dr. Abdullah Emin Akay, Prof. Dr. Murat Demir, Doç. Dr. Hüseyin Yurtseven ve Dr.Öğr. Üyesi Anıl Orhan Akay ve de diğer ilgili kişilere teşekkür ederim

Ayrıca, bu tez çalışmamda 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında bana yurtdışında çalışma olanağı tanıyan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu zorlu süreç boyunca yanımda olan, sabırlarını ve sevgilerini esirgemeyen sevgili eşim Özlem Özmen'e, sevgili oğullarım Ömür Fırat ve Çınar Özmen'e, bana doktora yapmayı hayal ettiren ve hiç yalnız bırakmayan canım babam Güngör Özmen, canım annem Memnune Özmen, canım ablam Eda Özmen ve canım abim Polat Özmen'e, beni hep cesaretlendiren canim annem Birgul Uzun, canim babam İsmet Uzun'a ve küçük Uzun ailesine, akademik başarı konusunda bana güvenen teyzem Münevver Ergun ve eniştem Hikmet Ergun'a, bilgilerini ve desteklerini benden esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Gözde Bür ve Dara Hajebi'ye, tezimde veri konusunda bana çok yardımcı olan sevgili Banu Sayın, Bora Sayın ve İlker Demirci'ye yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2024 **Murat ÖZMEN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
İTHAF ..... **iv**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. ORMAN YOLLARI VE GEOMETRİK STANDARTLARI 5
2.2. SAYISAL ARAZİ MODELİ 10
2.3. YOL PROJELENDİRME YAZILIMLARI 13
2.4. BIM MODELLEMESİ 14
2.5. ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİ 21
3. YÖNTEM **27**
3.1. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL BİLGİLER 29
3.2. SAM ELDE EDİLMESİ 35
3.2.1. LiDAR Verileri 35
3.2.2. Kriging metoduyla mevcut yolun inşaat öncesi durumuna göre arazi modelinin düzenlenmesi 38
3.3. VEKTÖR VE RASTER VERİ SETLERİNİN BIM ORTAMINA ENTEGRASYONU 44

3.4. BIM ORTAMINDA KORİDOR OPTİMİZASYONU İLE ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ OLUŞTURULMASI 45
3.4.1. Koridor Optimizasyonu 46
3.4.2. Mevcut yolun modellenmesi 54
3.5. TEKNİK, EKOLOJİK VE SOSYAL YOL KRİTELERİNİN BELİRLENMESİ VE BIM ORTAMINA ENTEGRASYONU 56
3.5.1. Teknik açıdan etkili olan kriterler 60
Şekil 3.41: Ortalama yol eğimi değerinin hesaplanması 64
3.5.2. Ekolojik açıdan etkili olan kriterler 80
3.5.3. Sosyal açıdan etkili olan kriterler 85
3.6. ÇKKV İLE ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ 88
3.6.1. CRITIC Ağırlıklandırma Yöntemi 88
3.6.2. MOORA Sıralama Yöntemi 91
4. BULGULAR 93
4.1. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT GEOMETRİK BULGULAR 93
4.2. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT PARAMETRELERİN TEKNİK AÇINDAN KARŞILAŞTIRILMASI 111
4.2.1. Teknik Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular 112
4.2.2. Teknik Kriterlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular 116
4.3. EKOLOJİK AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI 117
4.3.1. Ekolojik Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular 117
4.3.2. Ekolojik Kriterlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular 121
4.4. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT PARAMETRELERİN SOSYAL AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI 122
4.4.1. Sosyal Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular 122
4.4.2. Sosyal Kritelerlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular 125
4.5. ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ MALİYETLERİNE AİT BULGULAR 126
5. TARTIŞMA 130
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 138
KAYNAKLAR 140
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 157
ETİK KURUL İZİN YAZISI 158
KURUM İZNİ YAZILARI 159
ÖZGEÇMİŞ 160

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Yolların sınıflandırılması (Kök, 2019) 5
Şekil 2.2: Yol enkesit elemanları 6
Şekil 2.3: Ana orman yolu (7+1 m) 7
Şekil 2.4: A tipi orman yolu (6+1 m) 7
Şekil 2.5: B tipi orman yolu (4+1 m) 9
Şekil 2.6: Ekstrem B tipi orman yolu (3+ 0,5 m) 9
Şekil 2.7: Traktör yolu (3,5 m) 10
Şekil 2.8: Kullanım şekline göre LiDAR platformları 13
Şekil 2.9: Ülkelere göre BIM adaptasyon süreci 15
Şekil 2.10: BIM çalışma prensibi 16
Şekil 2.11: Örnek Dynamo script arayüzü 18
Şekil 2.12: ÇKKV sürecinde yapılan işlemler 21
Şekil 3.1: Çalışma iş akış şeması 28
Şekil 3.2: Çalışma alanı 29
Şekil 3.3: Çalışma alanına ait LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli (SAM) 30
Şekil 3.4: Çalışma alanı yükselti dağılım histogramı 31
Şekil 3.5: Çalışma alanı eğim dağılım histogramı 31
Şekil 3.6: Çalışma alanı eğim haritası 32
Şekil 3.7: Çalışma alanı bakı dağılımları 33
Şekil 3.8: Çalışma alanı bakı haritası 34

Şekil 3.9: LiDAR nokta bulutu verilerinin filtrelenmesi ve SAM üretimi. a) Filtrelenmemiş nokta bulutu. b) Çıplak yeryüzüne ait filtrelenmiş nokta bulutu. c) Raster sayısal arazi modeli 37

Şekil 3.10: Eksen üzerindeki noktaların seyreltilmesi 40

Şekil 3.11: Ampirik yarı-variogram grafiği örneği 40

Şekil 3.12: Infraworks yazılımıyla şev kenarlarının belirlenmesi 42

Şekil 3.13 : Boş alanın dışındaki noktaların oluşturulması 42

Şekil 3.14: Autocad Civil 3D yazılımında Kriging metodu uygulama arayüzü 43

Şekil 3.15: Uygulama öncesi durumu gösteren kesitler mavi renkle sonraki durumu gösteren kesitler siyah renkte görünmekte 43

Şekil 3.16: Arazi modelinin kriging metodu uygulanarak düzenlenmiş hali 44

Şekil 3.17: Optimizasyona altlık olacak olan BIM modeli 45

Şekil 3.18: Model verisinden oluşturulan karelaj verisi 46

Şekil 3.19: Model verilerinden edilen su alanı karelajı 47

Şekil 3.20: Koridor optimizasyonu ileri ayarlar menüsü 47

Şekil 3.21: Sahada belirlenen kaçınma bölgelerinin belirlenmesi 48

Şekil 3.22: Dairesel bir şekil ve gradyan kullanan uygunluk haritası 48

Şekil 3.23: Zemin sınıfları uygunluk haritası ağırlık tanımları 49

Şekil 3.24: Arazi katmanından profil ve kesit verilerinin okunması 50

Şekil 3.25: Hafriyat için son ortalama alan yöntemi için enine kesit hesaplamaları 50

Şekil 3.26: Birim maliyetlerin girişinin yapıldığı menü 50

Şekil 3.27: En kısa yol karelaj yerleşimi 51

Şekil 3.28: Karelaj boyunca en kısa yol 52

Şekil 3.29: Bulunan en kısa yolun yumuşatılması 52

Şekil 3.30: Enkesitlerden otomatik ofset çıkarılması 52

Şekil 3.31: Yol başlangıç noktası (yeşil), bitiş noktası (kırmızı) 53

Şekil 3.32: Optimizasyon yapılacak alan sınırı 54

Şekil 3.33: Yol kenarlarından oluşturulan noktaları en iyi güzergâh belirlemede kullanılması 55
Şekil 3.34: Noktalar eksen üzerine yansıtılırken izlenebilen regresyon grafiği 55
Şekil 3.35: Maksimum kurp yarıçap ayarıyla eğrilerin yerleştirilmesi 56
Şekil 3.36: Eksen üzerindeki noktaların seyreltilmesi 56
Şekil 3.37: Simetrik parabol geometrisi 61
Şekil 3.39: Yatay kurp geometrik elemanları 62
Şekil 3.41: Ortalama yol eğimi değerinin hesaplanması 64
Şekil 3.42: Yol hız değerinin bulunması 64
Şekil 3.43: Yolun üzerinden geçtiği toplam dere sayısının belirlenmesi 65
Şekil 3.44: Dolambaçlılık faktörü 66
Şekil 3.45: Dolambaçlılık faktörünün belirlenmesi 67
Şekil 3.46: Kıvrımlılık faktörü 67
Şekil 3.47: Kıvrımlılık faktörünün belirlenmesi 68
Şekil 3.48: Yol eksen uzunluğunun hesaplanması 69
Şekil 3.49: Araştırma alanına ait toprak türü haritası 71
Şekil 3.50: Toprak türü CBS şematik haritası 72
Şekil 3.51: Yol oturum alanındaki kumlu kil toprak türü alanının hesaplanması 73
Şekil 3.52: Yol oturum alanındaki balçıklı kil toprak türü alanının hesaplanması 73
Şekil 3.53: İnşaat alanı bilgisinin alınması 74
Şekil 3.54: Kazı şevi eğiminin hesaplanması 75
Şekil 3.55: Yol boyunca olan ters eğim sayısının hesaplanması 76
Şekil 3.56: Kazı ve dolgu ortalama yüksekliklerinin hesaplanması 77
Şekil 3.57: Kazı/dolgu oranının hesaplanması 78
Şekil 3.58: Alınan verilerin Excel yazılımına atılması 79
Şekil 3.59: Dynamo player arayüzü 79

Şekil 3.60: CRITIC ve MOORA yöntemleriyle karşılaştırılmanın yapıldığı ham Excel dosyası 80

Şekil 3.61: Planlamada dere- orman yolu ilişkisi (WSD of Natural Sources, Forest Roads) .. 82

Şekil 4.1: Yol güzergâhı alternatiflerinin genel planı 93

Şekil 4.2: 1 nolu alternatif güzergâha ait plan ve profili 96

Şekil 4.3: 1 nolu alternatif güzergâha ait BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü..... 97

Şekil 4.4: 2 nolu alternatifin plan ve profile..... 98

Şekil 4.5: 2 nolu alternatif güzergaha ait BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü..... 99

Şekil 4.6: 3 nolu alternatifin plan ve profili 100

Şekil 4.7: 3 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü 101

Şekil 4.8: 4 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri..... 101

Şekil 4.9: 4 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü 103

Şekil 4.10: 5 nolu alternatifin plan ve profili..... 104

Şekil 4.11: 5 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü 105

Şekil 4.12: 6 nolu alternatifin plan ve profili..... 105

Şekil 4.13: 6 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü 107

Şekil 4.14: 7 nolu alternatifin plan ve profili..... 107

Şekil 4.15: 7 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü 109

Şekil 4.16: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin plan, profili ve 0+410.00-0+465.00 arası profil detay görünümü 110

Şekil 4.17: 8 nolu alternatifin AutoCAD Civil 3D yazılımındaki modeli..... 111

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Orman yolları geometrik standartları (OGM, 2008) 6
Tablo 2.2: CRITIC ağırlıklandırma yönteminin avantaj ve dezavantajları 23
Tablo 2.3: Bazı sıralama yöntemlerin karşılaştırılması (Sakar ve diğ, 2015) 23
Tablo 3.1: Bakıların alansal dağılımı 33
Tablo 3.2: Tane boyutlarına göre zemin cinsleri 49
Tablo 3.3: Teknik, ekolojik ve sosyal açıdan yol kalite analizden dikkate alınan kriterler 59
Tablo 3.4: Kullanılan toprak türleri 70
Tablo 4.1: Yol alternatifleri için konumsal kısıtlar 94
Tablo 4.2: Yol alternatifleri için kullanılan teknik kısıtlar 94
Tablo 4.3: Yol güzergâhlarının yatay bilgi özeti 95
Tablo 4.4: Yol güzergâhlarının düşey bilgi özeti 95
Tablo 4.5: 1 nolu alternatif güzergahın yatay geometri bilgileri 96
Tablo 4.6: 1 nolu alternatif güzergâhın profil geometisine ait bilgiler 97
Tablo 4.7: 2 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri 98
Tablo 4.8: 2 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 99
Tablo 4.9: 3 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri 100
Tablo 4.10: 3 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 101
Tablo 4.11: 4 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri 102
Tablo 4.12: 4 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 102
Tablo 4.13: 5 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri 103
Tablo 4.14: 5 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 104
Tablo 4.15: 6 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri 106

Tablo 4.16: 6 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 106
Tablo 4.17: 7 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri..... 108
Tablo 4.18: 7 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler 109
Tablo 4.19: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin (300-545m arası) yatay geometri bilgileri 110
Tablo 4.20: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin (300-550m arası) profil bilgileri 111
Tablo 4.21: Yol geometrik kriterlerine ilişkin veri 112
Tablo 4.22: Karar matrisi 112
Tablo 4.23: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi..... 113
Tablo 4.24: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi..... 114
Tablo 4.25: P*Jk* katsayıları 115
Tablo 4.26: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları..... 116
Tablo 4.27: MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi..... 116
Tablo 4.28: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi ... 117
Tablo 4.29: Fayda-maliyet analizi değerleri..... 117
Tablo 4.30: Yol ekolojik kriterlerine ilişkin veri..... 118
Tablo 4.31: Karar matrisi 118
Tablo 4.32: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi..... 118
Tablo 4.33: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi..... 119
Tablo 4.34: *PJk* katsayıları 120
Tablo 4.35: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları..... 120
Tablo 4.36: MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi..... 121
Tablo 4.37: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi ... 121
Tablo 4.38: Fayda-maliyet analizi değerleri..... 122
Tablo 4.39: Yolun sosyal kriterlere ilişkin verisi 122
Tablo 4.40: Karar matrisi 122
Tablo 4.41: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi..... 123
Tablo 4.42: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi..... 123

Tablo 4.43: P*Jk* katsayıları 123
Tablo 4.44: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları 124
Tablo 4.45 : MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi 125
Tablo 4.46: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi ... 125
Tablo 4.47: Fayda-maliyet analizi değerleri 126
Tablo 4.48: Alternatif yol güzergâhlarına ait kazı, dolgu ve menfez değerleri 127
Tablo 4.49: Alternatif yol güzergahlarına ait kazı maliyeti hesabı 127
Tablo 4.50: Alternatif yol güzergahlarına ait dolgu maliyeti hesabı 128
Tablo 4.51: Alternatif yol güzergâhlarına ait menfez maliyeti hesabı 128
Tablo 4.52: Alternatif yol güzergâhlarına ait toplam maliyetler 129
Tablo 4.53: Alternatif yol güzergâhlarının maliyetlerine göre sıralaması 129
Tablo 5.1: Alternatif yol güzergahlarının ekolojik, teknik, sosyal ve maliyetleri açısından sıralaması 130
Tablo 5.2: Alternatif yol güzergahlarının ağırlıklı puan hesabı 132
Tablo 5.3: Alternatif yol güzergâhlarının genel açıdan sıralaması 133

KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (American Association of State Highway and Transportation Officials)
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
ALS	: Havasal LiDAR Sistemleri (Airborne LiDAR Systems)
ANP	: Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process)
API	: Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BIM	: Yapı Bilgi Sistemi (Building Information Modeling)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CFOR	: Mevcut Orman Yolu Rotası (Current Forest Road)
CILOS	: Kriterlerin Önem Derecesi ve Sıra Skorlaması (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation and Level Order Scoring)
COGO	: Koordinat Geometrisi (Coordinate Geometry)
CP	: Kritik Yol (Critical Path)
CRITIC	: Criteria Importance Through Intercriteria Correlation
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme (Multi-Criteria Decision Making)
DEM	: Sayısal Yükselti Modeli (Digital Elevation Model)
DEMATEL	: Karar Verme Denemesi ve Değerlendirme Laboratuvarı (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory)
EBT	: Ekstrem B-Tipi Tali Orman Yolu
ELECTRE	: Gerçekliği Yansıtan Seçim ve Eleme (Élimination et Choix Traduisant la Réalité)
EMYA	: En Az Maliyet Yolu Algoritması (Minimum Cost Path Algorithm)
ENTROPY	: Entropi Yöntemi (Entropy Method)
ESFOR	: Çevre Dostu Orman Yolu Rotası (Environmentally Friendly Forest Road)
ETW	: Eşdeğer Kamyon Genişliği (Equivalent Truck Width)
FUCOM	: Tam Tutarlılık Yöntemi (Full Consistency Method)
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System)

HPLC :Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (High Performance Liquid Chromatography)

IDW : Ters Mesafe Ağırlıklı (Inverse Distance Weighting)

İHA : İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aerial Vehicle)

LiDAR : Light Detection and Ranging

LP : Doğrusal Programlama (Linear Programming)

MACBETH : Kategorik Tabanlı Değerlendirme Tekniği ile Çekicilik Ölçümü (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)

MOORA : Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis

NBT : Normal B-Tipi Tali Orman Yolu

NSGA-II : Nedenli Sıralama Genetik Algoritması II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)

PI : Kesim Noktası (Point of Intersection)

PROMETHEE : Zenginleştirme Değerlendirmeleri için Tercih Sıralama Organizasyonu Yöntemi (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations)

RTK-GPS : Gerçek Zamanlı Kinematik Küresel Konumlama Sistemi (Real-Time Kinematic Global Positioning System)

SAM : Sayısal Arazi Modeli(Digital Terrain Model)

SAW : Basit Toplam Ağırlıklandırma (Simple Additive Weighting)

SBT : Standartları Yükseltilmiş B-Tipi Tali Orman Yolu

SHP : Shapefile

SIMOS : Basit Çoklu-Öznitelik Derecelendirme Tekniği (Simple Multi-Attribute Rating Technique)

SMART : Basit Çoklu-Öznitelik Derecelendirme Tekniği (Simple Multi-Attribute Rating Technique)

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

SWING : Ağırlıklandırma Yöntemi (Swing Weighting Method)

TLS : Yersel LiDAR Sistemleri (Terrestrial LiDAR Systems)

TOPSIS : İdeal Çözüme Benzerlik Tercihi ile Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TS : Total Station

VIKOR : Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

HASSAS ORMANCILIK YAKLAŞIMIYLA BIM YAZILIMI KULLANILARAK OPTİMİZE ORMAN YOLU GÜZERGÂHININ BELİRLENMESİ

Murat ÖZMEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Doç. Dr. Mustafa AKGÜL

II. Danışman : Doç. Dr. Necmettin ŞENTÜRK

Bu çalışmada, BIM modeli üzerinde optimizasyon araçlarının yüksek sayıda alternatif üretme potansiyeli ve CRITIC yönteminin kriter ağırlığı oluşturma kabiliyeti incelenmiştir. LiDAR ve CBS gibi hassas ormancılık araçlarının BIM modeline ve sonuç hassasiyetine katkısı da vurgulanmıştır. Kullanıcıların kendi kriterlerini belirleyerek kolay bir arayüzde değerlendirme yapabilmeleri, karar alma süreçlerinde etkinliği artırmaktadır. Bu yöntem, orman yolu planlamasında kullanıcı dostu bir çözüm sunmaktadır.

İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma Ormanı'ndaki bir orman yolu, LiDAR tabanlı SAM kaynağı baz alınarak BIM ortamında mevcut bir yol ve bu yola yedi alternatif güzergâh tanımlanmıştır. Teknik, ekolojik ve sosyal açıdan CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılan bu alternatifler, MOORA yöntemi ile sıralanmıştır. Maliyet açısından mevcut yol en avantajlıyken, Alternatif 4 en yüksek maliyetli seçenektir. Teknik değerlendirmede Alternatif 3 en uygun bulunmuş, ekolojik açıdan da yine Alternatif 3 öne çıkmıştır. Sosyal etkiler açısından Alternatif 3 en iyi performansı sergilemiştir.

Ağırlıklı ortalama yöntemi ile kriterler %25 eşit ağırlıkla değerlendirilmiş ve Alternatif 3 en düşük ağırlıklı puanı alarak en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Mevcut yol, maliyet ve çevresel açıdan avantajlı olsa da genel performans açısından üçüncü sırada yer almıştır. Alternatif 4 ise en yüksek ağırlıklı puanı alarak en dezavantajlı seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, yol güzergahı seçiminde çok yönlü kriterlerin dengeli bir şekilde değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Alternatif 3'ün maliyet, teknik, ekolojik ve sosyal açılardan dengeli performansı, bu güzergahı sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır. Bu çalışma, kaynakların etkin kullanımı ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi konusunda önemli katkılar sağlamaktadır.

Ağustos 2024 , 181 sayfa.

Anahtar kelimeler: BIM, ÇKKV, Optimizasyon, CRITIC, MOORA

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

DETERMINATION OF OPTIMIZED FOREST ROAD ROUTE USING BIM SOFTWARE WITH A PRECISE FORESTRY APPROACH

Murat ÖZMEN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Forest Engineering

Programme of Forest Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa AKGÜL

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Necmettin ŞENTÜRK

In this study, the potential of optimization tools to generate a high number of alternatives on the BIM model and the ability of the CRITIC method to generate criteria weights are examined. The contribution of precision forestry tools such as LiDAR and GIS to the BIM model and result accuracy is also emphasized. The ability of users to determine their own criteria and make evaluations in an easy interface increases the efficiency of decision-making processes. This method provides a user-friendly solution for forest road planning.

An existing forest road and seven alternative routes to this road were defined in BIM environment based on LiDAR-based SAM source for a forest road in IUC Forestry Faculty Education Research Forest. These alternatives were weighted by CRITIC method in terms of technical, ecological and social aspects and ranked by MOORA method. While the existing road is the most advantageous in terms of cost, Alternative 4 is the most costly option. In terms of technical evaluation, Alternative 3 was found to be the most suitable, and in terms of

ecological impacts, Alternative 3 was also the most favorable. Alternative 3 performed best in terms of social impacts.

With the weighted average method, the criteria were evaluated with 25% equal weight and Alternative 3 was determined as the most suitable alternative with the lowest weighted score. Although the existing road is advantageous in terms of cost and environmental aspects, it ranked third in terms of overall performance. Alternative 4 received the highest weighted score and was considered the most disadvantageous alternative.

The results emphasize the importance of balanced consideration of multifaceted criteria in road alignment selection. The balanced performance of Alternative 3 in terms of cost, technical, ecological and social aspects highlights this route as a sustainable and economic solution. This study makes important contributions to the efficient use of resources and minimization of environmental impacts.

August 2024, 181. pages.

Keywords: BIM, MCDM, Optimization, CRITIC, MOORA

1. GİRİŞ

Ormanlar, dünyamızın biyolojik çeşitliliğini destekleyen, iklimin düzenlenmesine katkı sağlayan ve ekosistem hizmetlerinin birçoğunu sağlayan kritik ekosistemlerdir. Bu nedenle, ormanların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve korunması hayati önem taşımaktadır. Ormanların sürdürülebilir olarak yönetimindeki en temel unsurlardan biri de idare, koruma ve odun üretimi gibi ormancılık faaliyetleri için kullanılan orman yollarıdır. Orman yolları, ormancılık faaliyetlerinin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yangın söndürme, doğal yaşamın korunması gibi acil müdahalelerde de kritik bir rol oynarlar.

Ancak, etkili bir orman yol ağı planlamak karmaşık bir süreci içermektedir. Bu süreç, ekonomik, çevresel ve mühendislik gereksinimlerini dengelemeyi gerektirir. Topoğrafya, toprak yapısı, hidrolojik koşullar ve biyolojik çeşitlilik gibi doğal faktörler, yol trafiği ve erişim gereksinimleri, ekonomik maliyetler ve çevresel etkiler gibi beşeri faktörlerle dengelenmelidir. Bu faktörler arasında denge kurmak, her birinin kendi öneminde olduğu karmaşık bir karar sürecini gerektirir.

Karar vericilerin bu süreçte dikkate alması gereken birçok önemli faktör vardır. Öncelikle, ormanın uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için ekolojik bütünlüğün korunması önemlidir. Ayrıca, ekonomik faktörler göz önünde bulundurulmalıdır; yatırım maliyetleri ile işletme ve bakım maliyetleri arasında optimal bir denge bulunmalıdır. Bunun yanında, toplumsal kabul ve yerel yönetim faktörleri de dikkate alınmalıdır; yerel toplulukların ihtiyaçları ve endişeleri doğru bir şekilde anlaşılmalı ve yol ağı tasarımında bunlarla uyumlu olacak şekilde planlama yapılmalıdır. Son olarak tüm bunları göz önünde bulundururken, teknik/geometrik kriterlerin de doğru hesaplanması planlama açısından son derece önemlidir.

Bu bağlamda teknolojinin gelişmesiyle birlikte, orman yolu planlama sürecinde kullanılan yazılımlar da çeşitlenmiştir. Geleneksel olarak, bilgisayar destekli tasarım (computer aided design) (CAD) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yazılımları yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak son yıllarda, Building Information Modeling (BIM) tabanlı yazılımların kullanımı artmıştır. BIM yazılımları, geometrik çizimlerin yanı sıra, çeşitli kriterlerin dikkate almasından dolayı

planlama sürecinde ön plana çıkmaktadır. Bu sayede, orman yolu planlama sürecinde daha kapsamlı bir yaklaşım benimsenir ve karar verme süreci daha iyi bir şekilde desteklenir.

Yazılım seçiminin yanında ayrıca, doğru veri kaynağının seçimi, veri çözünürlüğü/hassasiyeti ve doğruluğu da gerek maliyet açısından gerekse doğru tasarım açısından bu sürecin kritik bir parçasıdır. Son yıllarda, ormancılık sektöründe kullanılan havasal LiDAR (Light Detection and Ranging) verileri, yüksek çözünürlüklü sayısal arazi modelleri oluşturmak için önemli bir araç haline gelmiştir. Bu veriler, orman yolu planlama sürecindeki karar verme sürecine değerli bilgiler sağlamaktadır.

Gerek kullanılacak yol projelendirme/tasarım yazılım seçimi, gerekse veri seçimi doğru uygulansa da iki nokta arasında teknik standartlara uygun, farklı ekolojik, ekonomik, sosyal niteliklere sahip alternatif yol güzergâhları oluşturmak mümkündür. Bu çalışmada, karar verme sürecinde planlayıcının bu yollar açısından karar verme sürecini güçlendiren ve farklı güzergâhların kıyaslanmasını/değerlendirilmesini sağlayan yeni bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu bağlamda tez kapsamında, alternatif orman yolu güzergâhlarının belirlenmesi amacıyla, sayısal arazi modeli (SAM) kaynağı olarak havasal LiDAR verisi kullanılmıştır. Elde edilen veri, Autodesk tabanlı BIM yazılımında analiz edilerek farklı yol güzergâhları elde edilmiştir. Elde edilen yol güzergâhları arasındaki farkların ortaya konulması ve kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden nesnel bir yaklaşım olan Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) metodu kullanılmıştır. Belirlenen alternatiflerin sıralanmasında ise Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis (MOORA) yöntemi dikkate alınmıştır.

Bu kapsamda tez beş ana bölümde incelenmiştir:

Kavramsal Çerçeve bölümünde, orman yolları, sayısal arazi modeli ve yol projelendirme yazılımları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Sonrasında BIM modellemesi ve ÇKKV yöntemleri hakkında bilgiler verildikten sonra, söz konusu yöntemlerin kullanım amacı/hedefleri ve bu yöntemleri kullanarak yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Yöntem bölümünde ise çalışma alanına ait genel bilgiler verilmiştir. Akabinde, SAM elde edilmesi aşaması, BIM modelinin oluşturulması, kullanılan parametreler ve son olarak da

alternatif güzergâhlarının değerlendirilmesinde kullanılan ÇKKV yöntemlerine ait denklem ve modeller açıklanmıştır.

Bulgular bölümünde, yapılan optimizasyonlarda kullanılan konumsal ve teknik kısıtlar, 8 alternatifin detaylı bilgileri, plan görünüşleri, profilleri ve 3B görünüşlerine yer verilmiştir. Ayrıca CRITIC metodu ile her alternatif için teknik, ekolojik ve sosyal bakımdan ilgili kriterlere göre ağırlıklar belirlenip paylaşılmıştır. Bu ağırlık değerleri dikkate alınarak MOORA metodu kullanılarak alternatiflere ilişkin sıralamalar yapılmış ve tablolaştırılmıştır. Ayrıca maliyet açısından karşılaştırma için alternatiflerin kazı, dolgu ve sanat yapısı maliyetleri hesaplanarak alternatifler en ucuzdan en maliyetliye göre sıralanmıştır.

Tartışma bölümünde, alternatif güzergâhlar maliyet, teknik uygunluk, ekolojik etkiler ve sosyal kriterler-açısından sıralanmıştır. En uygun seçenek bulunmuş ve diğer alternatiflerde sıralama sonuçları irdelenmiştir. Bu bölümde, yol güzergâhı seçiminde dengeli ve çok yönlü kriterlerin değerlendirilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Sonuç ve Öneriler bölümünde, BIM ve ÇKKV yöntemlerinin yol güzergâhı belirlemeye getirdiği katkılardan bahsedilmiştir. Aynı zamanda LiDAR, BIM ve CBS gibi hassas ormancılık araçlarının sonuç hassasiyetlerine etkisi değerlendirilmiştir. Kriging yöntemi ve AutoCAD Civil 3D'nin "*best fit alignment*" aracının mevcut bir yolu baştan modellemedeki faydaları da bahsedilen diğer konulardandır. Ayrıca çıkan sonuçların irdelenmesiyle tezde kullanılan iş akışının katkısı göz önüne serilmiştir.

Bu açıdan çalışma sonuçlarının, gerek yol planlanmasında yüksek çözünürlüklü veri seti ve BIM yaklaşımının kullanılması, gerekse elde edilen sonuçların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmesi açısından sürdürülebilir yönetim ve planlama uygulamalarını desteklemek için önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

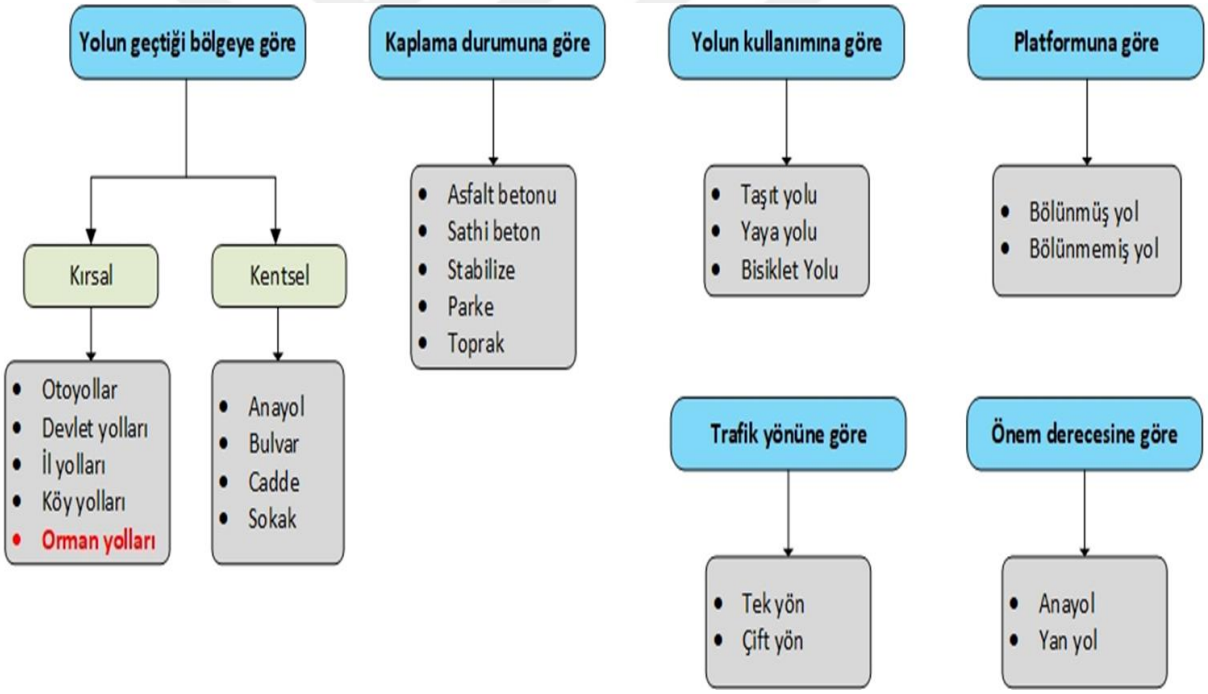
Orman yolu projelendirmesi ve planlaması, çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını ve bunların bütünleşik olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle orman yolu planlaması ve inşaatı karmaşık, zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir (Akgül ve diğ., 2018). Bu faktörler, projenin sürdürülebilirliği, ekolojik uyumu (Smith ve Johnson, 2018), bitki örtüsü, habitatlar, biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkileri (Brown, 2019), arazinin topografyası (Matinnia ve diğ, 2018), hidrolojisi (Kastridis, 2020), erozyon riski (Kastridis, 2020), toprak stabilitesi (Jaafari ve diğ, 2017) gibi sıralanabilir. Ayrıca orman yollarının tasarımı ve inşası, ormancılık üretim operasyon planlarının en pahalı ve zaman tüketen kısmını kapsamaktadır (Ghajar ve diğ., 2013; Şentürk ve diğ., 2018). Bu bağlamda, orman yol tasarımı sürecinde yol geometrik standartları ve buna bağlı olarak yukarıda belirtilen faktörleri dikkate alacak şekilde yol güzergâhlarının optimal şekilde elde edilmesi önem taşıyan bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu süreçte, tasarımcının, teknik ve ekolojik gereksinimleri karşılayan ve toplam maliyeti en düşük olan yeterli sayıda alternatif yollar arasından nihai belirlemesi gerekmektedir (Akay ve diğ., 2014). Büyük bir ormanlık alanda yol ağı tasarlamak, birçok uygun alternatifin var olması ve analiz edilmesini gerektirmektedir (Chung ve diğ., 2008).

Bu çerçevede, farklı nitelikte sayısal veri kaynakları (farklı çözünürlüğe sahip sayısal arazi modelleri), yol projelendirme yazımları (CAD tabanlı ve CBS tabanlı) ve farklı çok kriterli karar verme yöntemleri entegre bir şekilde kullanılarak, dikkate alınan yol geometrik standartlarına bağlı olarak optimal yol güzergâhları elde edilebilmektedir.

Dolayısıyla, yukarıda kısaca bahsedilen faktörlerin dikkate alınmasının yanında, yol projelendirmesi sürecinde, maliyet açısından en önemli faktör olan SAM kaynağının seçimi; yol projelendirmesine ait geometrik standartlar, mekânsal ve öznel veriler kullanılarak kural setlerinin tanımlanması ve uygulanmasında kullanılacak olan yol projelendirme yazılımları ve bu kural setleri sonucunda ortaya konulacak alternatif yol güzergâhlarına ait sonuçların değerlendirilmesinde kullanılacak karar destek yöntemleri birbiriyle ilişkili dinamik bir süreç içermektedir. Bu bağlamda söz konusu üç etken aşağıda incelenmiştir.

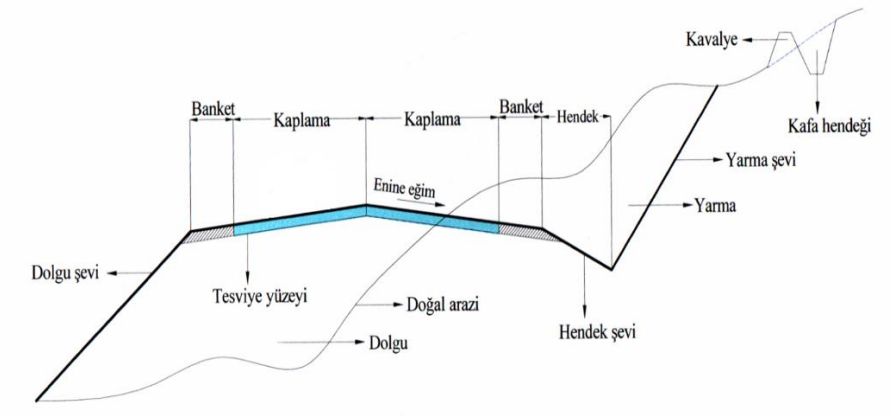
2.1. ORMAN YOLLARI VE GEOMETRİK STANDARTLARI

Yollar, tipleri, şerit genişliği, platform genişliği, yatay kurp yarıçapı, düşey kurp uzunluğu, enine eğim, dever, boyuna eğim, kamulaştırma genişliği gibi geometrik standartlara göre sınıflandırılmaktadır (Kök, 2019) (Şekil 2.1). Orman yolları ise bu sınıflandırmaya göre geçtiği bölge açısından kırsal yollar arasında sınıflandırılabilir. Orman yolları, genel olarak ormancılık faaliyetleri için inşa edilen, düşük trafik hacmi ve geometrik standartlara sahip yollardır. Bu yollar, karayollarına kıyasla daha az yoğun trafik akışını hedefler ve sınırlı sayıda araç tarafından kullanılır. İnşa ve bakım maliyetlerinin düşük tutulması, yapı standartlarının da daha düşük olmasına neden olur. Genellikle engebeli ve zor arazi koşullarında, stabilize yüzeyler, dar virajlar ve eğimli yollardan oluşur. Ayrıca, çevresel etkileri minimize etmek amacıyla daha dar ve doğal bitki örtüsünü koruyacak şekilde tasarlanırlar. Bu nedenlerle, orman yollarının taşıma kapasitesi ve geometrik standartları, karayollarına göre daha düşüktür.



Şekil 2.1: Yolların sınıflandırılması (Kök, 2019)

2008 yılında yayınlanan 292 sayılı "Orman Yolları Planlaması, Yapımı ve Bakımı" adlı tebliğe göre, yıllık taşınacak emval miktarı, yapılış amaçları, trafik yoğunluğu ve seyir halindeki araçların büyüklük ve tonajlarına göre orman yolları üç ana gruba ayrılmaktadır: Ana orman yolu, A tipi tali orman yolu ve B tipi tali orman yolu (Tablo 2.1) (OGM, 2008). Bu yollarda kullanılan en kesitler de farklı geometrik özelliklere sahiptir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Yol enkesit elemanları

Tablo 2.1: Orman yolları geometrik standartları (OGM, 2008)

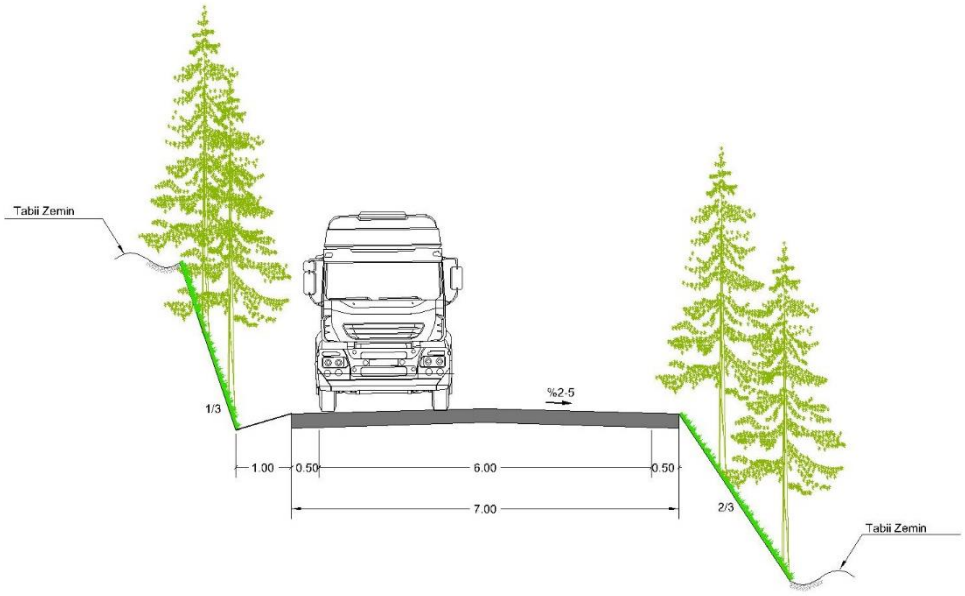
Yolun Tipi	Birimi	Ana Orman Yolu	Tali Orman Yolu				Traktör Yolu
			A TİPİ	B TİPİ			
				SBT*	NB**	EBT***	
Platform genişliği	m	7	6	5	4	3	3,5
Şerit sayısı	adet	2	1	1	1	1	1
Azami eğim	%	8	10	9	12	12	20
Asgari kurp yarıçapı	m	50	35	20	12	8	8
Şerit genişliği	m	3	3	3	3	3	3
Banket genişliği	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Hendek genişliği	m	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	
Üst yapı genişliği	m	6	5	4	3	2	
Köprü genişliği	m	7+(2X0,6)	6+(2X0,6)	5+(2X0,6)		4+(2X0,6)	

*Standartları yükseltilmiş B tipi tali orman yolu

**Normal B tipi tali orman yolu

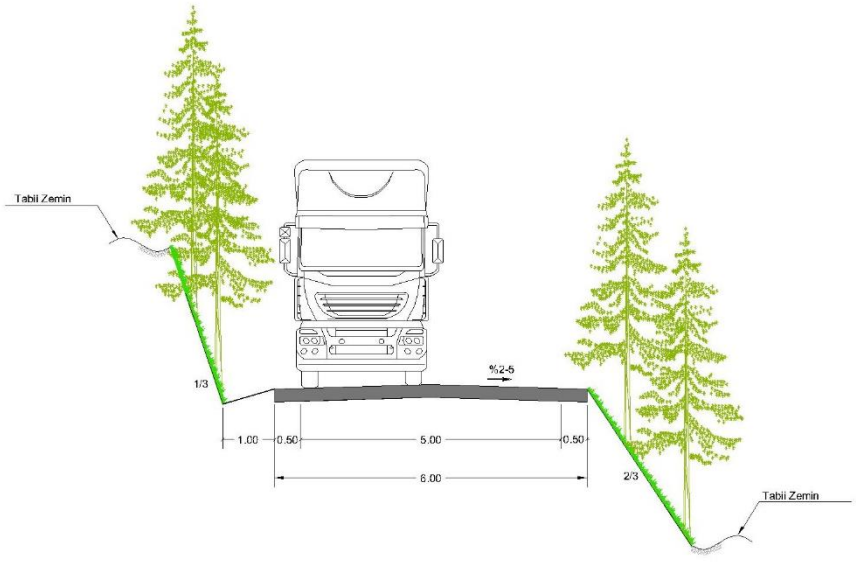
***Ekstrem B tipi tali orman yolu

Ana Orman Yolu: Bu yollar, trafiğe uygun platform genişliği 7 metre ve hendek genişliği 1 metre olmak üzere toplam 8 metre genişliğindedir ve ana dereleri takip eder. Bu yolların inşası için, yıllık taşınacak emval miktarının 50.000 metreküpten fazla olması ve Orman Genel Müdürlüğünden özel izin alınması gereklidir. Üst yapı malzemesiyle 6 metre genişliğinde kaplanacak, asgari kurp yarıçapı 50 metre ve azami eğim %8'dir. Orman yollarında sadece bu tip yollarda, standart trafik işaretlerinin konulması zorunludur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Ana orman yolu (7+1 m)

A Tipi Tali Orman Yolu: Bu yolların trafiğe uygun platform genişliği 6 metre, hendek genişliği 1 metre olup toplam genişliği 7 metredir ve ana dere yollarını takip eder. Yıllık taşınacak emval miktarının 25.000-50.000 metreküp arasında olması ve Orman Genel Müdürlüğünden özel izin alınması gereklidir. Bu yollar, üst yapı malzemesi ile 5 metre genişliğinde kaplanacak, asgari kurp yarıçapı 35 metre ve azami eğim %10'dur (Şekil 2.4)



Şekil 2.4: A tipi orman yolu (6+1 m)

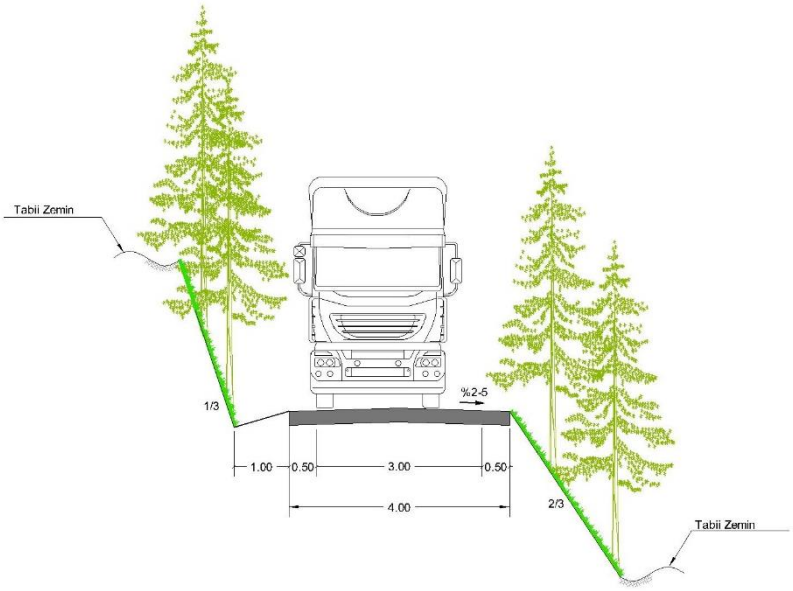
B Tipi Tali Orman Yolu: Bu yollar, trafiğe uygun platform genişliği 3-5 metre, hendek genişliği 0,5-1 metre olup toplam genişliği 3,5-6 metre olan dere ve yamaç yollarıdır. Yıllık taşınacak emval miktarı 25.000 metreküpten azdır. Üretim ve nakliyat mevsimi, taşınacak emvalin cinsi ve arazi yapısı dikkate alınarak, yolların tamamı veya bir kısmı 3-4 metre genişliğinde üst yapı malzemesi ile kaplanacaktır. Asgari kurp yarıçapı 12 metre, azami eğim ise %9 olacak, ancak bazı özel durumlarda kısa mesafelerde %12 eğim uygulanabilecektir. Eğimin %75'in üzerinde olduğu yerlerde ve som kaya bulunan uzun mesafeli yamaçlarda, platform genişliği 3 metre, hendek genişliği 0,5 metre olacak şekilde toplam genişlik 3,5 metredir.

B tipi tali orman yolları, arazinin topografik yapısı, ormancılık faaliyetlerinin yoğunluğu, iş merkezleri ve trafik yoğunluğu gibi etkenler dikkate alınarak üç alt gruba ayrılır:

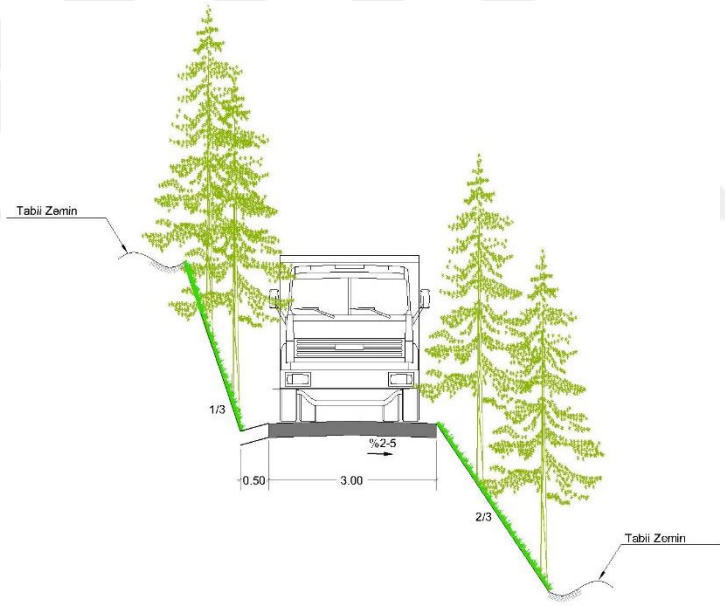
1. **Standartları Yükseltilmiş B-Tipi Tali Orman Yolu (SBT)**: İşletme şefliğinin merkezine veya grup köylerine ulaşımı sağlayan, treyler ve ağır iş makinelerinin rahatça kullanabileceği yollar olup, platform genişliği 5 metre, hendek genişliği 1 metre, azami eğim %9 ve asgari kurp yarıçapı 20 metredir.

2. **Normal B-Tipi Tali Orman Yolu (NBT)**: Platform genişliği 4 metre, hendek genişliği 1 metre, azami eğim genellikle %9, ender olarak %12 olan ve genel orman ulaşımını sağlayan yollardır (Şekil 2.5).

3. **Ekstrem B-Tipi Tali Orman Yolu (EBT)**: Zor arazi şartlarının bulunduğu ve dağ zonuna yakın alanlarda kullanılan yollar olup, platform genişliği 3 metre, hendek genişliği 0,5 metre, azami eğim %12 olan ve kısa mesafelerde uygulanabilen yollardır. Bu yollarda karşılaşma yerleri ve yol sonunda dönüş yerleri yapılacak, uygun yerlere trafik işaretleri konulmalıdır (Şekil 2.6).

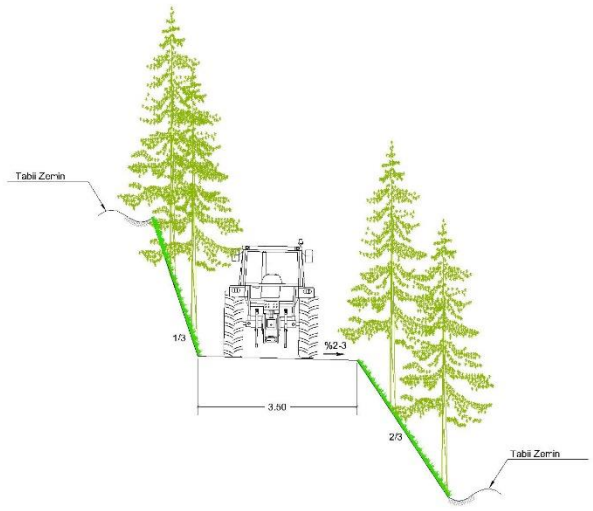


Şekil 2.5: B tipi orman yolu (4+1 m)



Şekil 2.6: Ekstrem B tipi orman yolu (3+ 0,5 m)

Traktör yolları: Traktör yollarında azami eğim, aşağı doğru nakliyatta %16, nadir durumlarda %20 ve yukarı doğru nakliyatta %12 olan, 3,5 metre genişliğindeki, yol sathı, dere tarafına doğru %2-3 eğimli olan yollardır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Traktör yolu (3,5 m)

2.2. SAYISAL ARAZİ MODELİ

Yol projelendirilmesi aşamasında birçok zorluk yaşanabilmektedir. Bunun ana kaynağı, yol geometri ve yol tasarım standartlarına göre yol güzergâhının geçirilmesi sırasında, büyük alanlarda ve özellikle ağaçlık alanların altında (Ferraz ve diğ, 2016) kesin ve güvenilir bilginin elde edilememesi, (Muir ve diğ, 2017, Matinnia ve diğ, 2018) ve kazı-dolgu alan ve hacimlerinin doğru tespit edilememesidir.

Bu bağlamda, yol güzergâhının geçeceği arazinin temsili açısından sayısal arazi modelleri (SAM) önem arz etmektedir. SAM'ların çözünürlüğüne bağlı hassasiyeti modele göre değişkenlik gösterebilmekte ve bu durum da en uygun yol güzergâhı alternatifinin belirlenmesini etkilemektedir.

Orman yollarının inşasında da temel maliyet unsuru genellikle kazı-dolgu işleridir (Akay, A.E., 2006; Najafi ve diğ, 2008) ve dağlık arazilerde toplam inşaat maliyetinin %80'inden fazlasını kazı-dolgu işleri oluşturmaktadır (Stückelberger ve diğ., 2006). Orman yolu inşaatında maliyet

kontrolünü ve bütçelemeyi iyileştirmek için kazı-dolgu hacimlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir (Contreras ve diğ., 2012).

Hafriyat maliyetleri, SAM'ların doğruluğu ve çözünürlüğünün bir fonksiyonu olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Yaklaşık maliyetinin doğru hesaplanması ise SAM'ın çözünürlüğü ve doğruluğu ile bağlantılıdır. Kazı ve dolgu hacimlerinin doğru hesaplanması aynı zamanda proje maliyetinin hesaplanmasında en temel parametredir.

Yol planlamasında kullanılan temel altlıklardan birisi fotogrametrik yöntemle elde edilen farklı ölçeklerdeki topoğrafik haritalardır. Yükseklik bilgisi, topoğrafik bilgiler içerisinde en çok aranan verilerden biridir. Projenin başarısı çoğunlukla yeterli detay içeren ve güvenilir derecede doğruluğa sahip yükseklik verilerine dayanır (Sharma ve Gupta, 2014).

Çoğu yol tasarım çalışması, Total Station (TS) ölçüm ekipmanı gibi geleneksel yöntemlerle elde edilen topoğrafik verilere dayanarak gerçekleştirilir. Ancak, özellikle arazi dalgalı veya dağlık olduğunda TS kullanmanın bazı dezavantajları vardır. Zaman kısıtlamaları nedeniyle, bu ölçüm metodunda sadece sınırlı sayıda nokta ölçülebilir (Muir ve diğ, 2017). Ölçüm istasyonları arasındaki topoğrafik farklar göz ardı edildiğinde, kavisli yolların tasarımı yatay profildeki diklik açısından zor olabilir ve aynı zamanda kazı-dolgu hacminin yanlış tahmin edilmesi de meydana gelebilir (Benyamin ve diğ, 2017). Ayrıca TS'nin giriş yapamadığı veya okuma yapamadığı alanlarda özellikle eksik olan Z verisi nedeniyle SAM verisinde hatalar oluşabilmektedir (Khanal ve diğ, 2020).

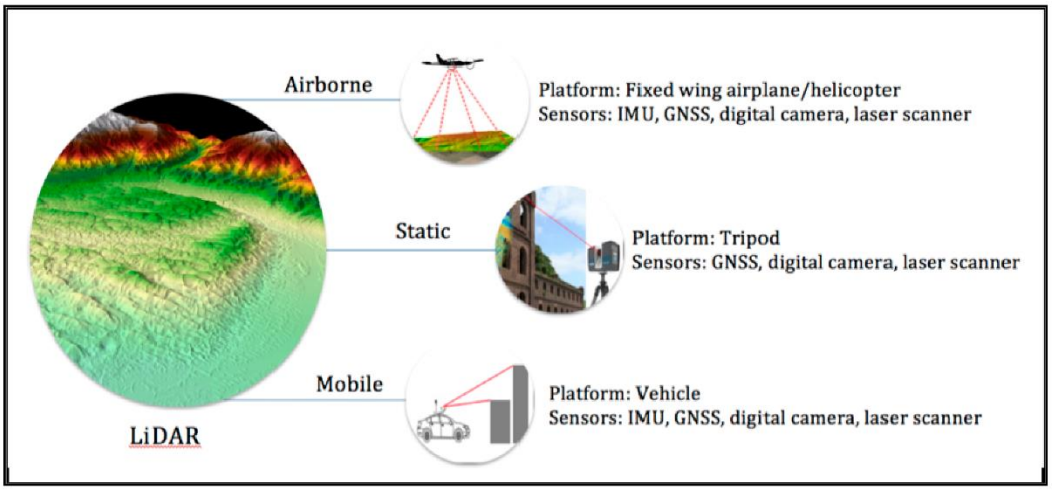
SAM verisi kaynağı olarak farklı veri tipleri kullanılmaktadır. Geleneksel olarak büyük alan çalışmaları için ucuz bir veri kaynağı olan halihazır topoğrafik haritalardan elde edilen eşyükselti eğrileri, hala çoğu ülkede SAM oluşturulmasında kullanılmaktadır (Ardiansyah ve Yokoyama 2002; Li ve diğ., 2017). Ancak geleneksel metotla, SAM üretimi zaman alıcı bir süreçtir (Uysal ve diğ., 2015). Ayrıca, geleneksel olarak topoğrafik harita tabanlı orman yol ağı planlaması, genellikle alternatif orman yol güzergâhlarını yeterince belirleyememekte ve yol geometrisiyle ilgili unsurları da (yatay kurp yarıçapları, boykesit, enkesit sayıları vb.) yeterince doğru bir şekilde belirleyememektedir (Chung ve Sessions, 2001). Bu nedenle, hesaplanan kazı-dolgu miktarları değişkenlik gösterebilmektedir.

Bunun yanında ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ve SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) gibi uzaktan algılama verileri, kazı-dolgu

hacimlerinin hesaplanmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu verilerin kullanımı, topoğrafik detayların daha doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır (Smith ve diğ., 2018). Özellikle, bu verilerin yüksek çözünürlüklü olması, arazinin farklı noktaları arasındaki yükseklik farklarının daha hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır (Lu ve diğ., 2017). ASTER ve SRTM uzaktan algılama verileri, yüzeyin 3 boyutlu modelini oluştururken kullanılan değerli veri setlerini temsil ederler. Örneğin, ASTER SAM verileri genellikle 30 metre çözünürlük sunarken, SRTM SAM verileri, özellikle SRTM1 gibi versiyonlarında daha yüksek çözünürlüklerde bilgi sağlayabilir (Gebreslasie ve Beyene, 2016). Bu veriler, alanın genel topoğrafik yapısını hızlı bir şekilde değerlendirmeyi ve dolayısıyla kazı dolgu hacimlerinin hesaplanmasında zaman ve kaynak tasarrufu sağlamayı mümkün kılar. Ayrıca, Gebreslasie ve Beyene (2016) tarafından yapılan bir çalışma, SRTM SAM verilerinin dağlık arazide RTK-GPS ile ölçülen verilerle karşılaştırıldığında yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, inşaat, madencilik ve çevre mühendisliği gibi alanlarda, ASTER ve SRTM gibi uzaktan algılama verilerinin kullanımı, kazı dolgu projelerinin planlanması ve izlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Son 20 yılda SAM tabanlı çalışan bilgisayar destekli tasarım sistemleri, yüksek çözünürlüklü SAM verilerinin ortaya çıkmasıyla daha yaygın kullanılmaya başlamıştır. Yukarıda kısaca bahsedildiği üzere SAM veri çözünürlüğü projelendirmedeki hassasiyeti artırmaktadır. Bu aşamada geniş alanlarda hızlı ve etkin bir şekilde SAM üretimi aşamasında LiDAR (Light Detection and Ranging) tabanlı veri setlerinin kullanımı günümüzde öne çıkmaktadır (Akay ve diğ., 2009; Yurtseven, 2019).

LiDAR verileri hem gündüz hem de gece ve bulutlu hava koşullarında elde edilebilir (Dowman, 2004). LiDAR sistemleri, kuruldukları platformlar temel alınarak üç grupta toplanabilir: havasal (airborne) LiDAR sistemleri (Airborne LiDAR System-ALS), yersel LiDAR sistemleri – (Terrestrial LiDAR System-TLS) (Polat ve Uysal, 2016) ve mobil LiDAR sistemleri (Mobile LiDAR System-MLS). Havasal LiDAR sistemleri uçak, helikopter gibi platformların yanında insansız hava aracı (İHA) platformlarına da entegre olarak çalışabilmektedir (Şekil 2.8). Havasal sistemlerden uçak ve/veya helikopter gibi platformlara entegre edilen LİDAR sistemlerinden uçuş yüksekliğine ve LiDAR sistemine bağlı olarak metrekarede ortalama 5-30 nokta, İHA sistemlerinden ise metrekarede ortalama 1000-2000 noktadan oluşan nokta bulutu elde edilebilmektedir.



Şekil 2.8: Kullanım şekline göre LiDAR platformları

Farklı çalışmalarda, yüksek çözünürlüklü LiDAR'dan türetilen SAM'a dayalı olarak kurulan modelde araziyi gerçeğe en yakın şekilde temsil edecek modeller oluşturularak, doğru kübaj tahminleri sağlandığı belirtilmiştir (Contreras ve diğ.,2012). SAM üretimi ve/veya kullanılacak sayısal altlığın seçimi aşaması proje tasarımını da doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Najafi ve Samani., 2010). Bu nedenle bu çalışmada da havasal LiDAR veri seti kullanılmıştır.

2.3. YOL PROJELENDİRME YAZILIMLARI

Orman yollarının elle planlanması, işgücü ve zaman açısından yoğun bir süreç gerektirmektedir (Anderson ve Nelson, 2004). 1980'li yıllardan itibaren CAD yazılımlarının yaygınlaşmasıyla beraber başta mimarlık, mühendislik amacıyla kullanılan söz konusu yazılımlar yol projelendirmesinde de kullanım alanları bulmuştur. Ancak, yol planlaması ve tasarımı, bilgisayar yazılım teknolojisinin ilerlemesiyle giderek daha karmaşık hale gelmiştir. Bu alanda kullanılan çeşitli programlar arasında Advanced Road Design, AutoCAD Civil 3D, Bentley InRoads, Bentley MXROAD, Carlson Civil, Diolkos, HighRoad, NetCAD, Plateia, RoadEng gibi yazılımlar bulunmaktadır. Bu yazılımlar, yol altyapısı tasarımını destekleyen farklı özelliklere sahiptir ve mühendislerin, mimarların ve planlamacıların yol projelerini daha verimli bir şekilde oluşturmalarına yardımcı olur. Yol planlama yazılımları, topoğrafik verilerin işlenmesinden, yol geometrisinin tasarlanmasına ve projenin detaylı analizine kadar geniş bir yelpazede işlevsellik sunmaktadır. Bu yazılımlar, mühendislik projelerinin, geleneksel elle çizime göre daha hızlı, daha doğru ve daha ekonomik bir şekilde tamamlanmasına katkıda bulunmaktadır.

CAD tabanlı yazılımlar, genellikle 2B veya 3B çizimler şeklinde inşaat planlaması için temel bir referans sağlar (Heesom ve Mahdjoubi, 2004). CAD, özellikle yapı bileşenlerinin tasarımı ve modellemesi üzerine odaklanır ve genellikle geometrik bilgileri içerir.

CBS yazılımları ise sözel veri ile mekânsal veri setlerinin bir arada yorumlanması ve geniş alanlarda haritalama amaçlı kullanılan yazılımlardır. Ormanlık alanlarının planlanması, geliştirilmesi zor ve zaman alıcı faaliyetlerdir. CBS yazılımları ile, alternatif güzergâhlar dikkate alınmakta ve böylece zaman kaybı önlenmekte ve daha güvenilir tasarımlar elde edilebilmektedir. (Rogers, 2005). Birçok yeteneği sayesinde (örneğin, geleneksel yöntemlere göre daha düşük maliyetlerle ve daha yüksek hız ve doğrulukla veri işleme), CBS, orman yolu ağı planlamasında giderek daha fazla kullanılmaktadır (Shahsavand ve diğ., 2011; Naghdi ve diğ., 2012; Meignan ve diğ., 2013).

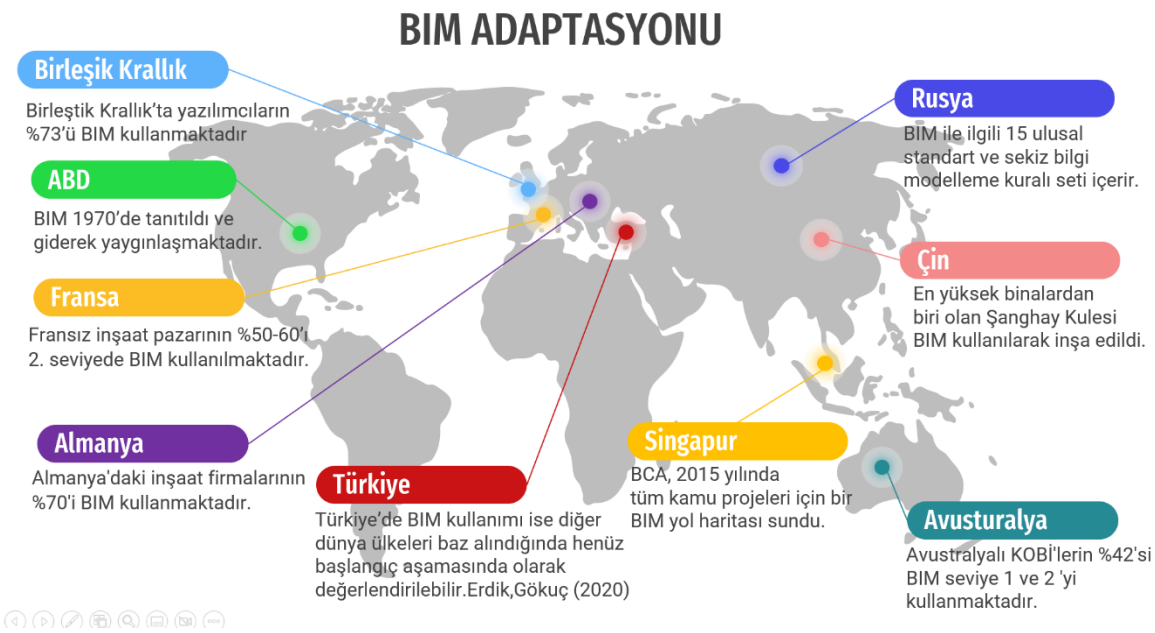
2.4. BIM MODELLEMESİ

Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modelling) (BIM), inşaat yönetimi aracı (Hartmann ve diğ., 2012; Lu ve diğ., 2013), inşaat yönetim süreci (Chen ve Luo, 2014) ve inşaat yönetim sistemleri (Rokooei, 2015) olarak tanımlanmıştır. BIM, genellikle mimarlık-mühendislik-inşaat alanında çeşitli faydalar sağlayan, inşa edilmiş bir yapı için bilgi yaratan ve yöneten bir süreçtir. Bu süreç, planlama ve tasarımdan inşaat ve operasyonlara kadar, inşa edilmiş bir varlığın yaşam döngüsü boyunca dijital tanımlamalar için 3 boyutlu görselleştirme ve bilgilerini içerir (Hallén ve diğ., 2023).

BIM bir tasarım programı değildir; aksine, tasarımın oluşturulup yönetildiği gerekli koordinasyonun ve verilerin bütünüdür. BIM yazılımları, tasarımı geliştirmek, projeyi görsel olarak modellemek ve proje bilgilerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Karagöz, 2019). Bu kapsamlı yaklaşım, projelerdeki verimliliği ve doğruluğu artırmaktadır.

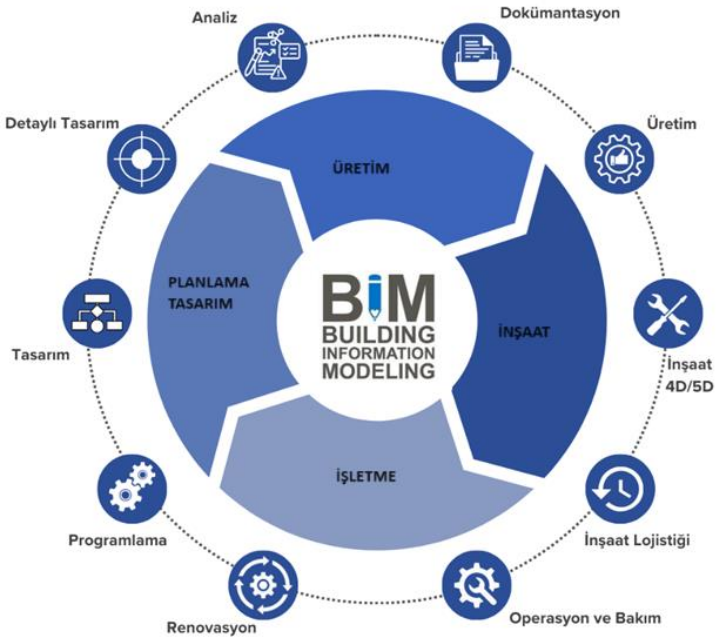
BIM terimi ilk olarak 1970'li yılllarda Profesör Charles M. Eastman tarafından ortaya atılmıştır (Eastman, 1975). Ancak, ilk BIM yazılımlarının ortaya çıkmasıyla birlikte Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde 2003 yılından itibaren kamu projelerinde BIM kullanımı teşvik edilmiştir. 2016 yılı itibariyle ise ABD'de kamu projelerinin %75'inde BIM kullanıldığı tahmin edilmektedir (Smith, 2014). Çin, 2020 yılına kadar büyük inşaat projelerinin %90'ında BIM kullanımını teşvik eden politikalar uygulamıştır (Zhou ve diğ., 2019). Avrupa'da ise bu konuda Almanya ve Birleşik Krallık öncülük etmektedir. Birleşik Krallık, 2016 yılından itibaren

merkezi kamu projelerinde minimum BIM Seviye 2 kullanımını zorunlu kılarak büyük bir adım atmıştır. Bu politika, 2020 yılına kadar Birleşik Krallık'taki inşaat projelerinin %80'inde BIM kullanımını sağlamıştır (Eadie ve diğ., 2013). Almanya'da ise herhangi bir sınırlama veya zorunluluk getirilmemesine rağmen kullanım oranları %70'e ulaşmıştır (Şekil 2.9). Türkiye'de, BIM kullanımı diğer dünya ülkelerine kıyasla henüz başlangıç aşamasındadır. Ancak, yerli firmaların uluslararası projelerde BIM kullanımına artan bir ilgi gösterdiği gözlemlenmekte bu da işveren taleplerine yönelik bir tepki olarak ortaya çıkmaktadır (Erdik ve Gökuç, 2020).



Şekil 2.9: Ülkelere göre BIM adaptasyon süreci

BIM yazılımı, farklı fiziksel altyapıları planlayan, tasarlayan, inşa eden, işleten ve bakımını yapan profesyoneller, işletmeler ve kamu kurumları tarafından kullanılır (El-Diraby ve diğ, 2017) (Şekil 2.10). Buna ek olarak, BIM, yapı sistemlerinin fiziksel ve işlevsel özelliklerinin dijital temsillerinin oluşturulması ve yönetilmesi süreçlerini ve karmaşık yapı sistemlerinin yönetimini içermektedir (Kalach ve diğ, 2018).



Şekil 2.10: BIM çalışma prensibi

Yukarıda kısaca bahsedildiği üzere BIM yazılımları, karmaşık mühendislik disiplinleri tarafından alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. BIM, modern inşaat sektöründe kilit bir rol oynar ve çeşitli projeler arasında bilgi alışverişini etkin bir şekilde yönetmeyi amaçlayan bir süreç olarak işlev görmektedir (Cartenì ve diğ., 2018). Bu aşamada, BIM ile CBS bütünleşik olarak kullanılması önem taşımaktadır. CBS metodolojilerinin BIM ile entegrasyonu, yalnızca inşaat varlıklarıyla ilgili iş birliğine dayalı iletişimi artırmakla kalmaz, aynı zamanda inşaatın mekânsal bağlamının yönetimi ve görselleştirilmesini de artırır (Pan ve Mao, 2022). CBS ve BIM ortamlarındaki veri entegrasyonu süreci, çeşitli özel dosyaların, bilgi depolarının ve mevcut veri tabanlarının çeşitliliği tarafından zorlanmaktadır (Akob ve diğ., 2019). Altyapı planlamasında BIM'in benimsenmesi artarken, önemli zorluklar hala mevcuttur. Bu durum, yüksek etki faktörlü bilimsel yayınlarda artan araştırmaları açıklayabilmektedir (Carteñi ve diğ., 2018).

Hafriyat hesaplama sürecinde ise çok sayıda veri formu etkili olduğundan (Göktepe ve Lav, 2003), bazı araştırmacılar büyük miktarda veriyi hafriyat hesaplamasına dahil etmek için CAD/BIM teknolojilerine yönelmiştir (Kim vd., 2014; Yabuki ve Shitani, 2005). Ancak CBS verilerinin hafriyat hesaplamalarında kullanılmasına yönelik çok fazla araştırma yapılmamıştır.

Yukarıda kısaca özetlendiği üzere, BIM'in kullanımları ve faydaları geniş bir şekilde incelenmiş ve inşaat sektöründe çokça test edilmiştir (Mohamed ve diğ., 2020; Tang ve diğ, 2020).

Başlangıçta bina gibi bütünleşik yapılar için kullanılan BIM yazılımları, günümüzde aşağıdaki alanları da içeren altyapı ölçeğinde projelerde de kullanılmaktadır (Cheng ve diğ., 2016):

- Ulaşım altyapıları: Yollar, demiryolları, köprüler, tüneller ve toplu taşıma merkezleri (havaalanları, limanlar ve limanlar);
- Enerji altyapıları: Güç üretim tesisleri (nükleer, rüzgâr, gelgit), petrol ve gaz (depolama/distribution terminalleri, rafineriler, kuyular) ve madencilik;
- Hizmet altyapıları: Elektrik, gaz, su ve kanalizasyonun taşınması ve çıkarılması için ağlar/borular;
- Çevresel altyapı: Barajlar veya setler gibi sel ve kıyı savunması yönetimi

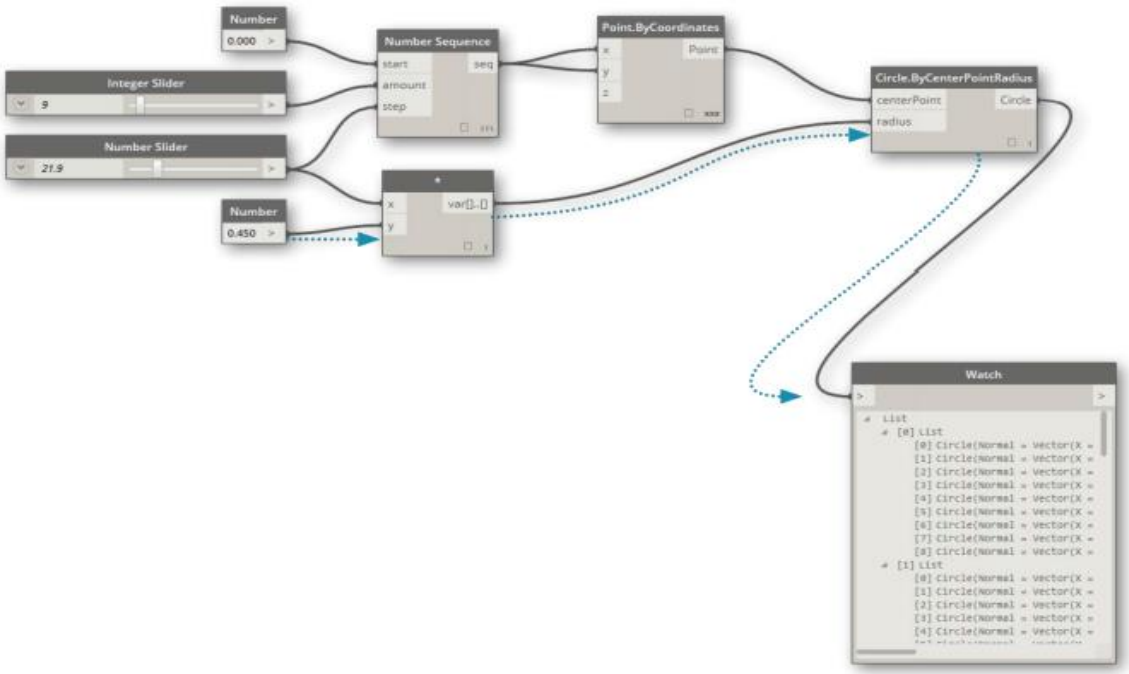
Altyapı tasarımı, bina tasarımından daha karmaşıktır. Bununla birlikte, BIM, yol altyapı projelerinde yeni bir konudur (Castañeda ve diğ., 2021). Oluşturulan veri tabanı CBS içinde kullanılan geometrik varlıkların (noktalar, çizgiler ve poligonlar) ve BIM için parametrik nesnelerin grafik temsiliyle bağlantılı bir veritabanı haline getirilmesini içermektedir (Barazzetti ve Bangi, 2017; Fanning ve diğ., 2015). Yol altyapı projelerinde BIM kullanımı genellikle geometrik yol tasarımına odaklanmıştır; burada çabalar, yol projelerinin geometrisini iyileştirmeye, otomatikleştirmeye ve optimize etmeye yöneliktir (Biancardo ve diğ., 2020; Bongiorno ve diğ., 2019).

Chan ve diğ, (2019) tarafından yapılan çalışmada, BIM kullanılarak analiz edilen yol projelendirme çalışmalarında en sık belirtilen dört fayda aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Yol tasarımında iyileştirme,
- Tasarım hatalarının azaltılması,
- Doğru, entegre ve detaylı bilgilerin elde edilmesi,
- Proje verilerinin ve ortamının daha iyi görselleştirilmesi paydaşlar arasında daha iyi koordinasyon ve iş birliği.

Tabi ki tüm bu sürecin yönetilmesinde, proje limit-tasarım parametrelerinin ve proje kısıtlamalarının, BIM ortamına tanıtılması gerekmektedir. Bu amaçla Autodesk tarafından Dynamo adında kullanıcıların Revit ve diğer Autodesk ürünleri ile etkileşim kurmasını

sağlayan, ileri teknolojiye sahip ücretsiz bir açık kaynak programlama aracı geliştirilmiştir. Dynamo, hem programlama bilgisi olmayan hem de programlama bilgisine sahip olan kullanıcılar için erişilebilir olmayı amaçlayan görsel bir programlama aracı olarak tasarlanmıştır (Dynamoprimer, 2016) (Şekil 2.11). Kullanıcılar, görsel olarak betik yazma, özel mantık parçaları tanımlama ve çeşitli metin tabanlı programlama dillerini kullanarak betik yazma yeteneği elde ederler. Dynamo'nun en bilinen özelliği, Autodesk Revit dosyalarıyla çalışabilmesi ve Revit'e eklenti olarak entegre edilebilmesidir (Dynamoprimer, 2016).



Şekil 2.11: Örnek Dynamo script arayüzü

Dynamo'nun kullanım amacı, kullanıcıların Revit'teki iş akışlarını otomatikleştirerek ve kişiselleştirerek verimliliklerini artırmaktır. Dynamo, Revit API'sini öğrenmek zorunda kalmadan kullanıcıların Revit için otomasyon rutinleri oluşturmalarına olanak tanır ve bu da öğrenme eğrisini önemli ölçüde azaltır (Dynamoprimer, 2016). Bu araç, kullanıcıların model elemanlarını ve parametrelerini sistematik olarak manipüle etmelerini sağlar, bu da geleneksel Revit araçlarıyla mümkün olmayacak işlemleri gerçekleştirmelerine olanak tanır (Dynamoprimer, 2016).

Dynamo'nun avantajları şu şekilde sıralanabilir (Boye ve Wilcock, 2023):

- Dynamo, görsel programlama kullanarak mantık rutinleri oluşturmayı sağlar ve bu, kapsamlı bir programlama deneyimine sahip olmayan kullanıcılar için kullanımı ve otomatik iş akışları oluşturmayı kolaylaştırır.

- Dynamo ayrıca, CAD, MathCAD, Excel, SAP2000, PLAXIS ve diğer üçüncü taraf araçlarla arayüzler oluşturma yeteneği sunar ve ileri düzey kullanıcılar için Python ve C# programlama dilleri ile entegre edilebilir, böylece daha güçlü özel araçlar geliştirilmesine olanak tanır

Dynamo, kullanıcıların verimliliklerini artırmalarına ve daha yenilikçi tasarım çözümleri geliştirmelerine yardımcı olan güçlü bir araçtır. Bu özellikleri ve avantajları ile Dynamo, modern mimarlık ve mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır.

Literatür araştırmasına göre yol projelendirilmesi amaçlı BIM yazılımları kullanılarak yapılan önde gelen çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

Chong ve diğ., tarafından 2016 yılında yapılan çalısmalar altyapı projelerinde yol güzergâhının farklı parametrelere göre belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, BIM yazılımı aracılığıyla yol güzergâhı alternatifleri oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, farklı parametrelerin yol güzergâhı üzerindeki etkisi belirlenmiş ve en uygun güzergâhlar tespit edilmiştir. Bu çalışma, BIM'in altyapı projelerinde kullanımının önemini vurgulayarak, tasarım sürecini iyileştirmek ve maliyetleri azaltmak için etkili bir araç olduğu vurgulanmıştır.

Diaz ve diğ, 2019 yılında yaptığı çalışmada, yol altyapı projelerindeki en büyük etkiye sahip iş kalemlerinin malzeme ve atık taşımacılığı, toprak hareketleri ve yol yüzeyinin şekillendirilmesi, temel ve alt tabaka işleri olduğunu belirtmiştir. BIM metodolojisiyle ile yapılan proje süresinde toplamda 24 gün azalma olduğu, dolayısıyla, maliyetin %93,61'inin dolaylı değişken maliyetine denk geldiğini vurgulanmıştır.

Zhao ve diğ., tarafından, 2019 yılında yapılan başkaca bir çalışmada ise karayolu planlama ve tasarım aşamasında karmaşık bir süreç olan yol güzergâhının geçirilmesi için BIM ve CBS entegrasyonu kullanılmıştır. En uygun güzergâhın optimize edilmesi için genetik algoritmalara dayanan bir model geliştirilmiştir. Bu model BIM ve CBS sistemleri arasında veri etkileşimini sağlamakla birlikte ayrıca entegrasyon modeli ile optimizasyon algoritması arasında veri alışverişine de olanak sağlamıştır. Modelin ayrıca, gerçek bir karayolu projesine uygulanarak

etkinliği doğrulanmıştır. Karayolu projesinin ve çevresinin görselleştirme modelinin, kapsamlı bir sanal ortam sunarak projenin etkili bir şekilde planlanmasına ve tasarlanmasına yardımcı olduğu, bunun da tasarım hatalarını ve yanlış anlaşmaları azaltmaya, dolayısıyla proje risklerini azaltmaya yardımcı olduğu vurgulanmıştır.

Barazzetti ve diğ, 2020'de yaptığı çalışmada ise BIM ve CBS entegrasyonu üzerine odaklanılarak, akıllı yol uygulamalarında BIM'in kritik rolü incelenmiştir. Bu rol, tasarım ve inşaat aşamalarıyla sınırlı kalmayıp, trafik izleme, otonom araç navigasyonu, yol durumu değerlendirmesi ve sürücülere gerçek zamanlı veri iletimi gibi alanları da içermektedir. Çalışmada, LiDAR aracılığıyla toplanan nokta bulutları, mevcut durumun yakalanmasında güçlü bir çözüm olarak değerlendirilmiştir. Temel yol geometrisini içeren CBS, katmanları sağlayan ve parametrik BIM nesnelerine dönüştürülen bir yapı sunulmuştur. Önerilen sistem, birden fazla öneriye dayalı bir BIM-CBS entegrasyonu yapısıyla sunulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, entegre BIM-CBS için giriş verileri, mevcut kartografik katmanlar veya LiDAR verilerini işleyebilen algoritmaların ürettiği çıktılar olması nedeniyle entegrasyon oluşturulmasını daha esnek hale getirmekte ve nokta bulutu işleme için belirli algoritmaların kullanım kısıtlarını kaldırdığı belirtilmiştir.

Kim ve diğ., tarafından 2021 yılında İHA tabanlı elde edilen nokta bulutu verileri ile BIM kullanımının hafriyat incelemesi ve planlama süreçlerine olan katkıları incelenmiştir. BIM yazılımı sayesinde, yapılan hafriyatın tasarımında ve planlanmasında daha doğru ve detaylı veriler elde edilmiştir. Bu, inşaat öncesi arazi modelinin daha hassas bir şekilde oluşturulmasını ve tasarım hatalarının tespit edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, BIM'in entegre kullanımıyla, hafriyat ekipmanı işletme planları daha verimli bir şekilde oluşturulmuş ve uygulanmıştır. Çalışmada, BIM'in altyapı projelerindeki rolünün önemini vurgulayarak, tasarım sürecini iyileştirmek ve maliyetleri azaltmak için etkili bir araç olduğunu belirtilmiştir.

Han ve diğ., 2023 yılında yaptığı çalışmada BIM kullanılarak sürüş güvenliği ve karayolu inşaat maliyetlerini göz önünde bulunduran bir optimizasyon tasarım çerçevesi önerilmiştir. Hızlı ve güvenilir bir parametrelendirme yöntemi, karayolu güzergâhı için geliştirilmiştir. BIM tekniği, modelleme ve zemin çalışmaları istatistikleri için kullanılmıştır. Sürüş güvenliğini nicelendirmek için MATLAB yazılımı kullanılarak otomatik sürüş simülasyonu yapılmış ve NSGA-II, optimal hizalamayı çözmek için kullanılmıştır. Önerilen BIM tabanlı optimizasyon

yöntemi sonuçları, uzman tasarım sonuçlarıyla karşılaştırıldığında %6,6 daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

2.5. ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri birden fazla alternatif ve bu alternatiflere ilişkin bir dizi kriter bulunan durumlarda, amaçlanan hedefe en uygun sonuca ulaşmayı kolaylaştıran, karar verme sürecinde, farklı kriterlere sahip benzer sonuçların kendi içinde değerlendirilmesinde kullanılan etkin bir değerlendirme aracıdır (Demircioğlu ve Coşkun, 2018). Bu bağlamda, ÇKKV yöntemleri karar vericilere performans sıralamaları ve ilgili kriter ağırlıkları hakkında kesin bilgi sağlamaya yardımcı olarak yirmi yılı aşkın süredir aktif bir araştırma alanı olmuştur (Ishizaka ve Siraj, 2018).

ÇKKV yöntemleri, alternatifler, kriterler ve kriter ağırlıkları olmak üzere üç temel unsurdan oluşmaktadır. Alternatifler, karar vericilerin farklı seçenekler arasından seçim yapacakları yolları temsil eder. Kriterler ise alternatiflerin seçiminde etkili olan faktörlerdir. Kriter ağırlıkları ise her bir kriterin önem derecesini belirtir (Ersoy, 2022).

ÇKKV metotlarında ise iş akışı genel olarak kriterlerin seçimi, normalize edilmesi, kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin sıralanması/seçilmesi şeklinde uygulanmaktadır (Demir ve diğ, 2021) (Şekil 2.12). ÇKKV yöntemleri özellikle son yirmi yılda en hızlı büyüyen karar destek alanlarından birisi haline gelmiştir. Bu nedenle de birbirinden farklı özellik ve çözüm prensiplerine sahip farklı yöntemler geliştirilmiştir.



Şekil 2.12: ÇKKV sürecinde yapılan işlemler

Kriterlerin ağırlıkları, karar verme sürecinin sonucunu etkileyen ve öngörülemeyen sonuçlara yol açabilen son derece önemli ve hayati unsurlardır. Kriterler, alternatiflerin sıralanmasında önemli bir rol oynar (Singh ve Pant, 2021). Bu bağlamda literatürde çok sayıda SMART; AHP,

SWİNG, SIMOS, DEMATEL, FUCOM, ANP gibi sübjektif ağırlıklandırma yöntemleri, ENTROPY, CRITIC, CILOS gibi objektif ağırlıklandırma yöntemleri ile karma (bütünleşik) yöntemler yer almaktadır (Bobko ve diğ., 2007; Ginevicius ve Podvezko, 2005; Jahan ve diğ., 2012; Odu, 2019).

Karar verme problemlerinde asıl amaç ise alternatifler arasından en iyisinin seçilmesi, alternatiflerin sıralanması ve sınıflandırılmasıdır (Mohammadi ve Rezaei, 2020). Seçim problemlerinde kullanılan teknikler, bir dizi alternatif arasından en faydalı olanın belirlenmesine yardımcı olurken, sınıflama teknikleri alternatifleri gruplandırırken, sıralama teknikleri ise alternatifler arasında bir sıralama yapar (Dalbudak ve Rençber, 2022). Seçim problemlerinde TOPSIS, ELECTRE, MACBETH vb. teknikler, sınıflandırma problemlerinde AHP; PROMETHEE, TOPSIS vb teknikler, sıralama problemlerinde ise ARAS, WASPAS, MOORA vb teknikler kullanılmaktadır.

Her yöntemin kendine özgü kapsamı ve performansı bulunmakta, seçilen yöntem kullanıcı tarafından karar verilmektedir. Tez kapsamında ÇKKV yöntemlerinden, kriter ağırlıklandırması için kriterler arasındaki çatışma ve bilgi içeriğini objektif olarak yorumlayan CRITIC yöntemi, sıralama için ise basit, esnek ve güçlü bir yöntem olan MOORA yöntemi kullanılmıştır.

İlk olarak 1995 yılında Diakoulaki tarafından ortaya konulan CRITIC yöntemini diğer yöntemlerden farklı olarak, uzman görüşlerinden yola çıkılarak elde edilen öznel bir yaklaşım yerine, kriterlerin standart sapmalarının ve kriterler arası korelasyonun birlikte kullanıldığı objektif bir ağırlıklandırma yöntemidir (Yılmaz ve Harmancıoğlu, 2010) (Tablo 2.2).

Bu yaklaşımda, her kriterin çelişkili yoğunluğunun yardımıyla, standart sapma olarak bilinen, kriterlerin önemi değerlendirilebilir. Buna karşılık, kriterler arasındaki tartışma, aralarındaki korelasyon katsayısı olarak ele alınır. CRITIC yaklaşımının temeli, karar verme sorunlarının inşasında karşıtlık yoğunluğudur (Diakoulaki ve diğ., 1995).

Tablo 2.2: CRITIC ağırlıklandırma yönteminin avantaj ve dezavantajları

Avantaj	Dezavantaj
Karar vericilerin müdahalesine ihtiyaç duymayan en objektif metotlardan birisidir.	Yöntem kriterlerin türünü dikkate almaz.
Yöntem temel istatistik işlemleri içermektedir.	Yöntem, başlangıç verilerinin yalnızca bazı özelliklerini gösterir.
Diğer yöntemlere göre daha basit hesaplamalar içermektedir.	
Algoritma biçimine kolay bir şekilde dönüştürülebilir.	

Kriter sıralamada 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 çözümleme, basitlik derecesi, kolay anlaşılabilir olması ve esnekliği açısından öne çıkmakla beraber tüm öznitelikleri ve bunların göreli önemini dikkate almaktadır (Sarkar ve diğ, 2015) (Tablo 2.3). Literatürde MOORA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş çalışmalar incelendiğinde, seçme ve sıralama yöntemleri içerisinde en başarılı yöntemler arasında yer almaktadır (Çelikbilek ve Özdemir, 2020).

Tablo 2.3: Bazı sıralama yöntemlerin karşılaştırılması (Sakar ve diğ, 2015)

ÇKKV yöntemi	Hesaplama zamanı	Basitlik Derecesi	Açıklık	Esneklik
MOORA	Az	Basit	İyi	Çok yüksek
EVAMIX	Orta	Orta	Kritik derecede	Düşük
ELECTRE	Orta	Orta	Kritik derecede	Düşük
TOPSIS & AHP	Yüksek	Orta	İyi	Yüksek
VIKOR	Az	Basit	Çok iyi	Orta
MADM	Orta	Orta	Kritik derecede	Yüksek
COPRAS	Az	Basit	Çok iyi	Yüksek
SAW	Az	Basit	İyi	Yüksek

Literatür araştırmasına göre yol projelendirilmesi amaçlı olarak ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılan bir kısım çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

Mohammadi Samani ve diğ. 2010 yılında orman yollarının dağlık alanlarda planlaması amacıyla yaptığı çalışmada, CBS ve AHP yöntemini kullanmıştır. Orman yolu planlaması için en önemli katmanlar arasında eğim, toprak tipi, jeoloji, hidrografik ağlar, yönler, hektar başına ağaç hacmi m^3, ağaç türü ve rakım haritaları olduğu vurgulanmıştır. Bu katmanlar belirlenmiş ve ardından uzman düşüncesi ve AHP yöntemi kullanılarak çalışma alanı, orman yol yapımı

için çok iyi, iyi, orta, kötü ve daha kötü olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Daha sonra, hazırlanan AHP haritasında iki yeni varyant tasarlanmıştır. Birinci varyant geleneksel yöntem kullanılarak belirlenmiş ve ikincisi Pegger yol planlama yazılımı uygulanarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, AHP ve CBS'nin eşzamanlı olarak kullanılmasının orman yol ağı planlamasında uygun bir yöntemin tanıtılmasının sağlanabileceğini göstermektedir.

Sadeghi ve diğ., 2010 yılında yaptığı çalışmada CBS yol ağı maliyet fonksiyonu oluşturmak için ÇKKV metodoloji ele alınmıştır. Bu kapsamda, öncelikle, niceliksel ve niteliksel özelliklere sahip ek gerçekçi değişkenler dikkate alınmıştır. Bunlar, iklim, turistik görülecek yer bilgisi, yol tipi vb. ikinci olarak, bu değişkenler AHP kullanılarak bir ÇKKV ile birleştirilmiştir. Geliştirilen modeller İran'ın kuzey bölgelerinde uygulanmış ve tek boyutlu maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen rotalardan daha doğru olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, yol planlamasında kullanılan ÇKKV'lerin etkili bir şekilde uygulanmasıyla daha doğru ve optimize edilmiştir.

Çalışkan tarafından 2017 yılında yapılan bir çalışmada ise, orman yolu tasarımının sürdürülebilir yönetimi için önemli olan çevresel etkilerin dikkate alınması üzerine odaklanılmıştır. CBS ve mekânsal ÇKKV tekniklerinden biri olan İdeal Çözüme Benzerlikle Sıralama için Mekansal Bütünleşik Teknik (S-TOPSIS) kullanılarak çevresel etkilerin entegrasyonu sağlanmıştır. Bu yöntem, mevcut orman yolu güzergâhı (CFOR) ile çevre dostu bir orman yol güzergâhı (ESFOR) belirlenmesini sağlamak üzere uygulanmıştır. Çalışmada çığ, nehir, toprak, jeoloji ve eğim gibi beş çevresel kriter, analiz için kullanılmıştır. Sonuçlar, CFOR ile ESFOR arasındaki uzunluk farkının hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışma, mekânsal ÇKKV yönteminin dağlık alanlarda çevresel duyarlı orman yol tasarımı için daha doğru ve etkili bir yaklaşım olduğunu göstermiştir.

Bhandari ve Nalmpantis tarafından 2018 yılında yapılan başkaca bir çalışmada da kırsal yol projelerinin değerlendirmesi için çeşitli ÇKKV yöntemleri (TOPSIS, MOORA ve PROMETHEE) arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Uzman anketi ile belirlenen kriterler ve ağırlıklar kullanılarak, dört farklı kırsal yolun saha araştırmasıyla elde edilen karar matrisi üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Bu veriler, sürdürülebilir göstergelerle kırsal yol projelerinin değerlendirilmesi için çeşitli çok kriterli analiz yöntemlerinin başarılı bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir. Sonuçlar, performans ölçütlerinin değerine, ağırlıkların belirlenmesine, normalleştirmeye ve toplama prosedürlerine bağlı olarak değişmektedir.

Ayrıca, AHP gibi sağlam yöntemlerle türetilen ağırlıkların kullanıldığı ve kırsal yolların kriterlerinin hassas ölçümünün yapıldığı çok kriterli yöntemlerin (TOPSIS, MOORA ve PROMETHEE) genel olarak benzer sıralamaları verdiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, kırsal yol projelerinin etkili bir şekilde değerlendirilmesi için ÇKKV'lerin uygulanabilirliğini ve etkinliğini vurgulamaktadır.

Sekulic tarafından 2019 yılında İsveç'te yapılan bir tezde, optimal yol güzergâhının belirlenmesi amacıyla, CBS ve ÇKKV yaklaşımını kullanarak çok kriterli mekânsal tabanlı bir model geliştirilmiştir. Kriter ve tema ağırlıklarını belirlemek ve bunların birleşimini yapmak için AHP ve ağırlıklı toplam yöntemleri kullanılmıştır. En az maliyetli yol analizi, yol hizalamalarını üretmek için kullanılmıştır. Tema tercihine bağlı olarak, ekonomik, çevresel, sosyal ve eşit olmak üzere 4 yol hizalaması üretilmiştir. Çalışmada, optimal güzergâh planlanması için ÇKKV yönteminin başarılı bir şekilde araştırılması, geliştirilmesi ve uygulanması vurgulanmıştır. Sonuçlar, sosyal amaçlı planlanan yolun, ÇKKV sıralama sonuçlarına göre, ekonomik, çevresel, sosyal ve eşit olan 4 yol arasında optimal olduğu bulunmuştur.

Yakar ve Çelik (2014) tarafından yapılan çalışmada, Tokat ilinde bir karayolu güzergâhının belirlenmesi aşamasında ÇKKV ile CBS yöntemlerini beraber kullanmıştır. Proje başlangıcında birçok kriter aynı anda ele alınmış ve CBS verilerinin varlığıyla birlikte somut bir prosedüre göre işlenmiştir. Fuzzy fonksiyonları, kriter haritalarının standartlaştırılmasında kullanılmıştır. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde AHP kullanılmıştır. Kriter haritalarının birleştirilmesi için Ağırlıklı Lineer Kombinasyon yöntemi kullanılmıştır. Farklı bakış açılarıyla hizalama alternatiflerinin oluşturulmasını sağladığı ve farklı bakış açılarına sahip alternatifler arasından seçim yapmayı kolaylaştırdığı belirtilmektedir. Bu çalışma, yol planlamasında çok kriterli karar verme ve CBS kullanımı ile farklı alternatif güzergahların oluşturulduğu ve farklı değerlendirmeler yapılarak seçim yapmanın kolaylaştığı vurgulamaktadır.

Şakar ve diğ., 2020 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, korunan alanlarda ziyaretçilerin maksimum görsel deneyimini sağlayacak en uygun güzergâhın belirlenmesi için ÇKKV yöntemleri ile bir yol ağı planlanmıştır. Görsel kalite parametrelerini dikkate alarak optimum güzergâhın belirlenmesi için CBS tabanlı analizler yapılmıştır. Sonuçlar, görsel kaliteyi önceliklendiren bir yol ağı planlaması ve maksimum görsel kaliteye sahip en uygun güzergâhın belirlenmesinde başarılı bir metodolojinin sunulduğunu göstermektedir.

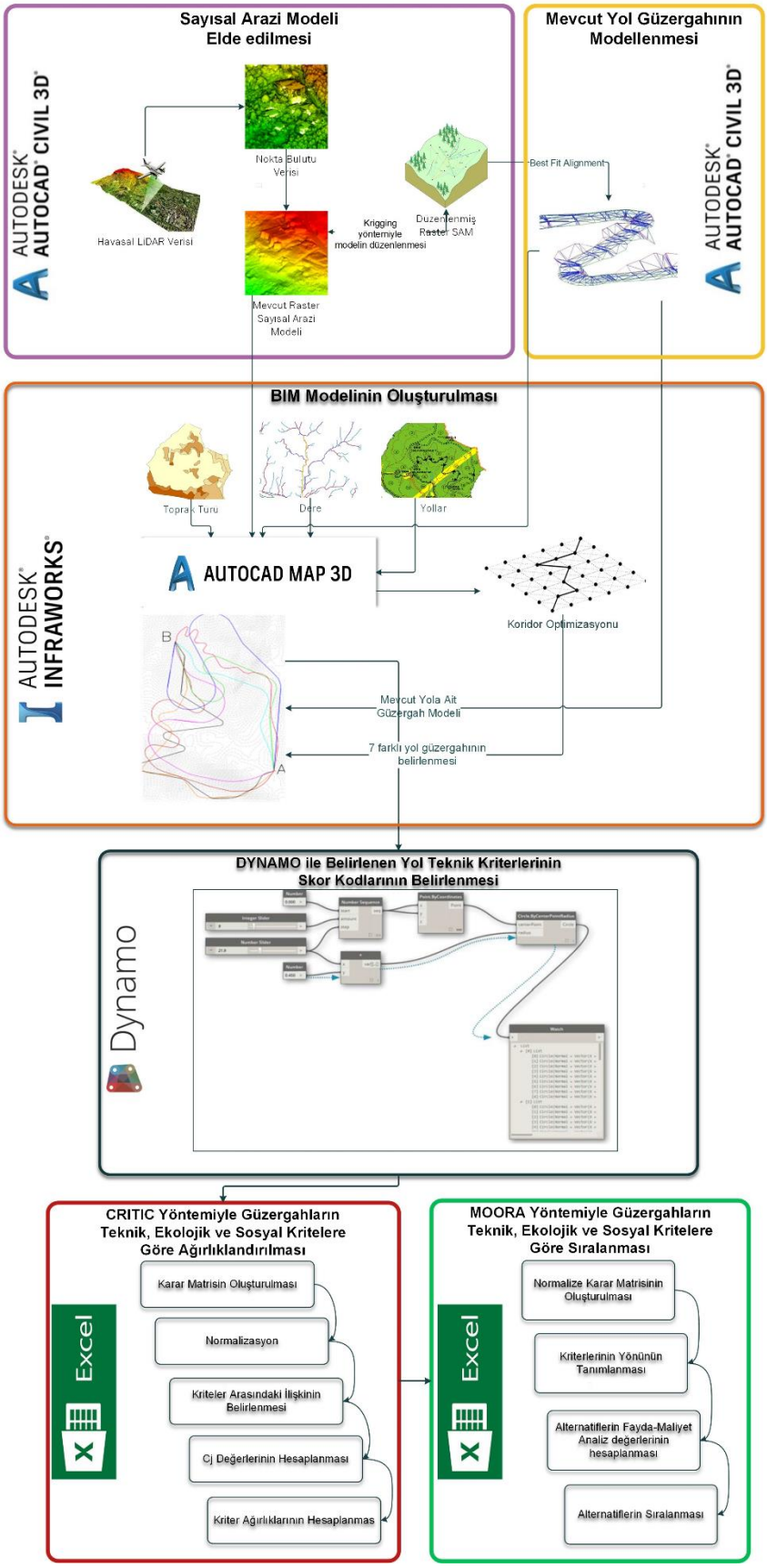
Sarı ve Şen tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada otoyolların uygun güzergâhların belirlenmesi ele alınmıştır. Yapı maliyetlerinden dolayı zor ve karmaşık olan bu süreçte, ekonomik, sosyal ve çevresel parametreler için öncelikler, beklentiler ve kısıtlamalar bir arada göz önünde bulundurulmalıdır. Bu karmaşıklıkları aşmanın en uygun yolu, ÇKKV teknikleri olan AHP, TOPSIS ve VIKOR ile CBS kombinasyonu ile en az maliyet yolu algoritması (EMYA)'dır. Çalışmada eğim, yön, jeoloji, rakım, yol, yerleşim yeri, su kütleleri, fay hatları, binalar, doğal afetler, korunan alanlar, nüfus ve arazi kullanımı gibi faktörler en uygun otoyol yapım alanlarını ve rotalarını belirlemek için seçilmiştir. AHP, TOPSIS ve VIKOR yöntemleri, EMYA ile en az maliyetli yol yüzeylerini hesaplamak için uygulanmış ve üretilen üç rota karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, VIKOR yöntemiyle bulunan güzergâh en uygun rota olarak belirlenmiş ve CBS ve ÇKKV entegrasyonunun etkin sonuçlar oluşturduğu vurgulanmıştır.

Ağırlıklı ortalama yöntemi, ÇKKV süreçlerinde yaygın olarak kullanılan başka bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemde, her kriter için belirli bir ağırlık atanır ve her alternatifin bu kriterler altındaki performans puanları, kriter ağırlıkları ile çarpılarak toplanır. Bu sayede, her alternatif için bir toplam puan elde edilir ve alternatifler bu puanlara göre sıralanır. Ağırlıklı ortalama yöntemi, karar vericilerin farklı kriterlerin önem derecelerini dikkate alarak daha dengeli ve rasyonel kararlar almasını sağlar (Jahan ve diğ., 2012). Örneğin, Jahan ve diğ., (2012) malzeme seçimi süreçlerinde kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve alternatiflerin değerlendirilmesi için ağırlıklı ortalama yöntemini kullanmış ve bu yöntemin etkinliğini vurgulamıştır. Ayrıca, bu yöntem özellikle mühendislik ve çevre yönetimi gibi alanlarda, çeşitli faktörlerin bir arada değerlendirilmesi gereken durumlarda kullanılmaktadır.

3. YÖNTEM

Tez kapsamında belirlenen çalışma alanı için havasal Lidar verisi kullanılmıştır. Lidar verilerinden Sayısal Arazi Modeli (SAM) oluşturulmuş, SAM üzerindeki mevcut yolların şev sınırları belirlenerek, iç alandaki yol yüzeyleri çıkarılmış ve yerine kriging metodu kullanılarak arazinin yol öncesi hali modellenmiştir. Dere, mevcut yol ve toprak türleri haritası ile düzenlenen SAM, BIM yazılımına aktarılmıştır. Öncelikle, BIM ortamında yol optimizasyonu yapmak amacıyla başlangıç ve bitiş noktaları belirlenmiştir. Daha sonra, Infraworks yazılımının sunduğu kriterler farklı kombinasyonlarda kullanılarak yedi farklı alternatif BIM modeli oluşturulmuştur. Bunlara ek olarak, mevcut yol güzergâhında AutoCAD Civil 3D yazılımının "*best fit alignment*" aracı kullanılarak en iyi yol güzergâhı tüm geometrik elemanlarıyla birlikte çıkarılmış ve mevcut yolda sekizinci alternatif olarak modellenmiştir.

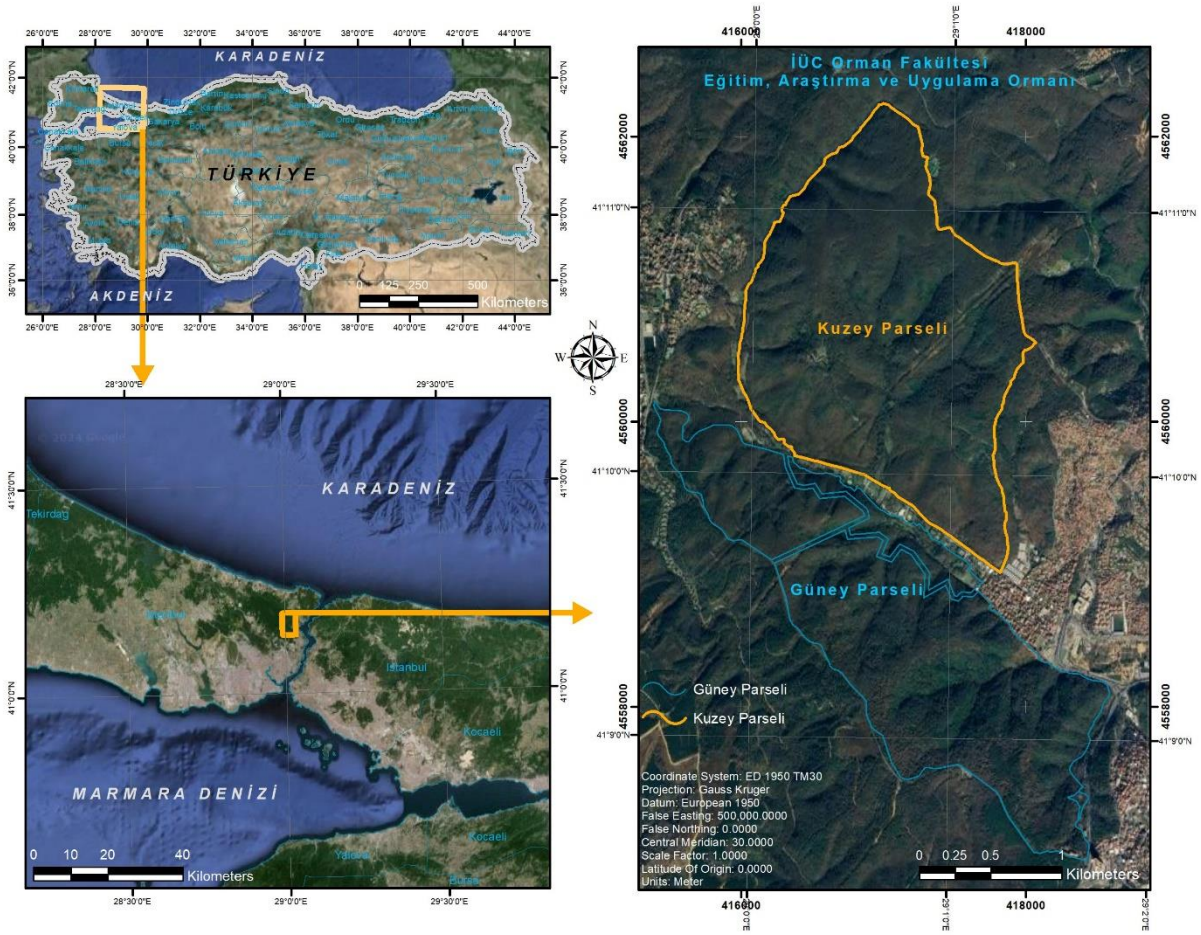
Devamında, teknik, ekolojik ve sosyal kriterler belirlenmiş ve bu kriterlerle ilgili bilgiler, sekiz adet BIM modelinden, Autodesk'in Dynamo yazılımında tez kapsamında geliştirilen yazılımla çekilmiştir. Çekilen veriler, Microsoft Office Excel yazılımında CRITIC yöntemi kullanılarak farklı kriterlere göre ağırlıklandırılmıştır. Sonrasında, MOORA sıralama yöntemi ile bütün alternatifler teknik, ekolojik ve sosyal açıdan en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. Ayrıca, her alternatif güzergâhının yol modeli için kazı, dolgu ve menfez fiyatlarını içeren bir maliyet hesaplaması yapılmış ve alternatifler en ucuzdan en pahalıya doğru sıralanmıştır. Her farklı açıdan sıralama yapıldıktan sonra, teknik, ekolojik, sosyal ve maliyet kriterlerine eşit ağırlık verilerek basit bir formülle tüm açılardan en optimum yol güzergâhı seçilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Çalışma iş akış şeması

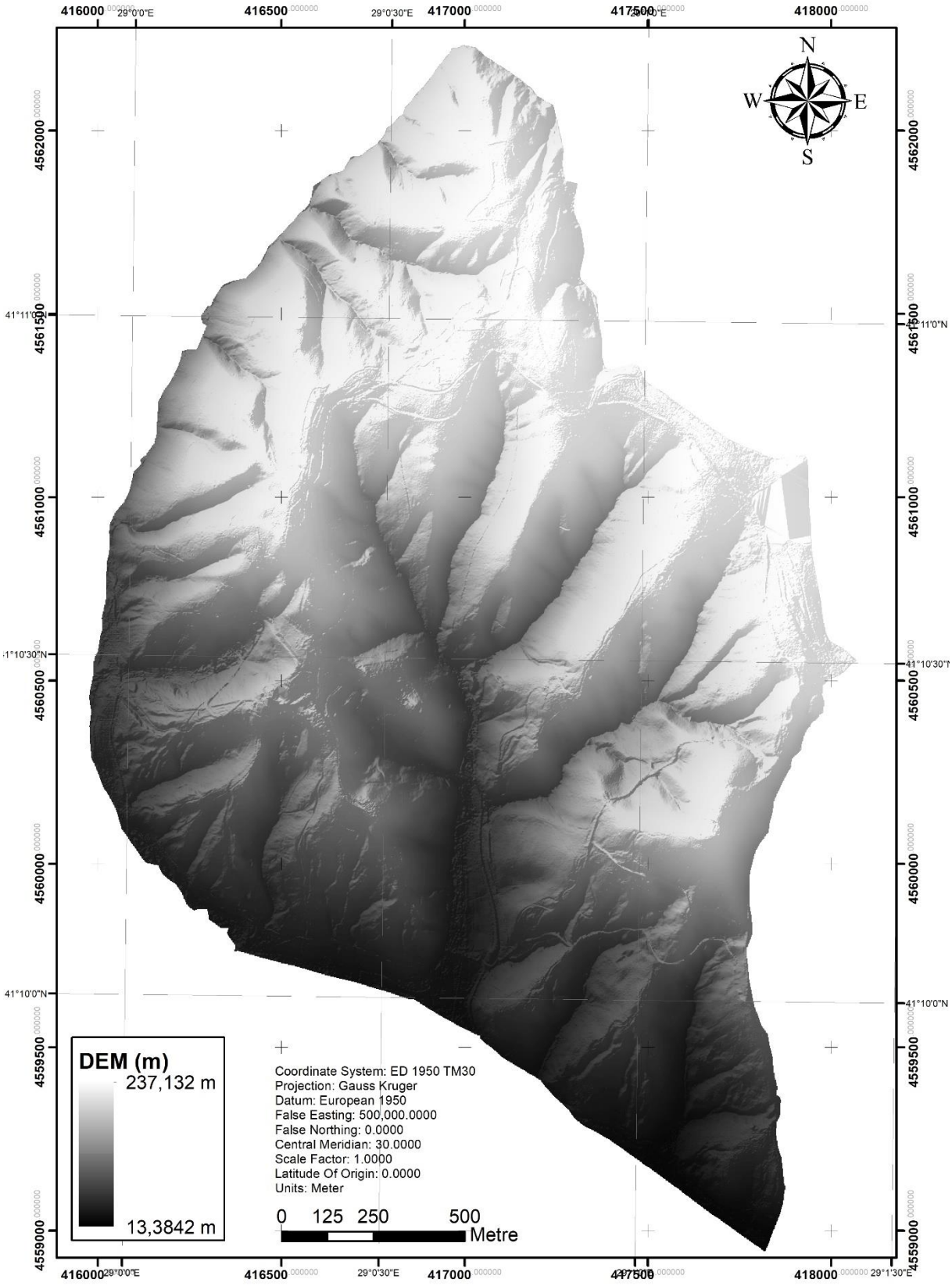
3.1. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL BİLGİLER

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 3.2). Çalışma alanı yaklaşık 2.724,16 m genişliğinde ve 4.006,86 m uzunluğunda olup 391,8 ha'lık bir alanı kapsamaktadır.

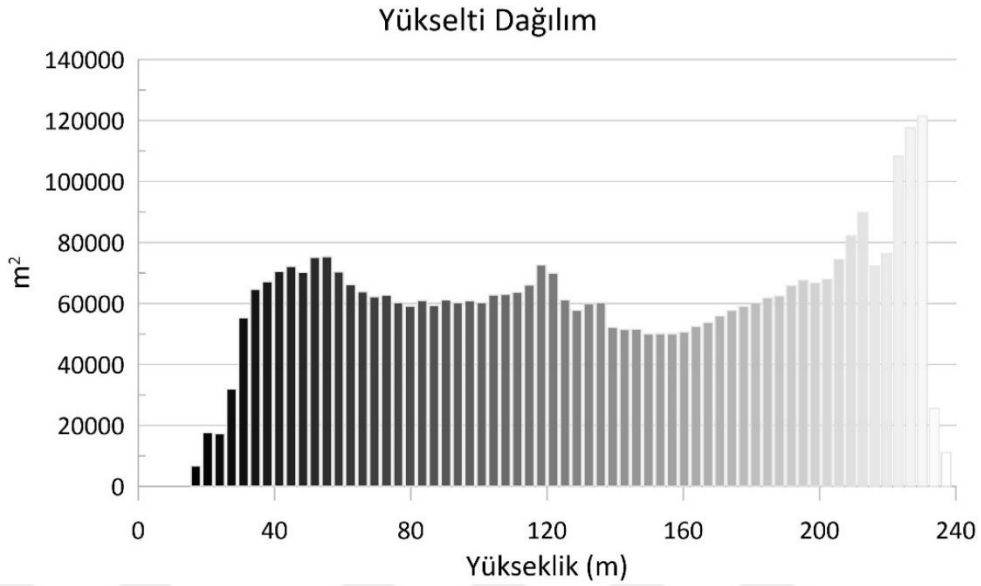


Şekil 3.2: Çalışma alanı

LiDAR tabanlı SAM verisine göre, yükseklikler deniz seviyesinden 13,38 m ile 237,13 m arasında değişmektedir (Şekil 3.3). Topoğrafik olarak incelendiğinde alansal olarak homojen bir yükselti dağılımı olduğu görülmektedir (Şekil 3.4).

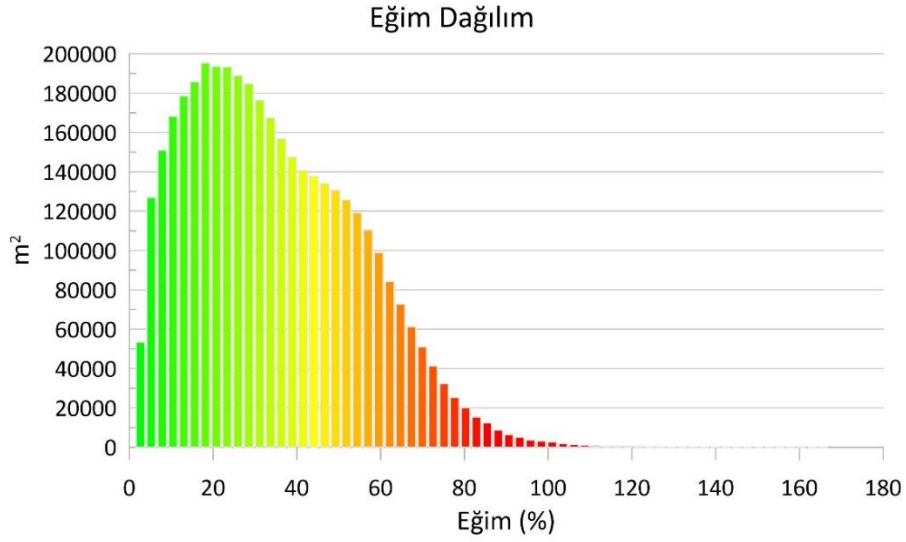


Şekil 3.3: Çalışma alanına ait LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli (SAM)

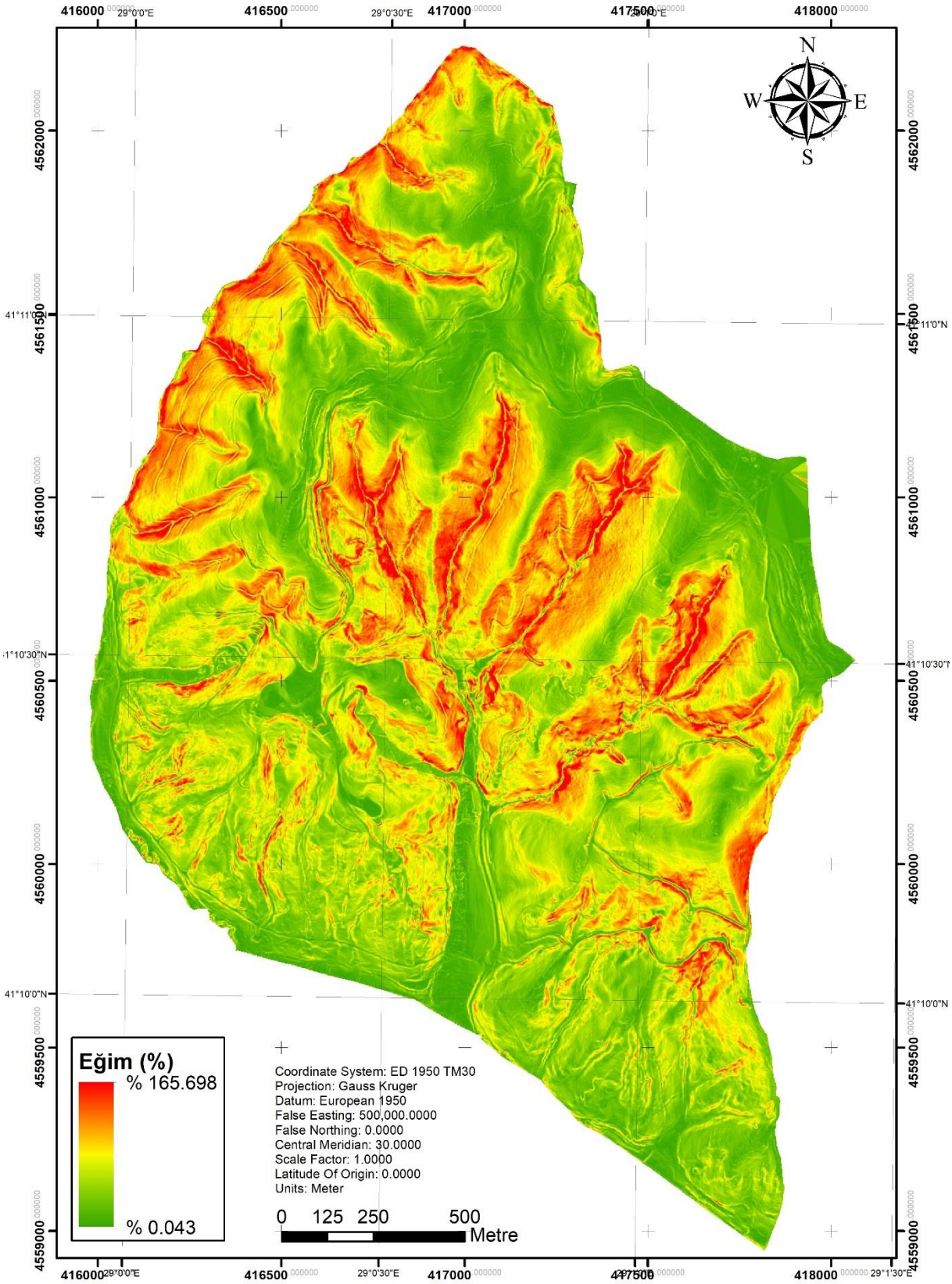


Şekil 3.4: Çalışma alanı yükselti dağılım histogramı

Yukarıda belirtildiği üzere çalışma alanında yaklaşık 224 metrelik bir yükseklik farkı bulunmaktadır. İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı kuzey parseli alansal büyüklüğü dikkate alındığında, topoğrafik bir diğer değişken olan eğim açısından da değişimin Türkiye ortalaması olan % 17,3'ün üzerinde olduğu belirtilebilir (Elibüyük, 2010). Çalışma alanının eğim dağılımı ve istatistikleri incelendiğinde, ortalama %33,4, minimum %0,03, maksimum %165,70 eğime sahip olduğu, eğim dağılımının standart sapmasının ise 20,24 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.5, Şekil 3.6).



Şekil 3.5: Çalışma alanı eğim dağılım histogramı

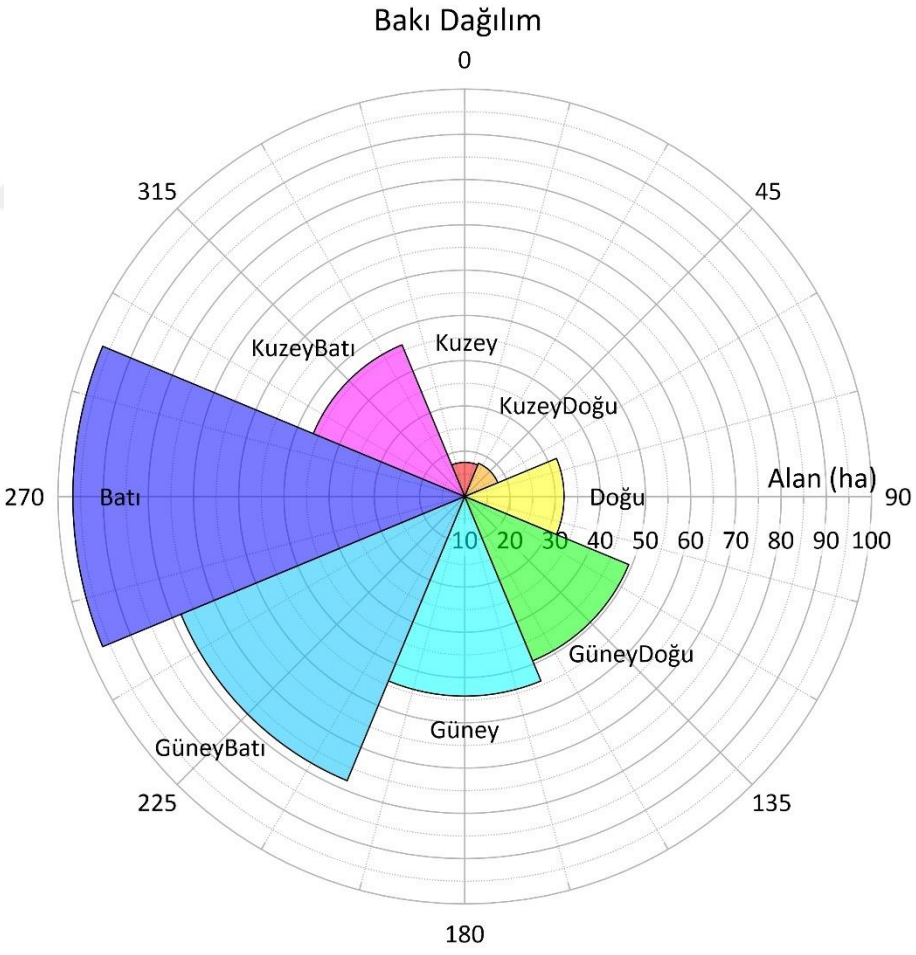


Şekil 3.6: Çalışma alanı eğim haritası

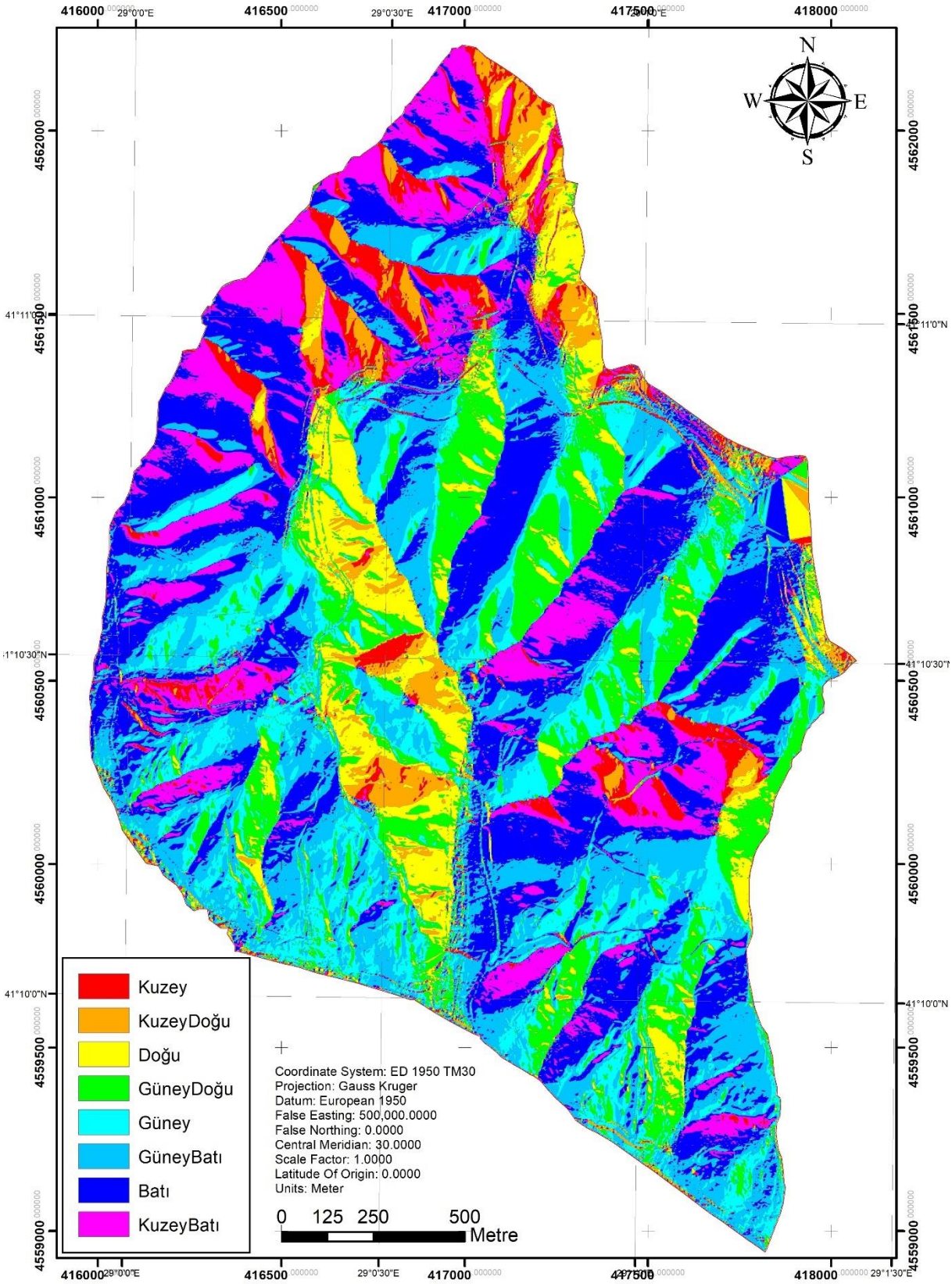
Çalışma alanındaki bakı dağılımı incelendiğinde batı ve güneybatı baskın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.7). Alansal olarak değerlendirildiğinde çalışma alanının yaklaşık %45'i bu iki bakıda bulunmaktadır (Tablo 3.1- Şekil 3.8).

Tablo 3.1: Bakıların alansal dağılımı

Bakı	Alan (ha)
Kuzey	17.545
KuzeyDoğu	17.937
Doğu	31.983
GüneyDoğu	49.296
Güney	54.105
GüneyBatı	77.962
Batı	96.709
KuzeyBatı	46.267
Toplam	391.805



Şekil 3.7: Çalışma alanı bakı dağılımları



Şekil 3.8: Çalışma alanı bakı haritası

3.2. SAM ELDE EDİLMESİ

Sayısal Arazi Modeli (SAM) literatürde bilinen adıyla DEM (Digital Elevation Model) verileri, topoğrafik bilgi sağlamak için kullanılan grid veya vektör yapısındaki verileri ifade etmektedir (Zhang, 2024). Yükseklik değeri tipik olarak çıplak toprağın (arazinin) genellikle ortalama deniz seviyesi yüksekliğini temsil eder. Bununla birlikte, bitki örtüsünün veya insan yapımı yapıların yüksekliklerini de içeren modeller Sayısal Yüzey Modeli (SYM) olarak bilinmektedir. Çalışma kapsamında hassas ormancılık yaklaşımıyla orman yolu güzergahının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yol inşası doğal olarak çıplak yer yüzü üzerinde gerçekleştirildiğinden dolayı çalışmada SAM verileri kullanılmıştır.

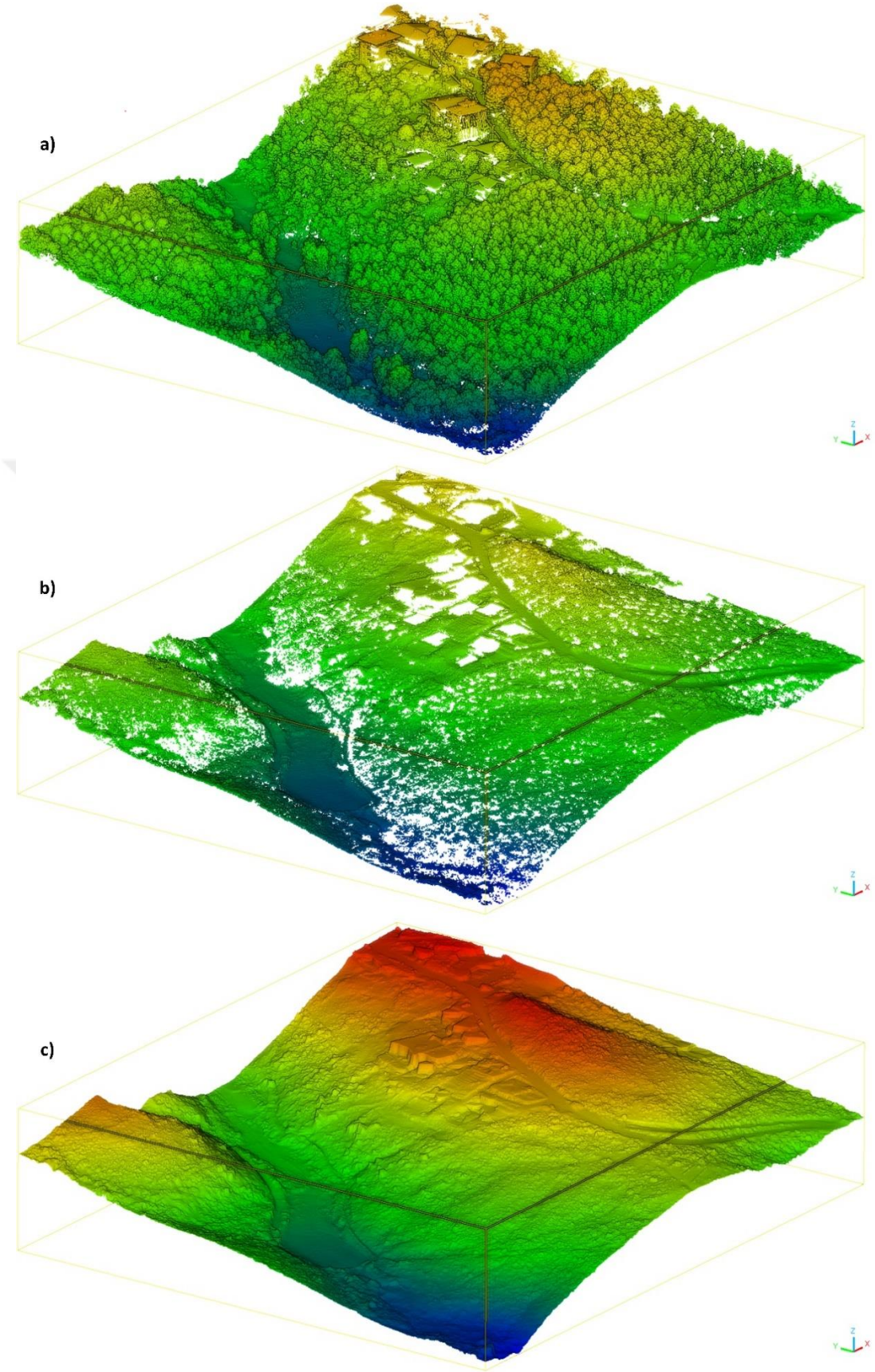
3.2.1. LiDAR Verileri

LiDAR, yeryüzüne ait üç boyutlu bilgileri elde etmek için kullanılan bir uzaktan algılama teknolojisidir (Popescu, 2015; Scaioni, 2018). Üç boyutlu bilgileri elde etmek için lazer darbeleri kullanılmaktadır (Killinger, 2014). Temelinde vektörel bir veri seti olan nokta bulutu verisi elde edilmektedir.

LiDAR verileri ormancılık çalışmaları için büyük potansiyel taşımaktadır. Bunun temel sebebi vejetasyon içerisindeki küçük boşluklardan geçen LiDAR ışık ışınları yeryüzüne ve/veya vejetasyonun çeşitli katmanlarına (gövde, dal, alt katman) ulaşabilmekte ve bu kısımların modellenebilmesine olanak tanımaktadır (Amakhchan, 2022; Lu, 2024). Noktalar çeşitli filtreleme ve sınıflandırma işlemlerine tabi tutulmakta ve LiDAR verilerinden, istenilen obje veya yüzeylere ilişkin bilgiler çıkarılabilmektedir. Buna örnek olarak çıplak arazi yüzeyi oluşturmak için dayanak noktalarını oluşturacak noktaların filtrelenerek çıkartılması gösterilebilir (Şekil 3.9). LiDAR nokta bulutundan çıplak zemin DEM üretimi iki ana adımdan oluşur. Bunlar zemin filtreleme ve filtrelenmiş zemin noktalarının bir enterpolasyon rutini içinde işlenmesidir (Aryal, 2017). Nokta bulutu verilerinin filtrelenmesi aşamasında birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. En temel çözüm olarak bir yorumlayıcının nokta bulutu verilerinden ilgili noktaları çıkarması belirtilebilir. Günümüzde ise yapay zekâ temelli algoritmaların geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Çıplak yeryüzüne ait noktabulutu verileri elde edildikten sonraki aşamada ise yeryüzünü temsil edecek boşluksuz bir verisetinin üretilmesi gelmektedir. Bu işlem ise bir enterpolasyon tekniği kullanılarak nokta bulutu verilerinden raster grid formundaki verilere dönüşüm işlemidir. Geçmişten günümüze, DEM üretimi veya 3D yüzey modellemesi için birçok enterpolasyon tekniği literatürde tartışılmıştır (Hardy, 1971, Briggs, 1974, Makarovic, 1977, Akima, 1978, Hutchinson ve Bischof, 1983,

Makarovic, 1984, Fortune, 1987, Hutchinson, 1989, Watson, 1992, Mitas ve Mitasova, 1999). Ancak, tüm veri kaynakları, arazi desenleri veya arazi verilerinin enterpolasyonu amaçları için en doğru veya evrensel olan tek bir enterpolasyon yöntemi bulunmamaktadır (Fisher ve Tate, 2006, Liu, 2008, Yurtseven ve diğ., 2019). Kırılım noktaları arasında yüzey modeli oluşturulması aşamasında kullanılması tercih edilen en temel teknik ise linear enterpolasyon tekniğidir. Bu teknikte noktalar arasında doğrusal yüzeyler oluşturulmaktadır. Hızlı ve orijinal yükseklikleri koruduğundan dolayı nokta yoğunluğu fazla olan LiDAR verilerinden sayısal arazi modeli üretimi aşamasında bu teknik tercih edilebilmektedir.

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



Şekil 3.9: LiDAR nokta bulutu verilerinin filtrelenmesi ve SAM üretimi. a) Filtrelenmemiş nokta bulutu. b) Çıplak yeryüzüne ait filtrelenmiş nokta bulutu. c) Raster sayısal arazi modeli

3.2.2. Kriging metoduyla mevcut yolun inşaat öncesi durumuna göre arazi modelinin düzenlenmesi

Mevcut yolun diğer alternatiflerle ekonomik, ekolojik, sosyal ve teknik bakımdan karşılaştırılabilmesi için, diğer alternatiflerde olduğu gibi kazı miktarları, yol inşaat alanı gibi bilgilerin çıkarılması gerekmektedir. Koridor modeli oluşturabilmek ve bu değerleri modelden çekebilmek için, yolun geçtiği arazi modelinin yol öncesi ilk halinin bir temsilinin oluşturulması gerekmektedir. Bu tarz işler yoğun bir şekilde kullanıldığı için, bu aşamada Kriging yönteminde karar kılınmıştır.

Kriging yöntemi, yüzey modellemesinde yüksek doğruluk sağladığı ve veri boşluklarını etkin bir şekilde doldurduğu için tercih edilmiştir. Bu yöntem, mevcut ve alternatif yol koridorlarının karşılaştırılması için gerekli olan detaylı arazi modelinin oluşturulmasını mümkün kılarak, kazı ve dolgu hesaplamaları, inşaat alanı belirlemeleri gibi kritik verilerin elde edilmesini sağlamıştır. Bu sayede, farklı yol alternatiflerinin ekonomik, ekolojik, sosyal ve teknik açıdan kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve karşılaştırılması mümkün olmuştur.

Kriging, z-değerlerine sahip dağınık noktalar setinden tahmini bir yüzey oluşturan gelişmiş bir jeoistatistiksel yöntemdir. IDW (Inverse distance weighted) (ters mesafe ağırlıklı) ve Spline gibi belirli matematik formüllerine dayanan deterministik interpolasyon yöntemlerinden farklı olarak, kriging, ölçülen noktalar arasındaki istatistiksel ilişkilere dayanan istatistiksel modeller içeren bir yöntemdir. Bu nedenle, kriging yalnızca tahmin yüzeyi üretmekle kalmaz, aynı zamanda tahminlerin doğruluğu veya kesinliği hakkında bir ölçüm de sağlar.

Kriging yöntemi, örnekleme noktaları arasındaki mesafe veya yönün, yüzeydeki varyasyonu açıklamak için kullanılabilecek bir mekânsal korelasyon varsayar. Kriging, belirli sayıda noktaya veya belirli bir yarıçap içindeki tüm noktalara matematiksel bir fonksiyon uygulayarak her konum için çıktı değerini belirler. Kriging süreci, veri analizi, variogram modelleme, yüzey oluşturma ve isteğe bağlı olarak varyans yüzeyini inceleme adımlarını içerir. Özellikle verilerde mekânsal olarak korele bir mesafe veya yön önyargısı olduğunu bildiğiniz durumlarda kullanım için uygundur ve sıklıkla toprak bilimi ve jeoloji alanlarında kullanılır. Kriging yöntemine ilişkin kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(S_i) \quad (3.1)$$

Z(si): i. konumdaki ölçülen değerdir.

λ_i: i. konumdaki ölçülen değere ait bilinmeyen ağırlıktır.

S_0: Tahmin yapılmak istenen konumdur.

N: Ölçülen değerlerin toplam sayısıdır.

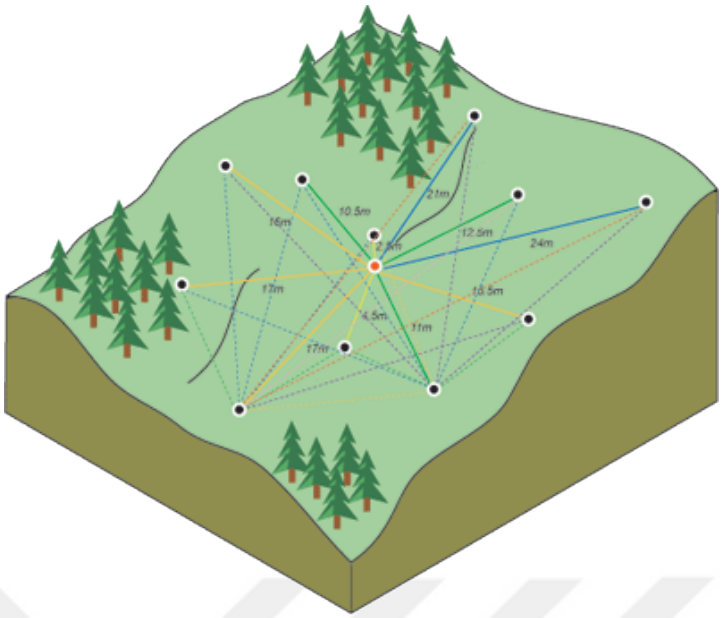
Varyografi, jeoistatistikte kullanılan bir yöntemdir ve veri noktaları arasındaki mekânsal korelasyonun (uzaysal ilişkinin) nasıl değiştiğini analiz etmek için kullanılır. Variografi, özellikle Kriging gibi jeoistatistiksel interpolasyon yöntemlerinde önemli bir rol oynar. Bu analiz, çeşitli mesafelerdeki noktalar arasındaki benzerlik veya farklılıkları belirlemek için yapılan ölçümleri içerir ve elde edilen sonuçlar "variogram" adı verilen bir grafikte gösterilir.

Variogram, yarı varyans değerlerinin mesafeye karşı grafiğidir. Yarı varyans, belirli bir mesafe aralığındaki ölçüm çiftleri arasındaki farkların karesinin ortalaması olarak tanımlanır. Bu grafik, bir lokasyondan diğerine ölçülen değerlerin ne kadar değişken olduğunu gösterir. Mekânsal korelasyonun varlığı, noktalar birbirine yakınken yarı varyansın düşük, uzaklaştıkça artan bir eğilim göstermesiyle anlaşılır.

Bir model sığdırma ya da mekânsal modelleme işlemi, yapısal analiz veya variografi olarak da bilinir. Ölçülen noktaların yapısının mekânsal modellemesinde, h mesafesiyle ayrılmış konum çiftleri için aşağıdaki denklemle hesaplanan ampirik yarı değişim grafiği ile başlanır:

Bu denklem, eşleştirilmiş konumların değerleri arasındaki farkın karesini hesaplamayı içerir.

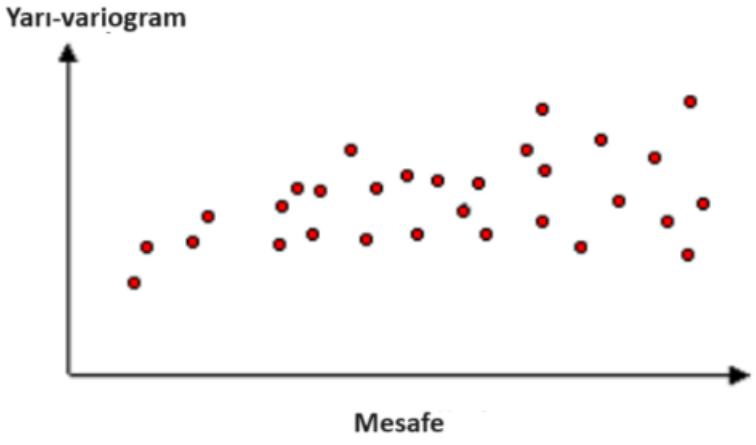
Şekil 3.10'da görüldüğü üzere, bir noktanın (kırmızı nokta) diğer tüm ölçülen konumlarla eşleştirilmesini gösterir. Bu işlem, her ölçülen nokta için devam eder.



Şekil 3.10: Eksen üzerindeki noktaların seyreltilmesi

Mekânsal istatistiklerde, özellikle variografide yarı-varyogram oluşturmak için eşleştirilmiş konumlar arasındaki farkın karesinin hesaplanması birkaç adımı içerir (Denklem 3.2). İlk olarak, her bir konum çifti için, birinci konumdaki değer ile ikinci konumdaki değer arasındaki fark alınır. Daha sonra, bu farkın karesi hesaplanır. Bu işlem, tüm eşleştirilmiş konum çiftleri için tekrarlanır. Sonuçlar, belirli bir mesafe h için ortalama değeri bulmak üzere toplanır ve bu ortalama, ilgili mesafe için yarı-variogram değerini vermek üzere 0,5 ile çarpılır. Bu yarı-variogram değerleri, veriler arasındaki mekânsal bağımlılığı görselleştirmek için kullanılır ve genellikle bir grafik üzerinde gösterilir (Şekil 3.11).

$$Yarı - variogram(mesafesi) = 0.5 \times (değer_i - değer_i)^2 \quad (3.2)$$

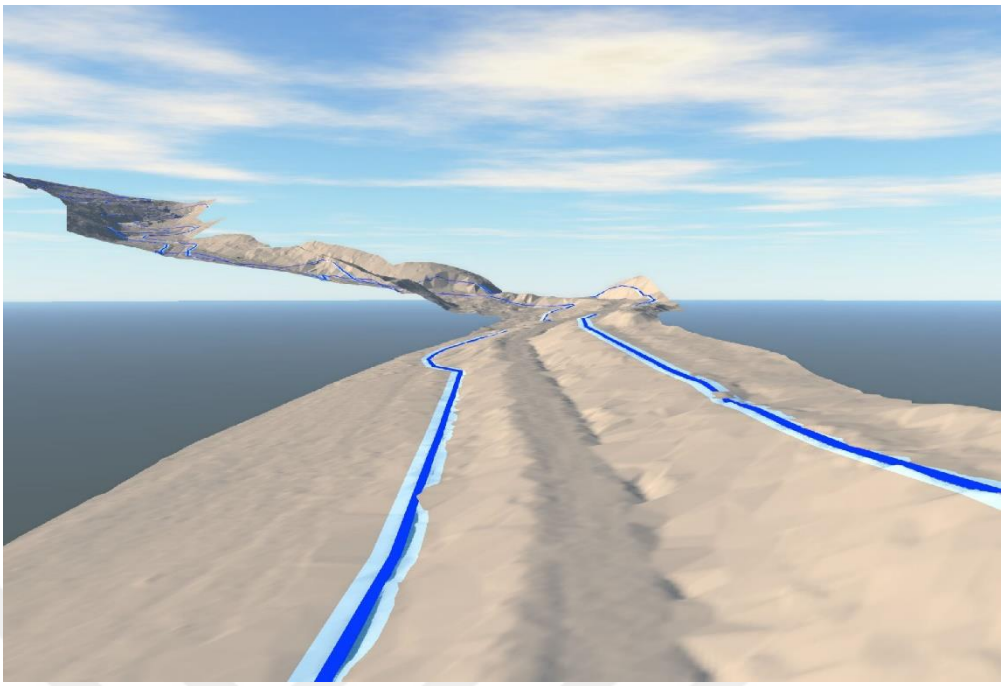


Şekil 3.11: Ampirik yarı-variogram grafiği örneği

Empirik yarı-variograma model sığdırma işlemi, mekânsal veri analizinde mekânsal açıklamadan tahmine geçişi sağlayan önemli bir adımdır. Kriging yönteminin temel amacı, ölçülmemiş konumlarda özellik değerlerini tahmin etmektir ve bu süreç, veri setlerindeki mekânsal otokorelasyonu anlamamıza yardımcı olur. Empirik yarı-variogram, ölçüm yapılmamış tüm yönlere ve mesafelere dair bilgi sağlamaz, bu yüzden pozitif kriging varyansları garanti altına almak için sürekli bir fonksiyon veya eğri ile model sığdırılması gerekir. Bu, regresyon analizine benzer bir süreçtir, burada veri noktalarına sürekli bir hat veya eğri uygulanır. Küresel model gibi bir model seçimi, yarı-variogramın (Denklem 3.3) kökenine yakın şekli büyük ölçüde etkileyebilir ve bu da en yakın komşuların tahmin üzerindeki etkisini artırır.

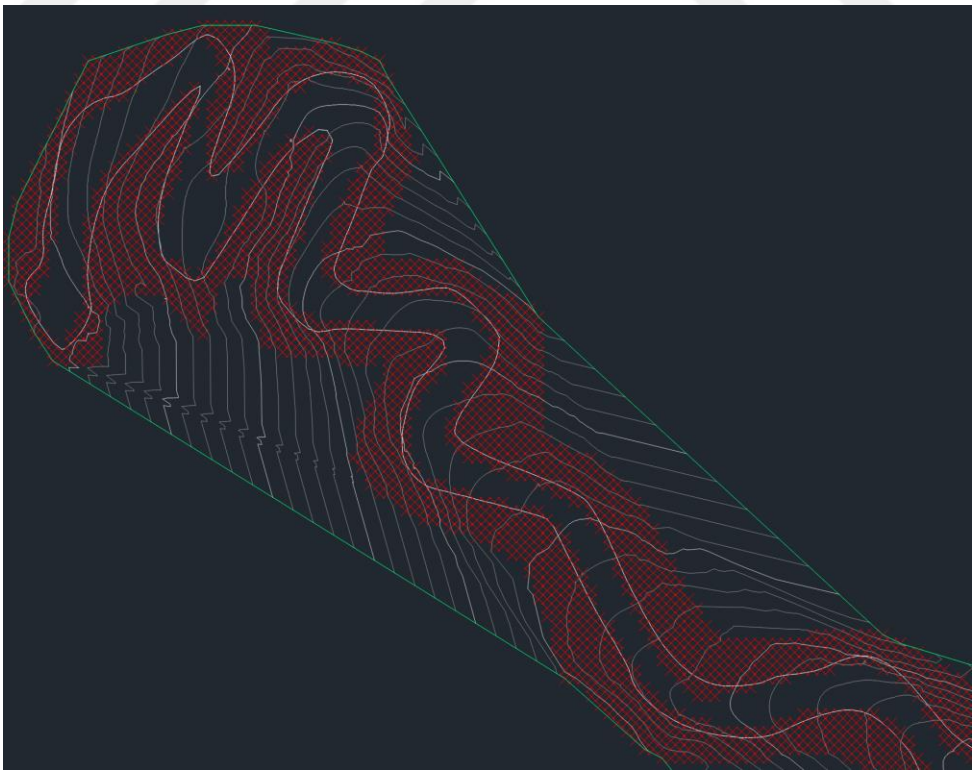
$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c\left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2}\left(\left(\frac{h^3}{a^3}\right)\right)\right) & 0 < h \leq a \\ c_0 + c & h > a \\ 0 & h = 0 \end{cases} \tag{3.3}$$

InfraWorks yazılımında, shaded görsel ayarı yapılarak mevcut yolun kazı ve dolgu durumundaki sağ ve sol şev üstleri belirlenmiştir (Şekil 3.12). Buradan poligon elemanı oluşturulup, ardından arazi modelinin düzenlenecek kısmı ve poligon, AutoCAD Civil 3D yazılımına aktarılmıştır.



Şekil 3.12: Infraworks yazılımıyla şev kenarlarının belirlenmesi

Bu poligon, iç sınır olarak kullanılarak arazi modelinden çıkarılıp, sınır dışında kalan alanlarda 0,5 metre aralıklı koordinat geometri noktaları (COGO points) oluşturulmuştur (Şekil 3.13).



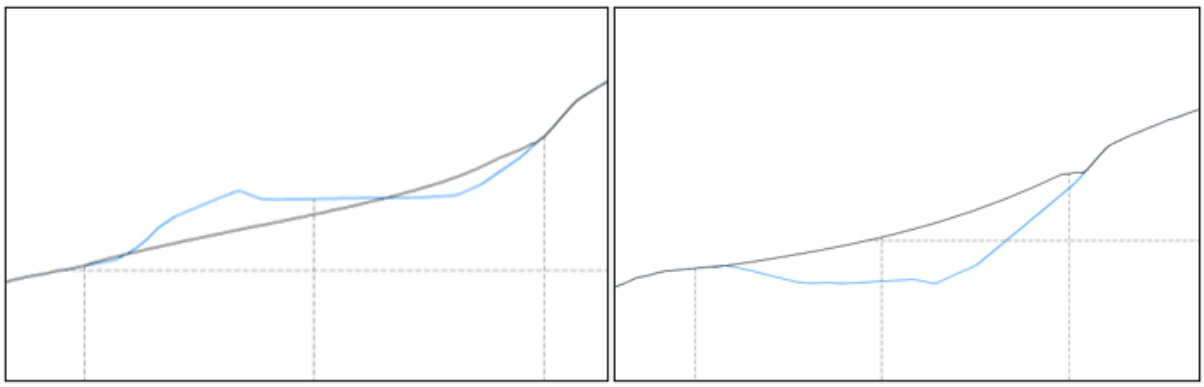
Şekil 3.13 : Boş alanın dışındaki noktaların oluşturulması

Sonrasında arazi modeli seçilmiş ve edit komutlarından Smooth Surface seçilerek yumuşatma işlemi yapılmıştır. Yarı variogram modeli olarak küresel (spherical) seçilmiştir (Şekil 3.14). Boşluk kalan alanda arazi modeli oluşturulmuştur. Yüzeyin bu işlem öncesi ve sonrasındaki durumu kesitlerden kontrol edilmiştir (Şekil 3.15).

Smooth Surface - AIW_Existing_Ground

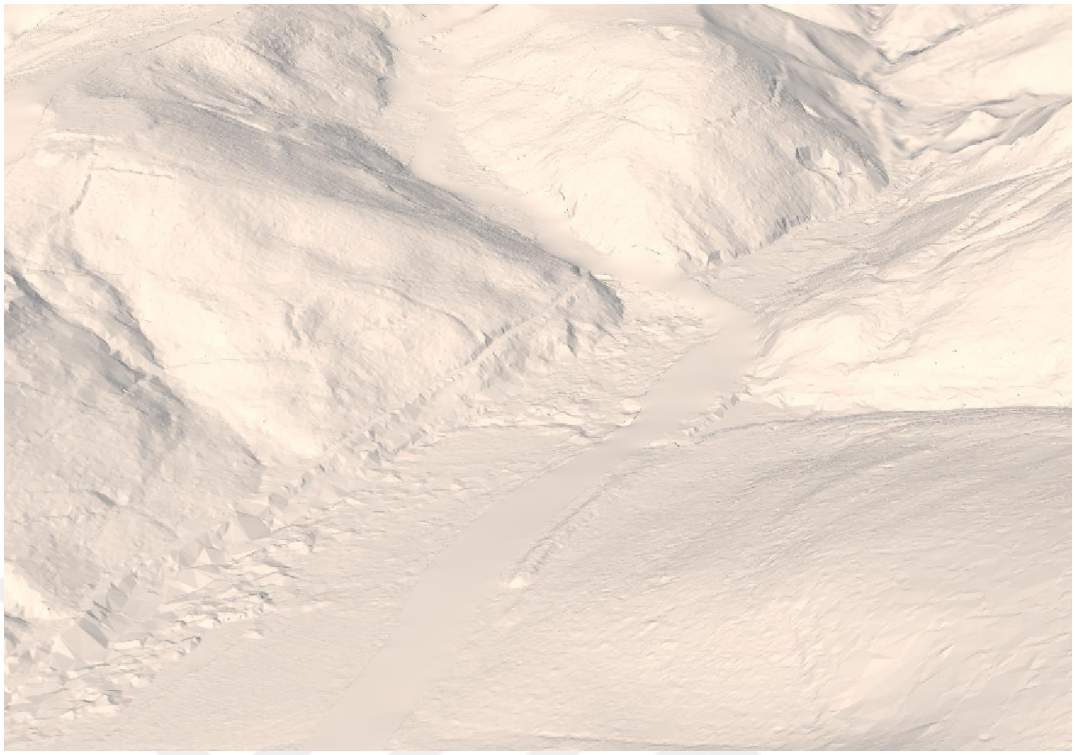
Smoothing Parameters	Value
Smoothing Methods	
Select method	Kriging
Kriging Method	
Semivariogram model	Spherical
Point selection method	Select points
Select points	0
Point Interpolation/Extrapolation Output	
Output locations	Grid based

Şekil 3.14: Autocad Civil 3D yazılımında Kriging metodu uygulama arayüzü



Şekil 3.15: Uygulama öncesi durumu gösteren kesitler mavi renkle sonraki durumu gösteren kesitler siyah renkte görünmekte

Kriging metodu ile oluşturulan yüzey, tekrar optimizasyonlarda mevcut arazi modelinin bir parçası olarak kullanılmak üzere InfraWorks yazılımına aktarılmıştır. Bu süreç, mevcut yolun kazı ve dolgu analizlerinin daha detaylı ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlamış, ayrıca arazi modelinin hassasiyetini artırmıştır (Şekil 3.16). Sonuç olarak, InfraWorks ve AutoCAD Civil 3D yazılımlarının entegrasyonu, mühendislik projelerinin planlama ve uygulama aşamalarında büyük kolaylık ve doğruluk sağlamıştır.



Şekil 3.16: Arazi modelinin kriging metodu uygulanarak düzenlenmiş hali

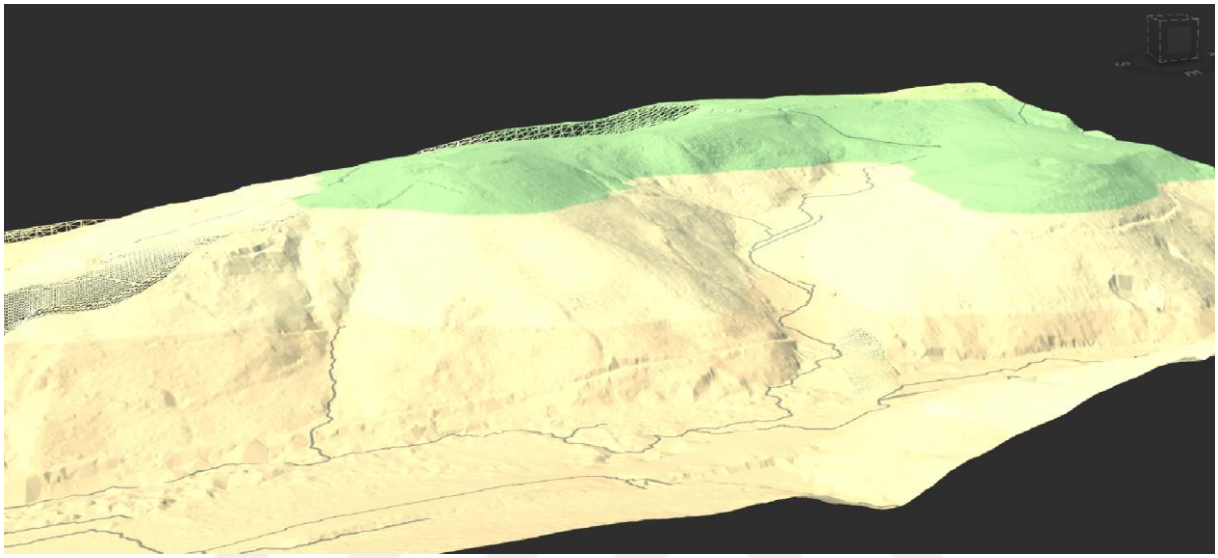
3.3. VEKTÖR VE RASTER VERİ SETLERİNİN BIM ORTAMINA ENTEGRASYONU

InfraWorks yazılımında havasal LiDAR verisinden oluşturulmuş arazi modeli ".tif" formatında, hava fotoğrafı ise ". ecw" formatında içeri alınmıştır. Mevcut dereleri, mevcut yolları ve toprak türlerini içeren poligonlar CBS verisi olan ".shp" formatında entegre edilerek optimizasyona altlık oluşturacak model tamamlanmıştır. Bu model, arazi analizleri ve planlama süreçlerinde kullanılacak detaylı ve kapsamlı bir veri seti sunmaktadır.

LiDAR verisi sayesinde yüksek doğrulukta arazi modelleri oluşturularak, topoğrafik detaylar en ince ayrıntısına kadar belirlenmiştir. Hava fotoğrafları, geniş alanların görsel analizini mümkün kılarak, çevresel ve yapısal unsurların görselleştirilmesini sağlamaktadır. Shape dosyaları, CBS tabanlı analizler için gerekli olan detaylı bilgi katmanlarını sunar. Mevcut dereler, yollar ve toprak türleri gibi önemli coğrafi ve çevresel veriler, modelin optimizasyon süreçlerinde kullanılmak üzere başarılı bir şekilde entegre edilmiştir.

Bu kapsamlı model, arazi planlamasında, çevresel etki değerlendirmesinde ve mühendislik projelerinde büyük fayda sağlayacaktır. Böylelikle, LiDAR verisi, hava fotoğrafları ve CBS tabanlı veri katmanları ile desteklenen bu model, detaylı analizler ve stratejik planlamalar için

ideal bir temel oluşturmaktadır. Tüm bu verilerin entegrasyonu, projelerin daha verimli ve doğru bir şekilde yürütülmesini mümkün kılmaktadır. Özetle, LiDAR verisi ile oluşturulmuş arazi modeli, hava fotoğrafları ve CBS verileri kullanılarak oluşturulan bu kapsamlı BIM modeli, mühendislik ve çevresel projelerde optimizasyon ve analiz süreçlerine altlık olması için hazırlanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Optimizasyona altlık olacak olan BIM modeli

3.4. BIM ORTAMINDA KORİDOR OPTİMİZASYONU İLE ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ OLUŞTURULMASI

Orman yolu güzergâhı belirleme, aynı anda birden fazla değişkenin analizini gerektiren karmaşık bir süreçtir ve ormancılık projelerinde önemli bir adımdır (Çalışkan ve diğ, 2019). Yol ağı için optimal konumları bulmak amacıyla birçok orman mühendisi hala neredeyse tamamen manuel olan geleneksel yöntemleri kullanmaktadır. Mevcut CBS rutinlerini kullanarak ofiste alternatif rotaları değerlendirerek, değerli saha zamanından günler hatta haftalar tasarruf edilebilir ve sonuçta daha iyi bir tasarım ortaya çıkabilir (Hosseini ve diğ, 2011). Model dinamizmi ve esnekliği, yatay hizalama, dikey profil veya yol kesitinde herhangi bir değişikliğin diğer temsilleri hemen etkilemesi nedeniyle karmaşık bir proje yönetiminde birçok avantaj sunmaktadır (Bongiorno ve diğ, 2019). BIM esnekliği, paralel çözümlerin analizini basitleştirebilir ve gerçekçi 3D temsili, algoritma tarafından önerilen en iyi çözümler arasındaki farkları hemen ortaya koyabilir. İnşaat mühendisliği alanındaki BIM yaklaşım potansiyeli, planlama, yürütme ve yapım aşamalarından tasarım fikri kavramına kadar yeni senaryoları açmaktadır.

3.4.1. Koridor Optimizasyonu

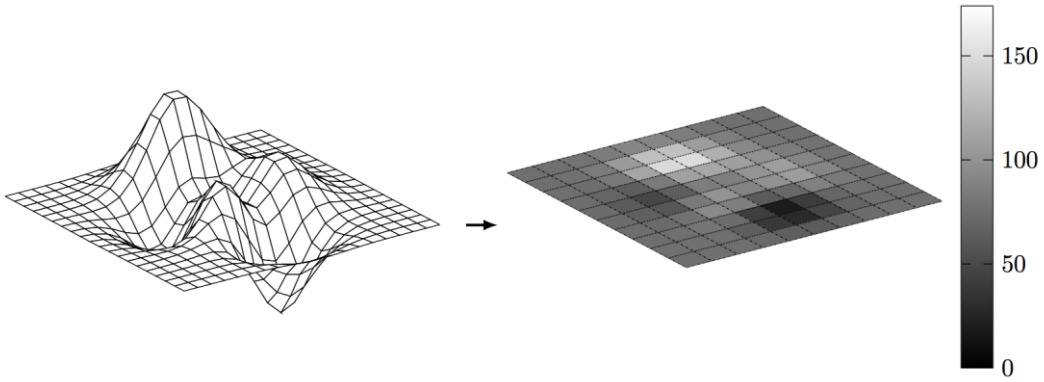
Tez sonunda yazılması amaçlanan kalite analiz yazılımının hassas sonuçlar verebilmesi için analizde kullanılacak yolların öncelikle, hali hazırda kullanılan bir koridor optimizasyon yazılımından geçirilmesi düşünülmüştür. Böylece tez sonunda herhangi bir kriter dikkate alınmadan yapılan bir yolun, geometrik, çevresel, ekonomik vs. kriterler dikkate alınarak optimize edilen bir yolla arasındaki kalite analiz sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Optimizasyon işlemlerine başlamadan önce yöntem, kullanılacak model verileri, maliyet ve diğer kısıtlamalar açısından araştırılmıştır. Buna göre;

Yöntem, arazi verilerini, kısıtlama verilerini ve maliyet verilerini okuyarak başlar. Kısıtlama verileri (negatif kardinaller) içeride katman olarak tanımlanır. Yöntem ayrıca, hafriyat maliyetlerini, inşaat maliyetlerini, arazi maliyetlerini, çevresel maliyetleri vb. içerebilen maliyet girdisi gerektirir. Bu bağlamda maliyetler, dolaysız maliyetler (hard cost) ve dolaylı maliyetler (soft cost) (Azizi ve diğ., 2015) olarak tanımlanabilmektedir. Büyük veriler, girdi, vektör veya raster formatında sağlanabilir.

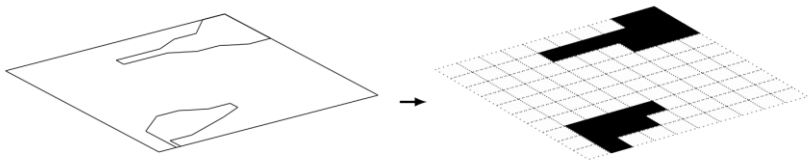
Model verilerinin optimizasyona verdikleri katkıların yöntemi ve örneklerde kullanılacak verilerin seçimiyle ilgili aşağıda bilgilendirme yapılmaktadır.

Arazi verileri Infraworks'de "Terrain" olarak tanımlanan modelden çıkarılır. Yöntem, düzenli aralıklarla proje sınırları içindeki araziyi örnekler. Arazi piksellerini (yükseklik değerleri), hafriyat maliyetini hesaplamak için erişime izin veren satırlar ve sütunların bir kombinasyonu olarak depolanan bellekte tutmaktadır (Şekil 3.18).



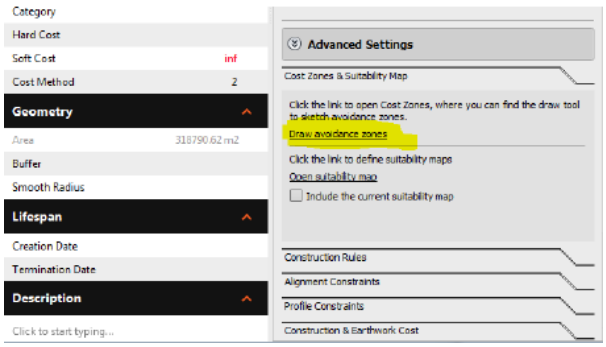
Şekil 3.18: Model verisinden oluşturulan karelaj verisi

Araziyle benzer şekilde, Infraworks yazılımında tanımlanan su bölgeleri, otomatik olarak alınır ve optimizasyon yönteminde ayrı bir katman olarak kullanılır (Şekil 3.19). Bir su bölgesini geçen bir güzergâh, bir köprü yapısı gerektirir. Bu tez çalışması kapsamında köprü alternatifi dikkate alınmamış, ilerde ki bölümlerde anlatılacağı gibi geçilen su bölgesi kadar menfez inşa edileceği kabulu yapılmıştır. Bu nedenle su bölgeleri, inşaat maliyetini etkiler.



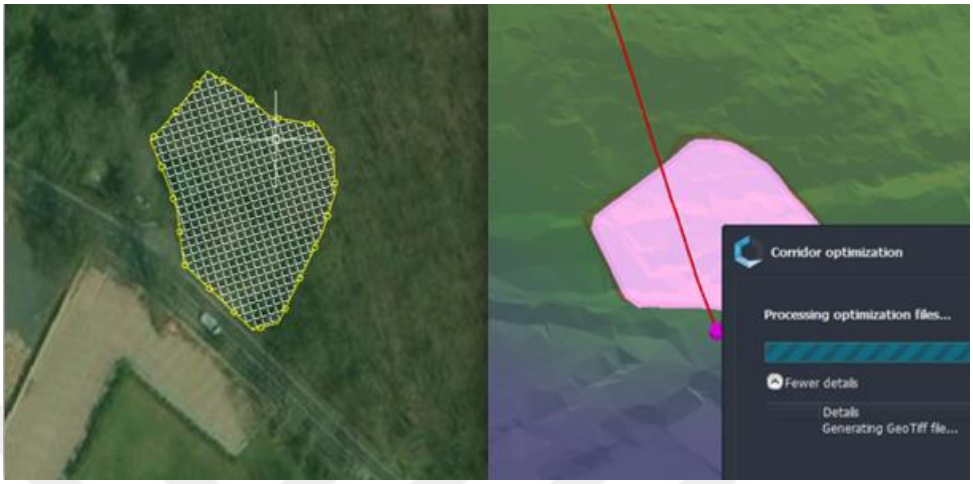
Şekil 3.19: Model verilerinden edilen su alanı karelajı

Kesin koruma altındaki alanlardan, bilimsel araştırma alanlarından ve belirlenmiş arkeolojik ve kültürel sit alanlarından kaçınılmalıdır. Çevresel olarak hassas alanlardan kaçınılmalıdır (Ryan ve diğ, 2004). İnşaat öncesinde yol güzergâhına ait arazi keşifleri incelenerek güzergâhlardaki bataklık, kayalık gibi negatif kardinal noktaları belirlenmelidir. (Çağlar ve Acar, 2011). Negatif kardinal noktaları, yöntemin ne pahasına olursa olsun kaçınmaya çalışacağı bölgeler yani Infraworks yazılımda isimlendirildiği gibi kaçınma bölgeleridir. Bazı nadir durumlarda, bir kaçınma bölgesinden kaçınılamaz. Bu durumda, yöntem, mümkün olan en küçük mesafe boyunca kaçınma bölgesini ihlal eden bir güzergâh bulmaya çalışır. Kaçınma bölgeleri shp dosyaları olarak alınıp tanımlanabilir veya aşağıdaki şekilde görülen diyalog kutusu kullanılarak doğrudan optimizasyon aracından çizilebilir (Şekil 3.20).



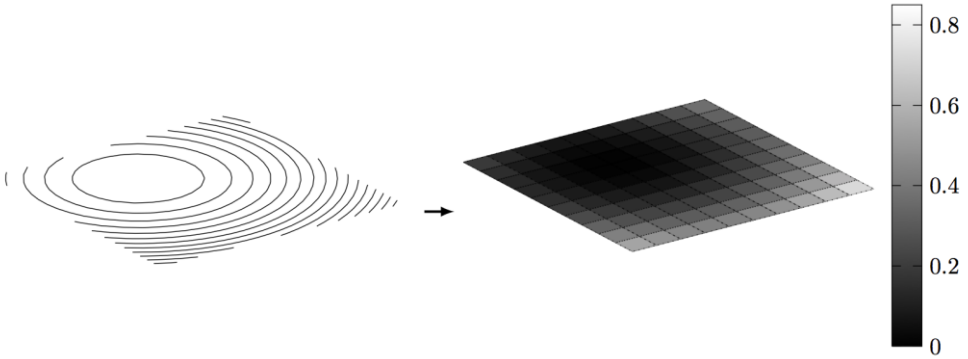
Şekil 3.20: Koridor optimizasyonu ileri ayarlar menüsü

Çalışmanın ilk evrelerinde Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın girişindeki bina ve ona bağlı çevre bahçe alanı kaçınma bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.21). Sonrasında başlangıç ve bitiş noktalarının farklı seçilmesi sebebiyle bu alan dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.21: Sahada belirlenen kaçınma bölgelerinin belirlenmesi

Uygunluk haritaları, çevresel hassas alanlar gibi maliyetleri modelleyen basit işlevler kullanılarak oluşturulabilir (örneğin, ters kare yasası yoluyla gürültü kirliliği). Mevcut CBS verilerinden de uygunluk haritaları oluşturulabilir. Uygunluk haritası, arazi ile aynı oryantasyona sahip bir $h \times w$ matrisi olarak bellekte saklanır ve dolaylı maliyetleri hesaplamak için kullanılır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22: Dairesel bir şekil ve gradyan kullanan uygunluk haritası

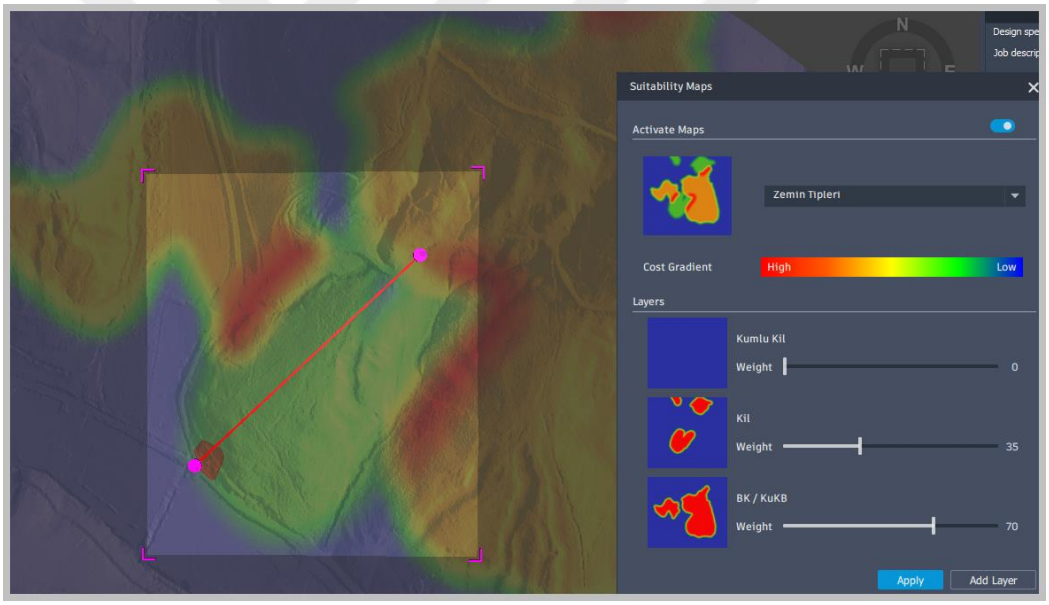
Ayrıca, dolaylı maliyet girdisi olarak uygunluk haritası tanımlanmak üzere bölgeye ait toprak türlerini içeren oluşturulan harita sayısallaştırılarak CBS verisi olarak kullanılmıştır. Geoteknik verilerde dolaylı maliyet (soft cost) görülmektedir. Zeminleri oluşturan katı daneler birbirinden farklı boyutlarda ve farklı kimyasal özelliklerde olabilmektedir (Nandi, 2018) (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Tane boyutlarına göre zemin cinsleri

Zemin Cinsi	Tane Boyutu (cm)
Çakıl	> 0,475
Kum	0,074-0,475
Silt ve Kil	<0,074

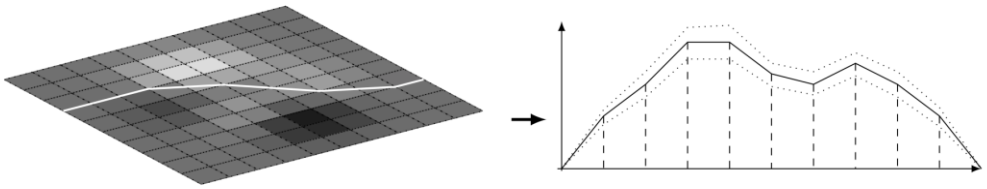
Bu durumda danelerin boyutu ve oranı, zeminlerin oturma, şişme, kompakt olma (sıkışma) ve dayanım gibi birçok fiziksel davranışını etkilemektedir. Vaka çalışmasındaki oturma kriterinde dolgu yüksekliği (yük miktarının artması), zemin ince dane oranı ve yeraltı su seviyesine bağlı su miktarı olarak dikkate alınmıştır.

Şekil 3.23'te görüldüğü gibi alanın içinde kalan üç toprak cinsine aşağıdaki ağırlıklar verilerek uygunluk haritası oluşturulmuş ve optimizasyon içerisinde kullanılmıştır.

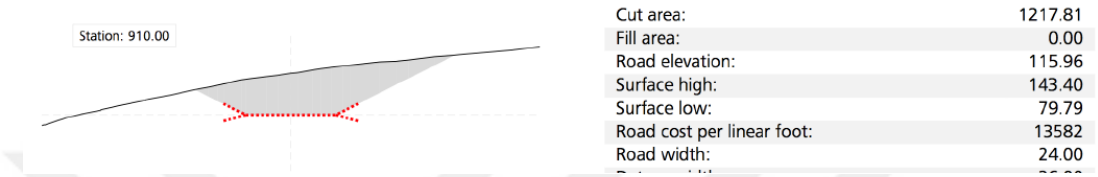


Şekil 3.23: Zemin sınıfları uygunluk haritası ağırlık tanımları

Hafriyat maliyeti, yol güzergahı boyunca kesitler örneklenerek hesaplanır (Şekil 3.24). Mevcut zemin enine kesitleri daha sonra yolun referans noktaları ile enkesitteki kazı ve dolgu alanlarını hesaplamak için kullanılır (Şekil 3.25). Ortalama alan yöntemi (Cross Metodu), kazı ve dolgu hacimlerini hesaplamak için kullanılır. Daha sonra kazı, dolgu için maliyet katsayıları atanır ve ilgili hafriyat maliyetini bulmak için bir doğrusal programlama (LP) çözülür.

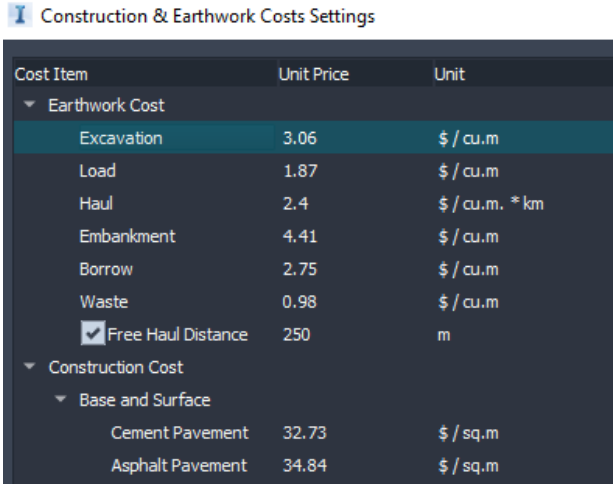


Şekil 3.24: Arazi katmanından profil ve kesit verilerinin okunması



Şekil 3.25: Hafriyat için son ortalama alan yöntemi için enine kesit hesaplamaları

İnşaat maliyetleri, kaplamanın toplamıdır. Toplam inşaat maliyeti, hat mesafesi boyunca bireysel alt bölüm maliyetlerinin toplamıdır (Şekil 3.26). Ayrıca tünel ve köprü gibi sanat yapıları için koridor optimizasyonunda, yapılar bir yükseklik eşiğine (maksimum dolgu yüksekliği, maksimum kazı derinliği) veya su geçişlerine bağlı olarak seçilir. Bu örnekte dolgu yükseklik eşik değeri 50 m seçilerek köprü oluşturulmasından kaçınılmıştır.

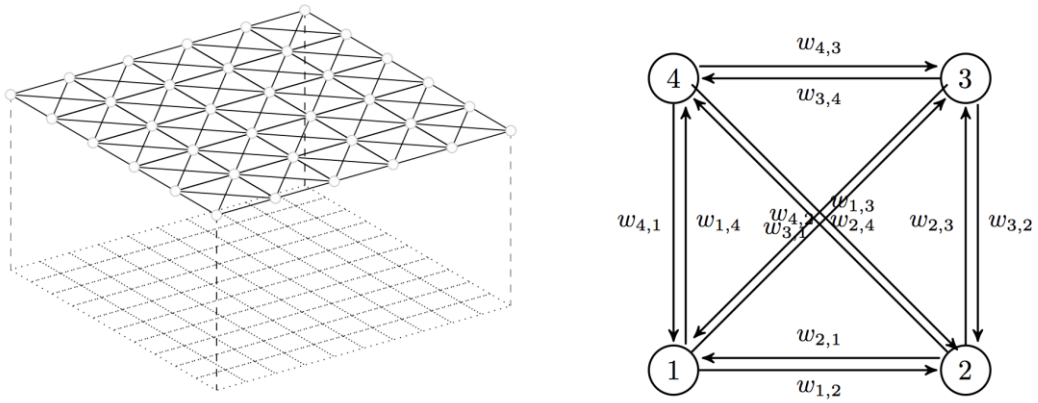


Şekil 3.26: Birim maliyetlerin girişinin yapıldığı menü

Optimizasyon için maliyet fonksiyonu, dolaysız maliyetlerin ve dolaylı maliyetlerin ağırlıklı toplamıdır. Dolaysız maliyetler, hafriyat maliyeti ve inşaat maliyetleridir. Dolaylı maliyetler

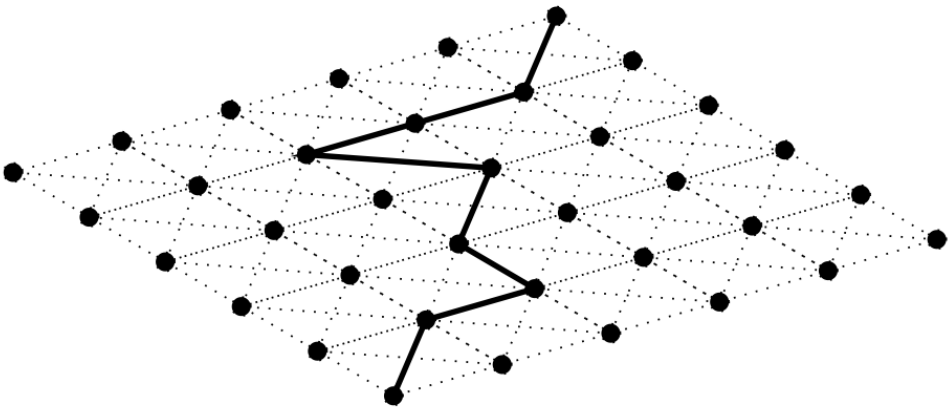
yukarıda da açıklandığı gibi uygunluk haritasından alınır. Dolaylı maliyetler 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir ve koridor optimizasyonunda dolaysız maliyetlerin yarısı ile çarpılır.

Yönteme genel bir bakış atacak olunursa, bir başlangıç ve bitiş noktası verildiğinde, yöntem bir başlangıç güzergâhı elde eder. Yöntem, arazi karelajı üzerinde, karelaj noktalarını yatay, dikey ve çapraz olarak birleştiren kenarları içeren daha kaba bir karelaj oluşturur (Şekil 3.27). Yöntem daha sonra kenar için iki karelaj noktasını birleştiren bir güzergâh elemanına karşılık gelen maliyetleri hesaplar. Maliyet hesaplaması, toprak işleri, inşaat maliyetlerini ve yolun veya yolun bölümlerinin altında kalan depolanmış maliyet katmanlarından elde edilen değerlerin herhangi bir ağırlıklı ve ölçeklendirilmiş kombinasyonunu içerebilir ancak bunlarla sınırlı değildir. Yöntem daha sonra karelajdaki en ucuz yolu bulmak için en kısa yol yöntemini çağırır.

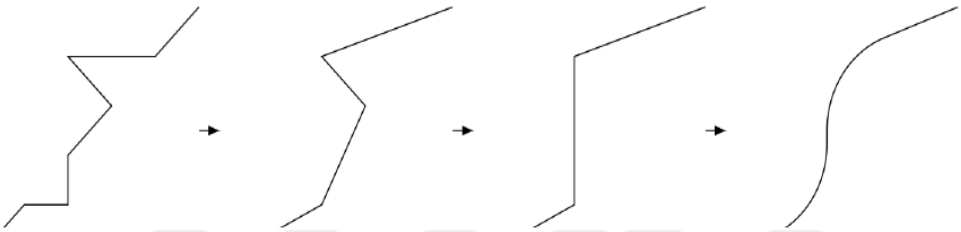


Şekil 3.27: En kısa yol karelaj yerleşimi

Bir güzergâh genellikle some noktalarında (PI) bağlanan teğetlerden oluşur (Şekil 3.28). Araçlar için düzgün yön değişimine izin vermek için bu somelere minimum yarıçaplı eğriler yerleştirilmelidir. Köşe noktalarından oluşan yol, hizalanan veya kesişen birçok küçük çizgi parçasından oluştuğundan, tasarım kısıtlamalarını ihlal edebilir ve bir güzergâh olarak tanımlamak için uygun değildir. Yöntem daha sonra çizgi parçalarının sayısını azaltmaya çalışır. Bunu, teğetler arasında belirli bir minimum yarıçapa sahip eğrileri başarıyla uydurana kadar tekrar tekrar yapar. Bu şekilde elde edilen güzergâh başlangıç güzergâhıdır (Şekil 3.29).

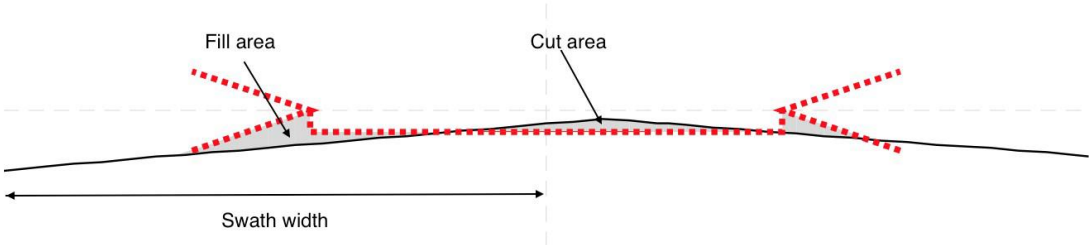


Şekil 3.28: Karelaj boyunca en kısa yol



Şekil 3.29: Bulunan en kısa yolun yumuşatılması

Yöntem, türev içermeyen bir optimizasyon işlemi için girdi olarak başlangıç güzergâhını alır. Optimizasyon süreci içinde başlangıç güzergahının maliyetini hesaplamak için, yöntem bunu merkez çizgisi boyunca orijinal yüzeye yansıtır. Yöntem, teğetlerin yüzey ile kesiştiği noktaları okur ve bir profil oluşturmak için yükseklik değerlerini depolar (Şekil 3.30) Ayrıca güzergâh boyunca enkesitler için yükseklik bilgisi elde etmek için merkez hattının solunda ve sağında ofset profilleri üretilir.



Şekil 3.30: Enkesitlerden otomatik ofset çıkarılması

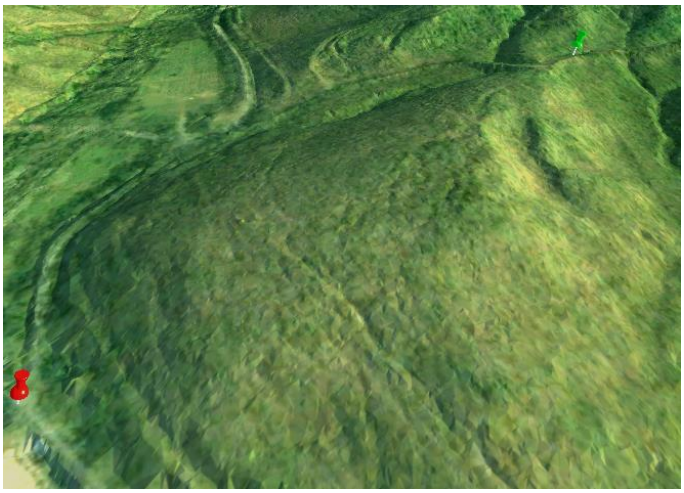
Yöntem, yükseklik değerlerini her okuduğunda, diğer maliyet katmanlarından maliyet değerlerini de okur. Kesitler daha sonra hafriyat ve inşaat maliyetlerinin yanı sıra uygunluk haritası tarafından verilen dolaylı maliyetleri elde etmek için kullanılır.

Optimizasyon süreci daha sonra seçilen stratejiye göre some konfigürasyonlarını değiştirir ve yeni yol hizalamasının maliyetini, başlangıç hizalaması ile aynı şekilde değerlendirir. Optimizasyon süreci şu durumlarda durabilir:

- Bir zaman sınırına ulaşıldığında,
- Daha iyi bir çözüm bulunamazsa,
- İlerleme çok küçük olduğunda,

Optimizasyon süreci tarafından bulunan en ucuz yol güzergâhı daha sonra depolanır ve kullanıcıya iade edilir. Yöntem kullanıcıya aynı girdi verilerini kullanan ancak biraz farklı parametreler için (örneğin, farklı uygunluk haritaları veya farklı proje sınırları olan), farklı alternatif güzergâh döndürebilir.

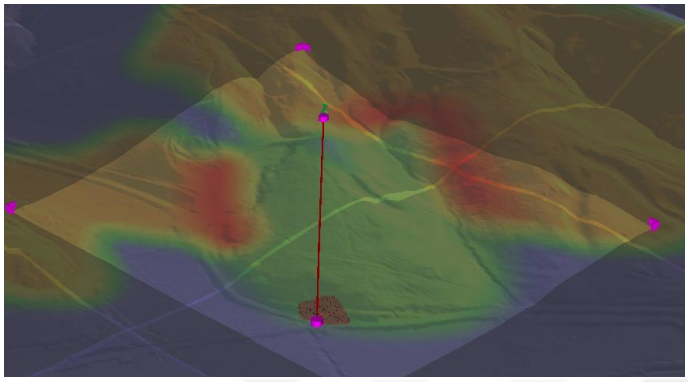
Yukarıdaki tanımlamalar ile model verileri kullanılarak alım yapılan sahadan, ana yol ekseniyle (B noktası) alımın diğer sınırında bulunan bir sürütme yolunun ekseni (A noktası) başlangıç ve bitiş noktaları olarak seçilir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31: Yol başlangıç noktası (yeşil), bitiş noktası (kırmızı)

Yol optimizasyonun yapılacağı alan aşağıdaki şekildeki gibi seçilmiştir (Şekil 3.32). Infraworks yazılımı bu alanı sadece dörtgen olarak tanımlayabilmekte, diğer poligonal şekillerde alan

tanımlaması yapılamamaktadır. Ayrıca some noktalarının dış sınıra belli bir uzaklıkta olması gerekmekte ve yazılım, optimizasyon yapılamayacak yakınlıkta sınır tanımlandığı zaman optimize butonunu aktif hale getirmemektedir.

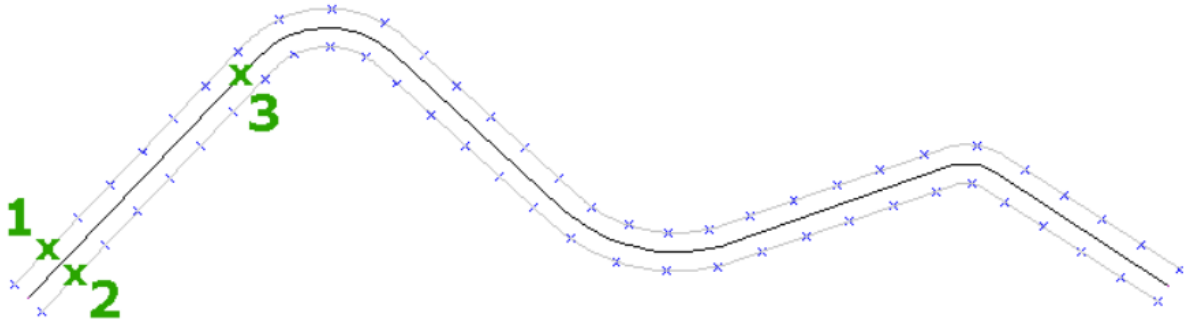


Şekil 3.32: Optimizasyon yapılacak alan sınırı

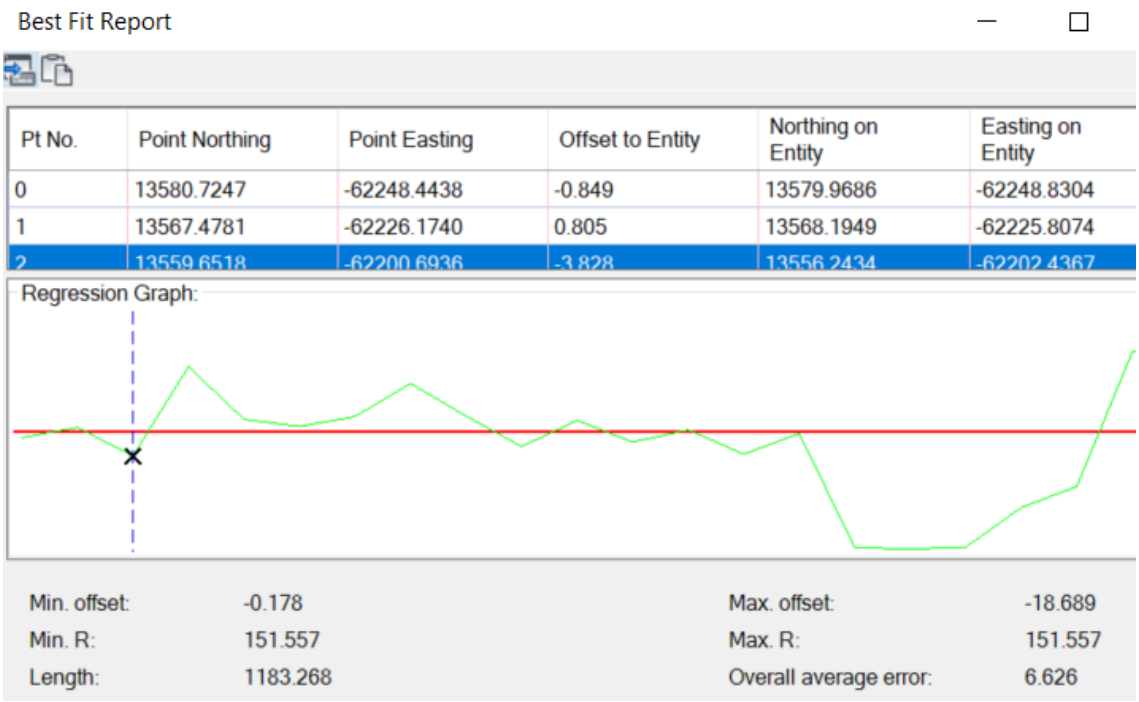
3.4.2. Mevcut yolun modellenmesi

Model üzerinde belirlenen A ve B noktası arasındaki mevcut yolun modellenerek diğer alternatiflerle beraber ekonomik, geometrik, ekolojik ve sosyal olarak değerlendirilmesi için öncelikle bir önceki bölümde anlatıldığı gibi Kriging metodu kullanılarak yolun geçtiği yüzeyin ilk haline getirilmesi sağlanmıştır. Koridor modelinin oluşturulması için öncelikle yol ekseninin geometrik standartlarla teğetler ve kurp elemanları kullanılarak düzgün bir şekilde oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla ortofotodan yararlanarak sağ ve sol yol kenarları üzerinde, yol boyunca noktalar oluşturulmuş, bu noktalar koordinat geometri (COGO point) elemanlarına çevrilmiştir. Sonrasında "*Best Fit Alignment*" yöntemi kullanılarak en iyi eksen belirlenmiştir. "*Best fit alignment*" yönteminin çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır.

İki yaklaşık paralel COGO nokta dizisi kullanıldığında, her bir nokta dizisi boyunca bir AutoCAD eğrisi (spline) (1, 2) çizilir. Her bir eğriden alınan noktalar, diğer eğri üzerine yansıtılır ve bu yansıtmaların kesiştiği noktalar, merkezi hat (3) oluşturmak için kullanılır (Şekil 3.33- 3.34) (Autodesk Civil 3D 2025 Help Document, 2025).

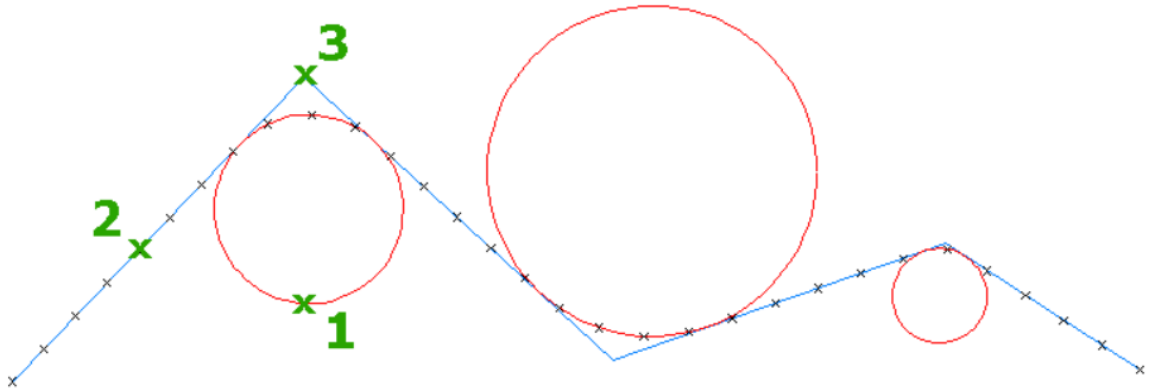


Şekil 3.33: Yol kenarlarından oluşturulan noktaları en iyi güzergâh belirlemede kullanılması



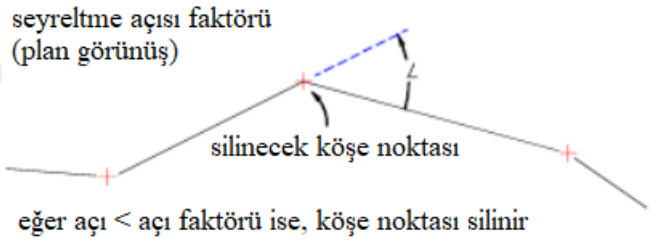
Şekil 3.34: Noktalar eksen üzerine yansıtılırken izlenebilen regresyon grafiği

Daha sonra, AutoCAD Civil 3D, noktaların dizilimi ve belirlenen *maksimum eğri tespit yarıçapı* ayarına dayanarak eğrileri (1) hesaplar. AutoCAD Civil 3D, örnekleme noktalarını lineer segmentler kullanarak birbirine bağlayarak eğriliği tahmin eder. Doğruluğu artırmak için, özellik çizgileri veya AutoCAD bileşenleri kullanılırken, ara örnekleme noktaları ya başlangıç verilerinden çıkarılır ya da her nokta çifti arasına eklenir. Noktaların dizisi bu ayarı geçen bir yarıçapa sahipse, bu noktalar bir teğet (2) oluşturur. Teğetlerin görünür kesişim yeri (3), hizalama teğetlerinin kesişim noktasını belirler (Şekil 3.35). (Autodesk Civil 3D 2025 Help Document,2025)



Şekil 3.35: Maksimum kurp yarıçap ayarıyla eğrilerin yerleştirilmesi

Eksen oluşturulurken eleman boyunca oluşturulan köşe noktalarının sayısı seyreltme faktörüne göre azaltılır. Seyreltme faktörü, belirlenen açı toleransından daha az sapma gösteren köşe noktalarını dikkate almaz. Daha büyük bir sapma açısı, daha fazla noktanın seyreltilmesine neden olur. Açı toleransı açı birimleri ile ölçülür ve tamamlayıcı mesafeden az olmalıdır (Şekil 3.36) (Autodesk Civil 3D 2025 Help Document,2025).



Şekil 3.36: Eksen üzerindeki noktaların seyreltilmesi

3.5. TEKNİK, EKOLOJİK VE SOSYAL YOL KRİTELERİNİN BELİRLENMESİ VE BIM ORTAMINA ENTEGRASYONU

Orman yollarının planlanmasında birçok teknik (geometrik) kriter mevcuttur. Ancak bu teknik kriterler yolun geçtiği konum, güzergâh, etkisi vs gibi kriterlere göre de ekolojik ve sosyal etkinlikler sağlayabilmektedir.

Kantartzis ve diğ. (2021) göre, orman planlama ve yönetiminde sosyal-ekolojik sistemlerle esnek ve uyumlu yaklaşımlara gerek duyulmaktadır. Bu yaklaşımlar, orman ekosistemlerinin dinamik ve karmaşık yapısını göz önünde bulundurarak daha sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesini sağlar. Daigle (2010), yolun çevresel sonuçlarının yönetim

kararlarında giderek daha önemli hale geldiğini ve uzmanlarda mevcut birçok araştırma bilgisi ve öneri bulunduğunu ifade etmiştir.

Orman yollarının planlanması ve inşasında çevresel duyarlılığın ön planda tutulması gerektiğini belirten Çalışkan ve Çağlar (2010), çevreye duyarlı bir orman yolu inşa edebilmek için teknik, ekonomik ve çevresel unsurların göz önünde bulundurulduğu bir yol tasarımının yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışkan (2013) ise sürdürülebilir orman yolu yönetiminin, proje sürdürülebilirliği, ekolojik uyumluluk, bitki örtüsü, habitatlar, biyolojik çeşitlilik, topoğrafi, hidroloji, erozyon riski ve toprak stabilitesi gibi faktörleri göz önünde bulundurmayı gerektirdiğini ifade etmiştir.

Arıcak ve Özer Genç (2018), orman yollarının farklı değişkenlerini puanlama sistemi ile değerlendirerek teknik verimliliğin uzun zaman dilimlerinde en iyi şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımayı amaçlamıştır. Bu puanlama sistemi, yol tasarımında dikkate alınması gereken birçok faktörü kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

Pentek ve diğ. (2005), Hırvatistan'da mevcut bir yol ağına CBS uygulayarak nicel bir analiz gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde, Heralt (2002) Romanya'daki çalışmasında yol ağı tasarımının sadece maliyetlere değil, aynı zamanda mevcut orman yollarının yerel dağılımı, peyzaj deseni ve hidroloji ve toprak özellikleri gibi diğer faktörlere de bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu faktörlerin dikkate alınması, daha dengeli ve çevre dostu yol ağlarının oluşturulmasını sağlar.

Laurance ve diğ. (2015), kötü planlanmış veya uygulanmış yolların birçok çevresel, ekonomik ve sosyo-politik soruna neden olabileceğini belirtmiştir. Etkili bir şekilde konumlandırılan ve inşa edilen yolların ekonomik büyüme ve sosyal entegrasyon için olumlu sonuçlar sağlayabileceğini ve yerel üreticiler için daha büyük kentsel pazarlara erişim imkânı sunabileceğini belirten Hettige (2006) ve Bryceson ve diğ. (2008), yol projelerinin dikkatli bir planlama sürecine tabi tutulmasının önemine dikkat çekmişlerdir.

Sonuç olarak, orman yolları ormancılık faaliyetlerinin temel altyapısını oluşturmakta ve ormanlara önemli çevresel zararlar verebilmektedir. Bu nedenle, orman yollarının planlanması ve inşasında dikkatli ve özenli bir yaklaşım benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Optimizasyon ile güzergâh tayini ve farklı alternatifler arasında seçilen kriterlere göre en iyi

güzergahı seçmek yolların planlaması ve inşası aşamasında çok faydalı araçlardır. Böyle seçim yapılırken seçilebilecek kriter sayısı yüzlerce olabilir.

CRITIC metodu kullanılarak yapılan ekolojik, teknik ve sosyal değerlendirme sırasında, her bir kriterin değerlerinin olumlu yönü (maksimum veya minimum) tabloda açıkça belirtilmiştir. Bu detaylı değerlendirme, her bir kriterin proje üzerindeki spesifik etkisini ve önemini ortaya koymakta, böylece en iyi yol alternatifinin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Bu tezde ele alınan orman yolları için kriter seçimi özellikle zorlayıcı olmuştur çünkü birçok kriterin hem olumlu hem de olumsuz etkileri bulunmaktadır.

Örneğin, kazı seviyesinin dik olması, daha az çevre tahribatı ile sonuçlanabilirken, aynı zamanda heyelan riskini artırarak çevresel zararlara yol açabilir. Bu nedenle, CRITIC metodunu kullanırken, her kriterin pozitif ve negatif yönlerini ayrı ayrı değerlendirip, bu ikilemi yönetmek zorunda kalınmıştır. Bu süreçte, kazı seviyesinin dikliği ekolojik olarak pozitif bir özellik olarak seçildi çünkü bu çalışmada çevresel tahribatın minimize edilmesi öncelikli hedefler arasındaydı. Bu kararlar, kriterlerin değerlendirilmesine objektif bir yaklaşım getirirken, aynı zamanda karar verme sürecinin karmaşıklığını ve bu tür çelişkili durumların yönetilmesi gerekliliğini de vurgulamaktadır.

Teknik kalite analizini yaparken, yoldaki ortalama düşey kurb uzunluğu, ortalama yatay kurb yarıçapı, yol eğimi, hız, geçilen dere sayısı, kıvrımlılık ve dolambaçlılık faktörleri, yolun oturma alanındaki toprak cinsi, eksen uzunluğu, inşaat alanı büyüklüğü, kazı ve dolgu seviye yükseklikleri, ters eğim sayısı ve kazı/dolgu dengesi gibi çeşitli teknik kriterler dikkate alınmıştır. Ekolojik analizde ise, toprak cinsi dışındaki tüm bu kriterler göz önünde bulunurken, sosyal analizde yol eğimi, hız, geçilen dere sayısı, kıvrımlılık ve dolambaçlılık faktörleri, eksen uzunluğu ve inşaat alanı büyüklüğü öne çıkmaktadır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Teknik, ekolojik ve sosyal açıdan yol kalite analizden dikkate alınan kriterler

Kriter	Birim	Teknik Açıdan	Ekolojik Açıdan	Sosyal Açıdan
Düşey kurb uzunluğu	metre	X	X	-
Yatay kurb yarıçapı	metre	X	X	-
Boyuna yol eğimi	%	X	X	X
Proje tasarım hızı	km/sa	X	X	X
Dere geçiş sayısı	adet	X	X	X
Dolambaçlılık faktörü	oran	X	X	X
Kıvrımlılık faktörü	oran	X	X	X
Kum alanı	m^2	X	-	-
Yol ekseni uzunluğu	m	X	X	X
İnşaat alanı	m^2	X	X	X
Kazı şevi eğimi	oran	X	X	-
Ters eğim sayısı	adet	X	X	X
Ortalama dolgu yüksekliği	m	X	X	-
Ortalama kazı yüksekliği	m	X	X	-
Kazı/Dolgu dengesi	oran	X	X	-
Balçıklı kil alanı	m^2	X	-	-

Bu doktora tezi kapsamında, orman yollarının teknik, ekolojik ve sosyal açılardan değerlendirilmesi için 16 farklı kriter kullanılmıştır. Bu kriterlerden 14'ü ekolojik değerlendirme için, 7'si ise sosyal değerlendirme için kullanılmıştır. Kriterlerin teknik, ekolojik ve sosyal açılardan pozitif veya negatif katkıları değerlendirilmiştir. Ancak, her bir kriterin sonucu baskın olarak hangi yönde etkilediğine karar verilmiş ve tersi yöndeki etkiler dikkate alınmamıştır.

Teknik açıdan, orman yollarının kalitesini etkileyen kriterler genellikle yolun fiziksel durumu, güvenlik ve kullanılabilirlik gibi faktörleri içerir. Örneğin, yolun genişliği, eğimi gibi teknik özellikler, yolun taşıma kapasitesini, sürüş güvenliğini ve erişilebilirliğini etkileyebilir.

Ekolojik açıdan, kriterler genellikle orman ekosistemine, biyoçeşitliliğe ve su kaynaklarının korunmasına odaklanır. Orman yollarının inşası ve bakımı sırasında doğal habitatlara olan etkileri, erozyon kontrolü, habitat koruma önlemleri gibi faktörler ekolojik değerlendirmenin bir parçası olabilir.

Sosyal açıdan, kriterler genellikle yerel toplulukların ve kullanıcıların ihtiyaçlarını, ekonomik etkileri ve yerel kültürel mirası değerlendirir. Yolun topluluklar arası erişilebilirliği, ekonomik faydaları, yerel işgücü istihdamı gibi faktörler sosyal değerlendirmenin odak noktası olabilir.

Her bir kriterin teknik, ekolojik ve sosyal açılardan nasıl etki yaptığı ve BIM ortamına nasıl entegre edildiği aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.5.1. Teknik açıdan etkili olan kriterler

Düşey kurp uzunluğu: Düşey kurp uzunluk değerinin büyük olmasının yol tasarımında teknik ve geometrik olarak sağladığı yararlar, özellikle görüş mesafesi ve güvenlik açısından önemlidir. Düşey eğimler, farklı yükseklikler arasındaki geçişleri yumuşatarak sürücüler için daha güvenli ve konforlu bir sürüş deneyimi sağlar. Büyük düşey uzunluğunun kullanılması, özellikle daha yüksek hızlarda seyahat ederken gereken görüş mesafesini sağlamada kritik bir rol oynar. Bu, sürücülerin yoldaki engelleri veya tehlikeleri daha erken fark etmelerine ve gerektiğinde güvenli bir şekilde durmalarına olanak tanır bu da özellikle uzun yolculuklarda sürücü ve yolcular için daha rahat bir deneyim sunar.

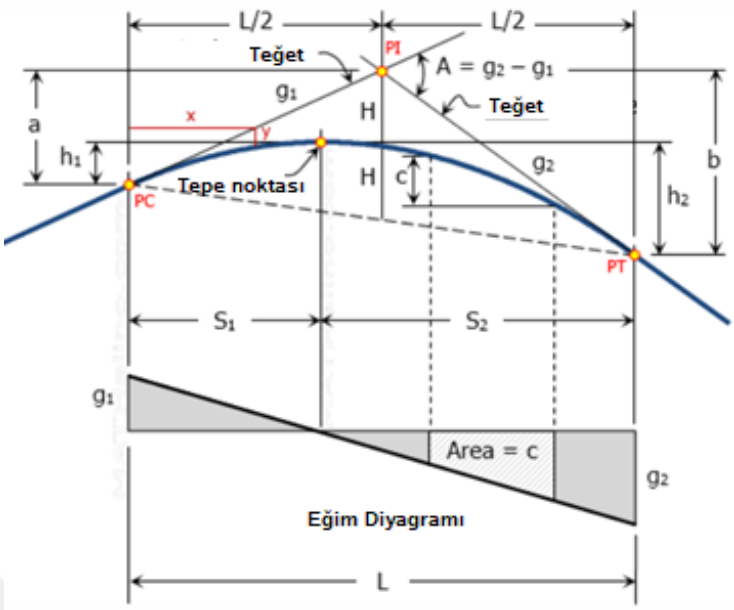
Düşey kurp uzunluğunun hesaplanmasında simetrik parabol geometrisi esas alınmaktadır (Şekil 3.37) (Denklem 3.4-3.5).

$$a = \frac{1}{2} g_1 L \tag{3.4}$$

$$b = \frac{1}{2} g_2 L \tag{3.5}$$

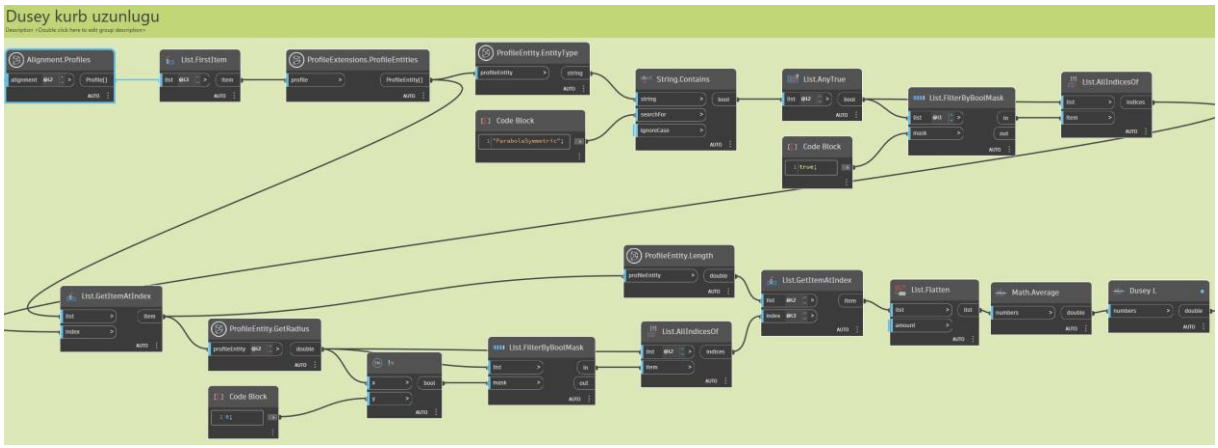
a ve *b*, parabolanın x ve y eksenine simetri gösteren ekseni boyunca olduğunda, parabolün genişlik ve yüksekliğini temsil eden parametrelerdir. "g_1 ve g_2" ise x ekseni etrafındaki ikinci dereceden terimlerin katsayısıdır.

L ise, parabolan düzleminin uzunluğu olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.37: Simetrik parabol geometrisi

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak çizimdeki yatay güzergâh (alignment) elemanının bilgileri alınmış ve o güzergaha ait düşey profil bilgileri elde edilmiştir. Burada simetrik parabol kurp değerlerinin ortalaması alınmış ve bulunan değer çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38: Ortalama düşey kurp uzunluk değerinin bulunması

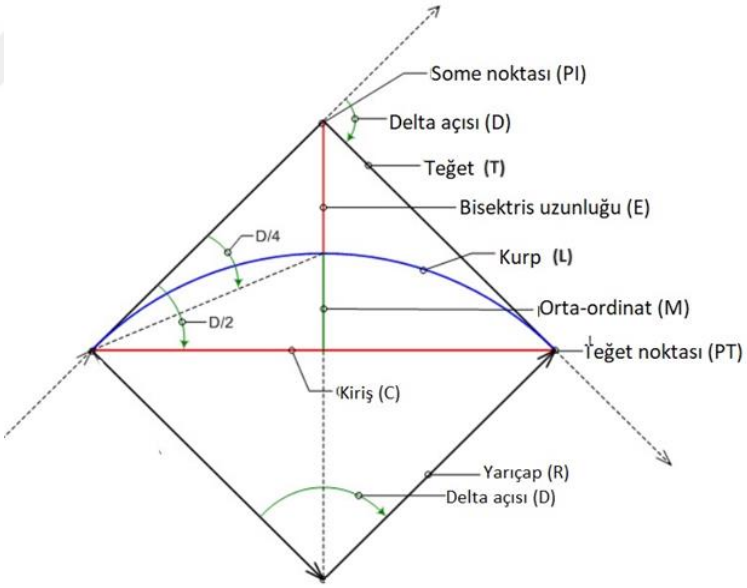
Yatay kurp yarıçap değeri: Yatay güzergahtaki kurp yarıçapları büyük olması, orman yollarında dönüşlerin daha kolay ve güvenli hale gelmesini sağlar. Özellikle büyük araçlar için manevra kabiliyetini artırarak yoldaki genel güvenliği iyileştirir (Akgul ve diğ, 2016). Bu

tasarım özelliği, ağır yük taşıyan araçların daha stabil bir şekilde hareket etmesine olanak tanır, bu da kazaların önlenmesine yardımcı olur ve yolların daha uzun süre dayanıklı kalmasını sağlar. Ayrıca yatay kurp uzunluğunun büyük ve geniş olması görme durma mesafesini azalttığından trafik kazaları açısından önem taşımaktadır (Nasiri, 2012). Yatay kurplar, yol eğimi, yol yüzeyinin durumu, yoldaki trafik durumu ve yol uzunluğu gibi bir taşıtın seyri ile ilgili işletme masrafları üzerinde etkili olan başlıca yol özelliklerindendir. Yatay kurp geometrisine (Şekil 3.39) ait parametrelerinin hesaplanmasında ise aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Denklem 3.6-3.7-3.8).

$$L = \frac{R12\pi}{360} \tag{3.7}$$

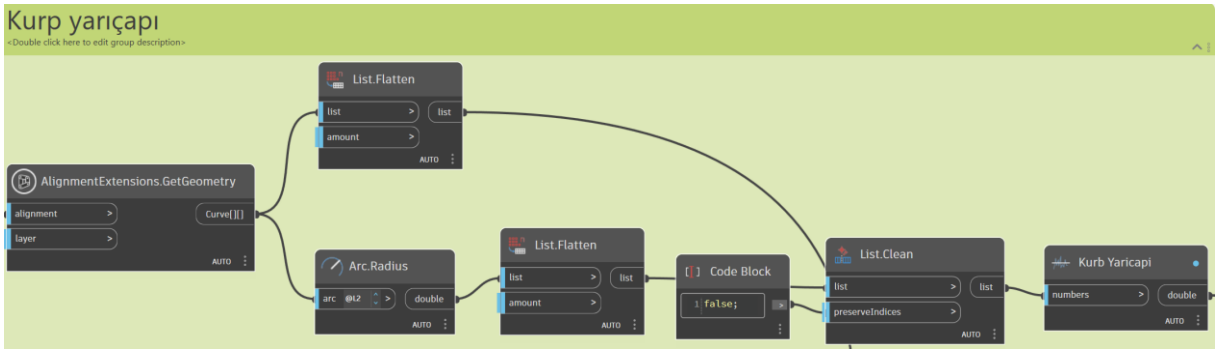
$$T = \frac{Rtan}{2D} \tag{3.7}$$

$$R = \frac{5729.78}{D} \tag{3.8}$$



Şekil 3.38: Yatay kurp geometrik elemanları

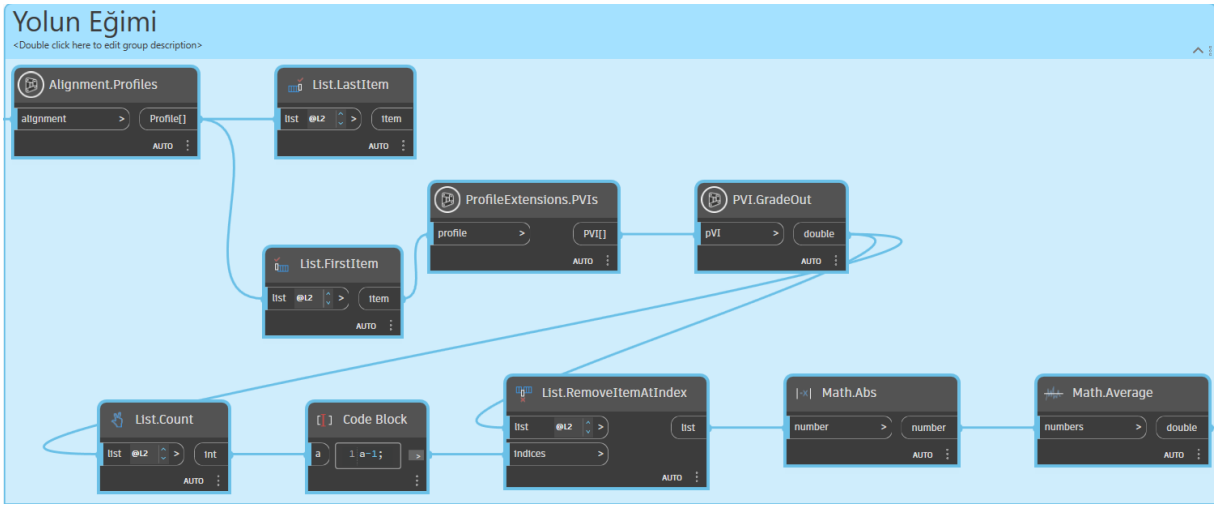
Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak çizimdeki yatay güzergâh (alignment) elemanının bilgileri alınmış tüm alt elemanlarına (teğetler ve kurplar) ait bilgiler elde edilmiştir. Kurp alt elemanlarının hepsinin yarıçap değerleri toplanarak ortalama alınmış ve bulunan değer çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40: Ortalama yatay kurp yarıçap değerinin hesaplanması

Yol boyuna eğimi: Orman yollarının boyuna eğimlerinin düşük tutulmasının teknik açıdan birçok faydası vardır. Düşük eğimler, yolların bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Daha düz yüzeyler, sürüş kalitesini artırır ve araçların yolda daha stabil ve kontrollü hareket etmesine yardımcı olur. Bu durum, özellikle zorlu hava şartları veya acil durumlarda yol güvenliğini artırır. Yüzey akışının, mümkün olduğunca akarsular veya drenaj kanallarından uzak bir şekilde boşaltılmasına izin verilmelidir (Ryan, 2004). Düşük eğimli yollar, suyun yoldan daha etkili bir şekilde yönlendirilmesini sağlar, böylece yüzey erozyonunu ve yolda su birikintilerinin oluşumunu azaltır. Bu özellikler, orman yollarının daha az bakım gerektirmesine ve daha uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur.

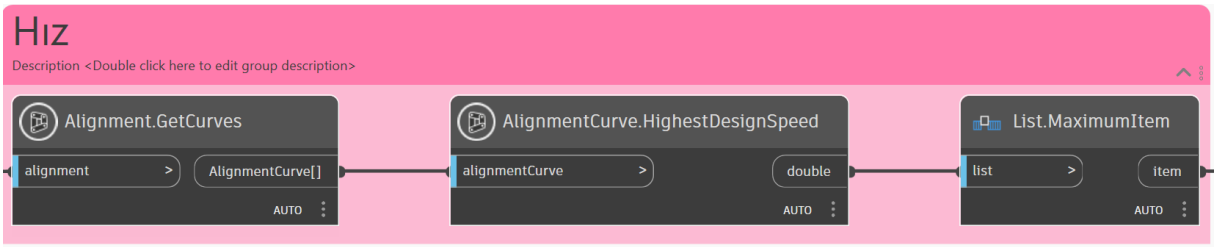
Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak çizimdeki yatay güzergâh (alignment) elemanının bilgileri alınmış ve o güzergaha ait düşey profil bilgileri elde edilmiştir. Profil alt elemanları listelenerek tümünün eğimleri toplanmış ve listedeki eleman sayısına bölünerek ortalama yol eğimi bulunmuştur. Bulunan değer çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.41).



Şekil 3.39: Ortalama yol eğimi değerinin hesaplanması

Yol tasarım hızı: Yüksek tasarım hızına sahip orman yolları, teknik açıdan birçok avantaj sağlar. Öncelikle, yüksek tasarım hızları, yolların daha hızlı ve akıcı kullanılmasına olanak tanır. Bu durum, özellikle acil durumlarda, örneğin orman yangınlarına müdahale sürelerini kısaltabilir. Ayrıca, genel taşıma süreçlerini hızlandırarak orman yönetimi ve kaynakların etkin kullanımını artırır. Yüksek tasarım hızı sayesinde, orman yolları daha verimli bir şekilde kullanılır, bu da zaman ve maliyet tasarrufu sağlar ve orman endüstrisi için önemli faydalar sunar.

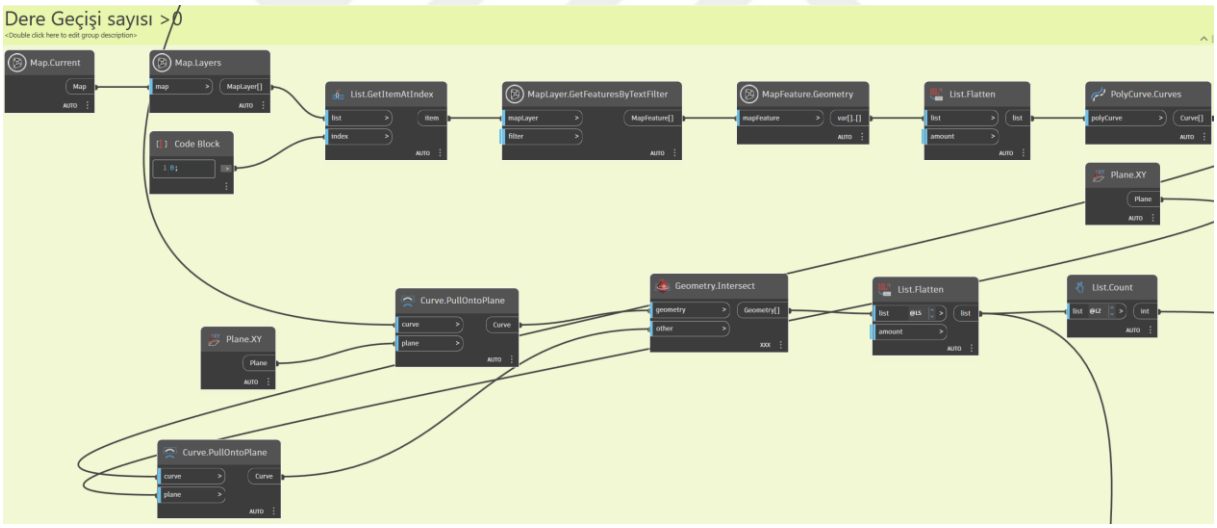
Infraworks yazılımında ilk optimizasyon yapılırken tasarım hızı bir kriter olarak kullanılsa ve BIM objesinin üzerine yazılsa da veri AutoCAD Civil 3D yazılımına alındığında tüm diğer bilgilerin aksine bu değer otomatik taşınmadığı için AutoCAD Civil 3D aliynmanına özelliklerinden tekrar tasarım hızı girilmiştir. Sonrasında Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak çizimdeki yatay güzergâh (alignment) elemanının bilgilerinden hız değeri alınmış ve bulunan değer çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.42).



Şekil 3.40: Yol hız değerinin bulunması

Dere geçiş sayısı: Dere yatağı üzerine inşa edilen bir yol, erozyon riski altındadır. Özellikle şiddetli yağışlar veya su taşkınları durumunda, yolun temelleri erozyona uğrayabilir ve yol yüzeyinde hasara yol açabilir. Yolun dere yatağı üzerine inşa edilmesi, taşkın riskini artırabilir. Yüksek su seviyeleri veya ani su taşkınları, yolu kapatabilir ve çevredeki alanlara zarar verebilir. Dere yatağı üzerine inşa edilen bir yolun bakımı ve onarımı genellikle daha maliyetlidir. Erozyon kontrolü, su drenajı sistemleri ve diğer önlemler, yolun uzun vadeli dayanıklılığını sağlamak için gereklidir ve bu da maliyetleri artırabilir. Dere geçişlerinin sayısı ve doğal drenaja müdahale en aza indirilmelidir (Ryan ve diğ., 2004).

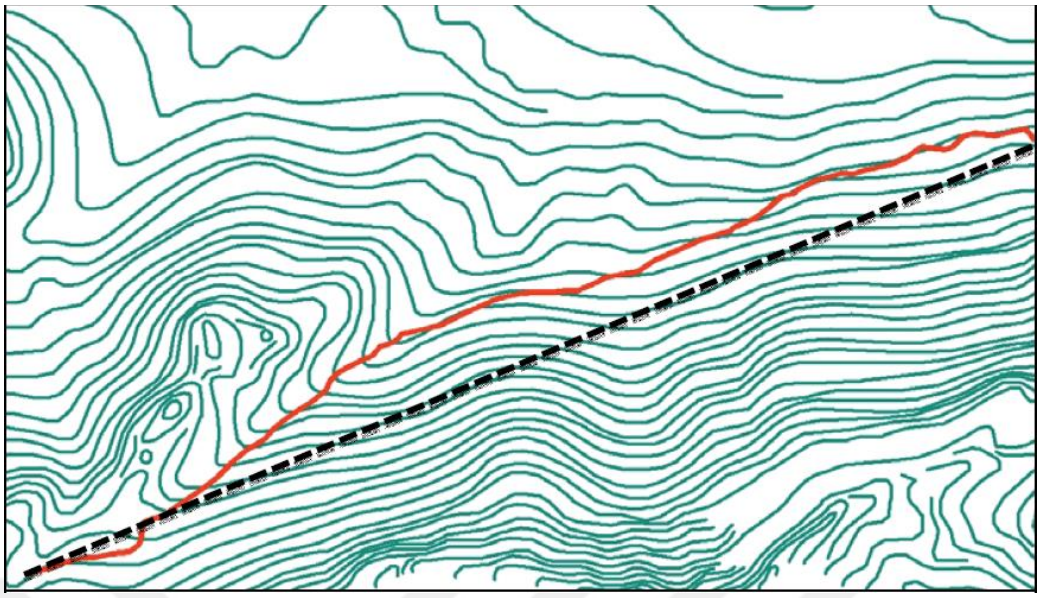
Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak çizimdeki CBS verilerinden dereler katmanı seçilmiştir. Yol ekseni de ayrıca seçilerek bütün bu elemanlar aynı düzlem (plane) seviyesine indirilmiştir. Eksen ve dere katmanındaki elemanları seti arasında "*geometry intersect*" kodu kullanılarak elemanların kesişimleri bulunmuş ve oluşan listedeki eleman sayısı çıktı değeri olarak kullanılmıştır (Şekil 3.43).



Şekil 3.41: Yolun üzerinden geçtiği toplam dere sayısının belirlenmesi

Dolambaçlılık faktörü: Dolambaçlılık faktörü yolun yatay güzergahının doğrusal olmamasının yarattığı olumsuz etkiyi hesaplamak için Denklem 3.9 kullanmıştır (Eker ve Ada, 2011) (Şekil 3.44).

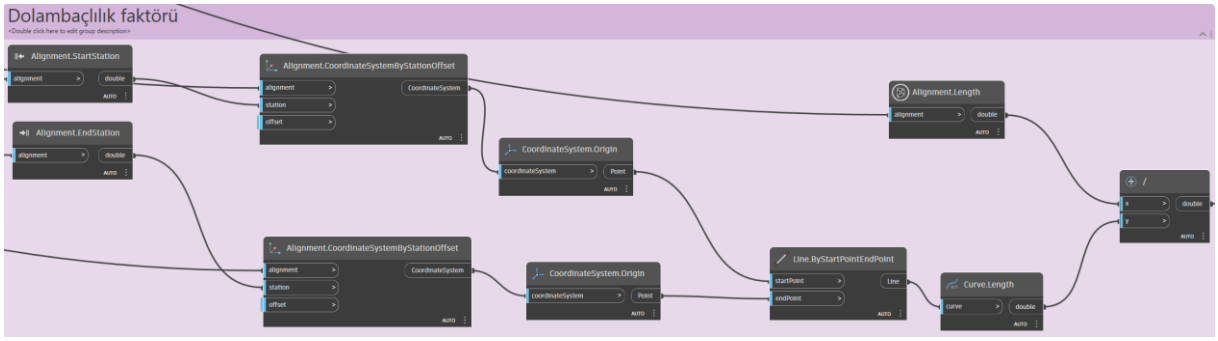
$$Dolambaçlılık\ faktörü = \frac{Yolun\ yataydaki\ gerçek\ uzunluğu}{İki\ nokta\ arasındaki\ doğrusal\ mesafe} \quad (3.9)$$



Şekil 3.42: Dolambaçlılık faktörü

Dolambaçlılık faktörü yüksek olan yollar, özellikle büyük ve ağır taşıtlar için artmış kazalara ve yoldan çıkma riskine yol açabilir. Virajlar, sürücülerin görüş alanını kısıtlar ve ani manevralar gerektirebilir, bu da özellikle kötü hava koşullarında veya gece sürüşlerinde kazalara neden olabilir ayrıca daha fazla bakım ve onarım gerektirebilir. Yol yüzeyindeki aşınma ve yıpranma, özellikle viraj noktalarında, normalden daha hızlı gerçekleşebilir. Bu durum, sürekli onarım ve bakım çalışmalarını zorunlu kılar. Virajlı yollar, taşıma süreçlerini yavaşlatır ve yakıt tüketimini artırır. Özellikle ağır yük taşıyan araçlar için bu durum, taşıma maliyetlerinin artmasına neden olur. Yolun virajlı olması, araçların hızlarını sürekli olarak ayarlamalarını gerektirir, bu da genel taşıma verimliliğini düşürür, aynı anda kullanabilecek araç sayısını sınırlayabilir. Bu, özellikle yoğun kullanılan orman yollarında trafik sıkışıklığına ve gecikmelere neden olabilir. Dolambaçlılık faktörünün yüksek olduğu yoğun yatay kurp sayısına ait yollar, özellikle acil durum araçları için erişimi zorlaştırabilir. Bu acil durum müdahale sürelerinin uzamasına ve potansiyel olarak daha fazla hasara yol açabilir.

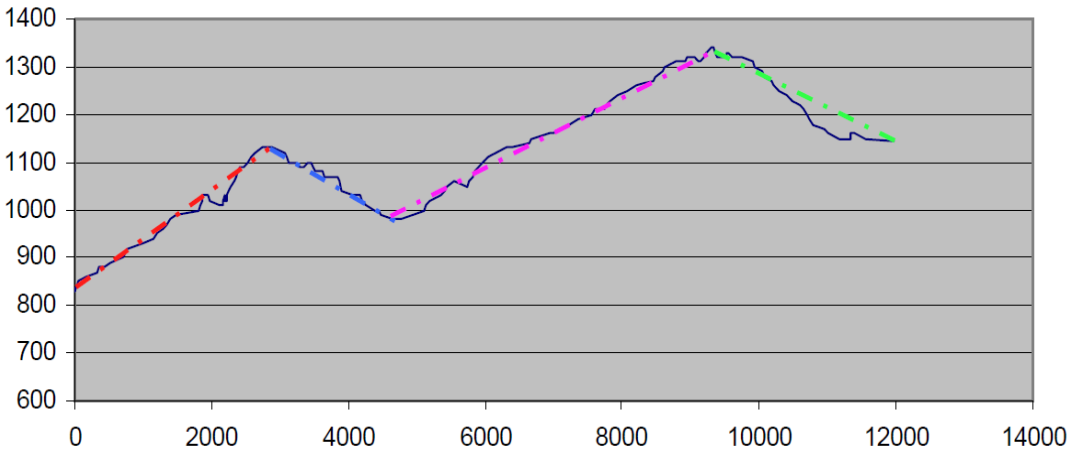
Dolambaçlılık faktörünü hesaplamak için Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak yatay güzergâh (alignment) elemanının başlangıç ve bitiş kilometrelerindeki noktalar bulunup birleştirilerek bir doğru elde edilmiştir. Gerçek güzergâh uzunluğu bu değeri böldürülerek faktör değeri bulunmuş ve çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.45).



Şekil 3.43: Dolambaçlılık faktörünün belirlenmesi

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 (Eker ve Ada,2011). Ancak, Öklit bağıntısına göre iki nokta arasındaki en kısa mesafe dik olan mesafedir (Eker, 2004) (Denklem 3.10). Orman yollarının boyuna kesitleri, bu eğimlerle ilişkilendirildiğinden dolayı kıvrımlı bir yapı gösterir (Şekil 3.46). Bu sapma, kıvrımlılık faktörü olarak hesaplanmıştır (Erdaş, 1997).

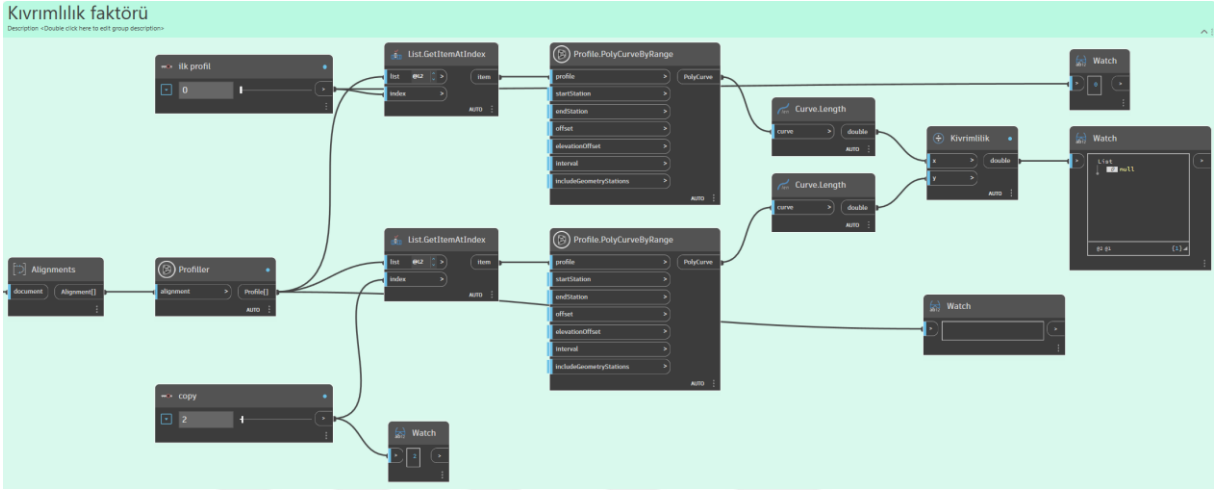
$$Kıvrımlılık\ faktörü = \frac{yolun\ gerçek\ uzunluğu}{kırmızı\ hat\ uzunluğu} \qquad (3.10)$$



Şekil 3.44: Kıvrımlılık faktörü

Düşey kurpların az olması, orman yollarında daha düz bir yol profili oluşturarak araçların hızını korumasını ve daha güvenli bir sürüş deneyimi yaşamasını sağlar. Kıvrımlılık faktörünün düşük olması, sürücüler için daha iyi görüş mesafesi ve daha az sürüş zorlukları sunar, bu da özellikle ağır taşıtlar için avantajlıdır.

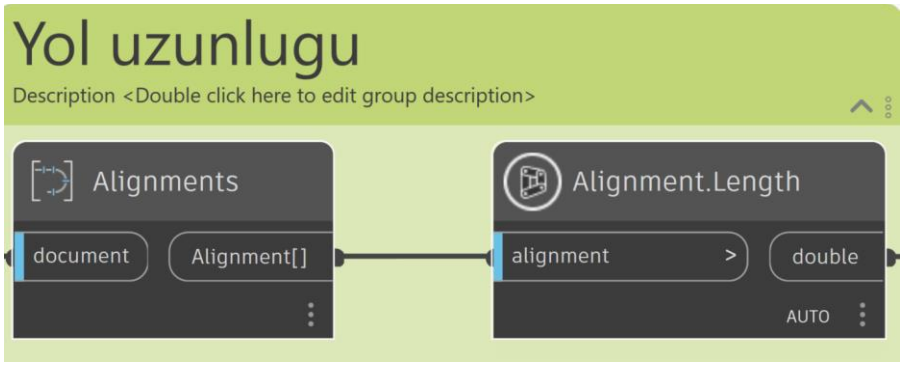
Kıvrımlılık faktörünü hesaplamak için öncelikle Civil 3D yazılımında profil elemanı kopyalanıp kurpları silinerek hesaba hazır hale getirilmiştir. Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak yatay güzergâh (alignment) elemanına ait profilin uzunluğu kopya profil uzunluğuna bölünerek faktör değeri bulunmuş ve çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.45: Kıvrımlılık faktörünün belirlenmesi

Yol ekseni uzunluğu: Uzun eksenli orman yolları, arazi kullanımını daha etkili bir şekilde optimize etmeye yardımcı olur. Yolun uzunluğu, daha fazla alanı kapsayacak şekilde düzenlenebilir, bu da orman kaynaklarına erişimi kolaylaştırır ve arazi üzerinde daha kapsamlı bir kontrol sağlar. Uzun yollar, yol yapım ve bakım süreçlerinde maliyet etkinliği sağlayabilir. Uzun hatlar, yol yapım malzemelerinin ve işçiliğin daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca, düzenli bakım ve onarım işlemleri, kısa ve karmaşık yollara kıyasla daha kolay ve maliyet etkin olabilir.

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak yatay güzergâh (alignment) elemanına ait uzunluk bilgisi alınmış ve çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.48).



Şekil 3.46: Yol eksen uzunluğunun hesaplanması

Toprak türü: Orman yollarının çevresel etkilerine verilen önem her geçen gün artmaktadır. Araştırmalar, toprak cinsi, heyelanlar, erozyon ve akarsu hidrolojisi üzerindeki olumsuz etkilerine odaklanmaktadır. Örneğin ıslak, dik arazideki büyük yol projeleri, toprak kaymaları, sel baskınları ve yol çökmesi gibi korkutucu risklerle karşı karşıyadır. Yol etki alanını belirleyen ekolojik faktörler türler, toprak ve su ile ilgilidir (Forman, 2000).

Orman yollarında toprak sınıflandırması, yolun kullanım amacına uygun, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde inşa edilmesi için hayati önem taşır. Bu karmaşık süreç, AASHTO, Toprak Sınıflandırma Sistemi ve Türkiye Kara Yolları Teknik Şartnamesi gibi standartlara dayanarak zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği ilkelerine göre gerçekleştirilir. Toprağın taşıma kapasitesi, stabilitesi ve drenaj özellikleri gibi fiziksel özellikleri, topoğrafya, iklim ve bitki örtüsü gibi faktörler göz önünde bulundurularak değerlendirilir.

Bölgeye özgü özel faktörler ve farklı sınıflandırma sistemleri de dikkate alınarak, uzman jeoteknik mühendisleri tarafından en uygun toprak sınıflandırması belirlenir. Bu sayede, yolun maliyet etkinliği, güvenliği ve uzun ömürlülüğü sağlanır.

Yol inşaatında toprak seçimi, yolun uzun ömürlülüğü, güvenliği ve maliyet etkinliği açısından kritik önem taşır. Bu bağlamda, kil ve kum gibi farklı toprak türlerinin özellikleri ve yol yapımındaki kullanımları hakkında bilgi sahibi olmak önemlidir.

Kil toprak türü:

- Elastik ve mukavemet parametreleri zamanla değişkenlik gösterir. Ve zamana bağlı olarak azalır.

- Kil üzerine oturan dolgularda zamana bağlı oturmalar olur (Bazı özel killerde konsolidasyon oturmanın tamamlanması 100 yıl kadar sürebilir). Bu durum iyileştirme gerektirebilir, bu da maliyet artışı yaratır.
- Dolgularda daha yatay şev eğimleriyle geçiş yapılmasını zorunlu kılar.
- Arazinin kısıtlı olduğu durumlarda daha büyük istinat yapılarına ihtiyaç duyulabilir.
- Su seviyesi varlığında durumu daha da olumsuzlaştırır.
- Yüksek plastisiteli kil ve su içeren "balçık" olarak adlandırılan malzeme yol yapımında tercih edilmez.

Kum toprak türü:

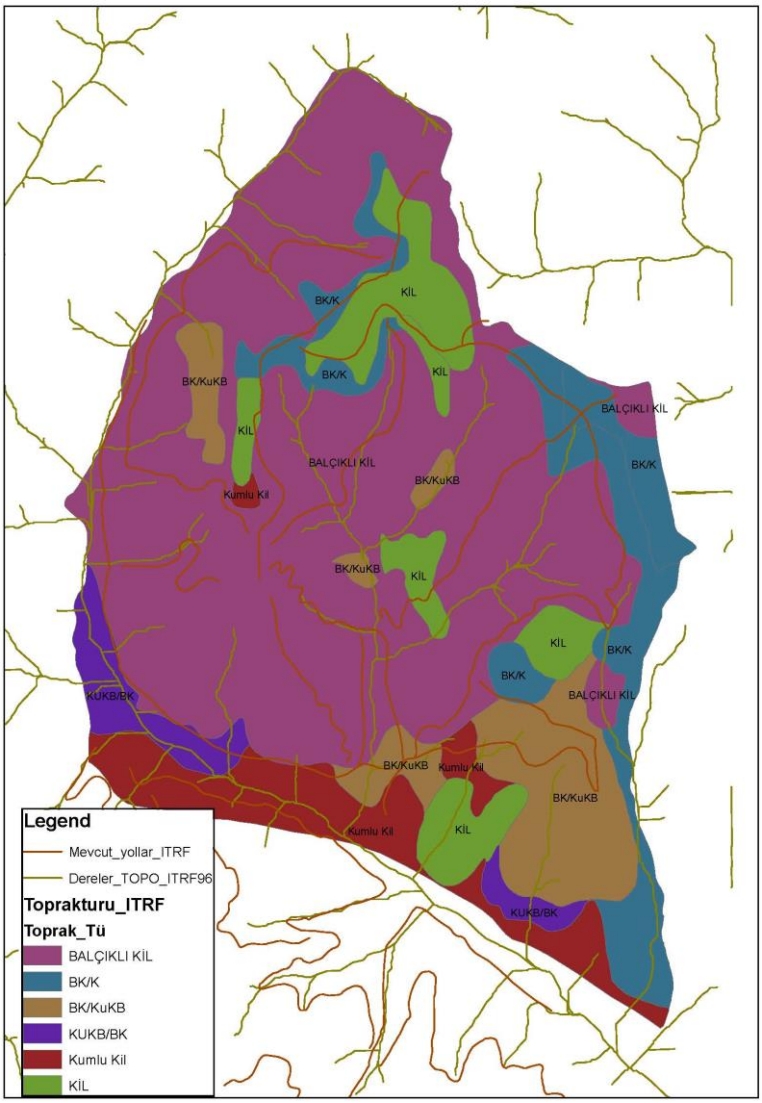
- Kile kıyasen mukavemet parametreleri daha yüksektir ve uzun dönemde daha stabildir.
- Yarma şevlerinde daha iyi sonuçlar verir. Daha dik şevlerle geçilebilir. Yarattıkları düşük etkiden dolayı daha ince istinat yapılarına gerek duyulur.
- Dolgular için daha uygundur ve zamana bağlı oturmalar daha azdır ve kısa sürede tamamlanır.
- Daha dik şev eğimleriyle geçiş yapılabilmesine imkân verir.

Yol inşaatında kil yerine kum tercih edilmesinin temel sebebi, kilin zamanla mukavemet ve elastiklik parametrelerinde düşüş göstermesi ve dolgularda oturmalara neden olmasıdır. Kum ise daha stabil ve uzun ömürlü bir malzemedir ve yarma şevlerinde daha iyi sonuçlar verir.

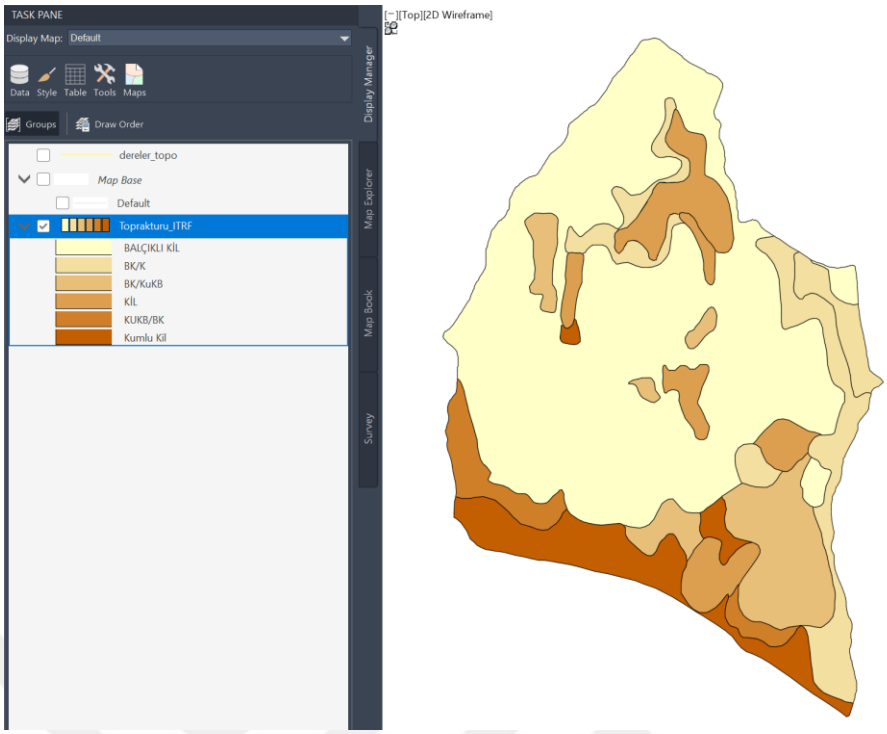
Bu sebeple kullanılan veri seti içinde olan 6 farklı toprak cinsi iyiden kötüye doğru aşağıdaki tablodaki gibi sıralanmıştır ve buna göre aralarından en tercih edilen toprak cinsi kumlu kil en tercih edilmeyeni ise balçıklı kil olarak belirlenmiştir (Tablo 3.4) (Şekil 3.49- 3.50).

Tablo 3.4: Kullanılan toprak türleri

Sıralama	Toprak Türü	Kullanılan Kısaltma
1	Kumlu Kil	KuK
2	Kumlu Kil Balçık Balçıklı Kil	KUKB/BK
3	Kil	K
4	Balçıklı Kil/ Kumlu Kil Balçık	BK/ KUKB
5	Balçıklı Kil/ Kil	BK/K
6	Balçıklı Kil	BK



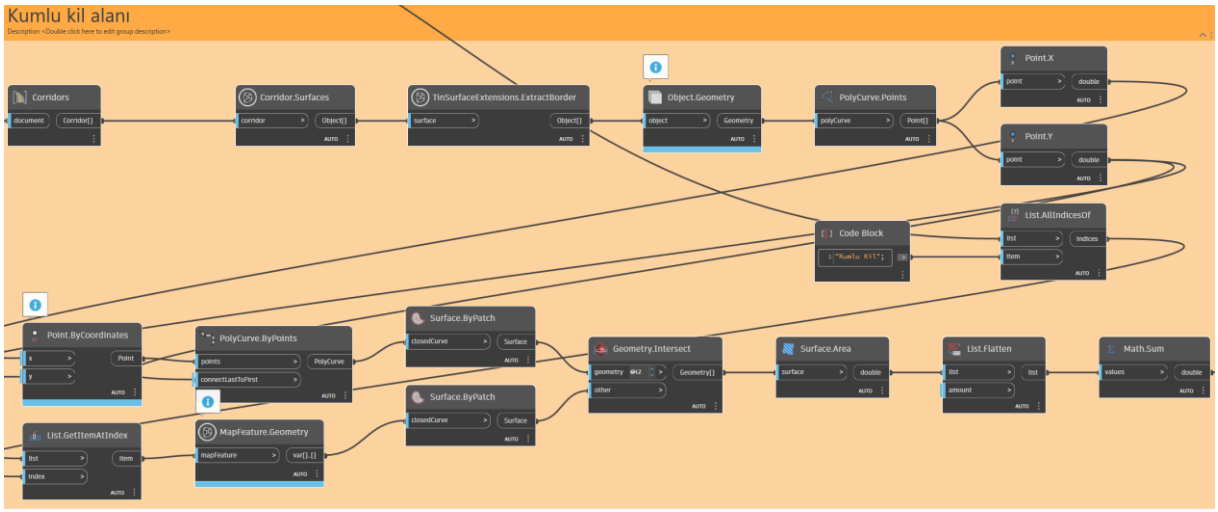
Şekil 3.47: Araştırma alanına ait toprak türü haritası



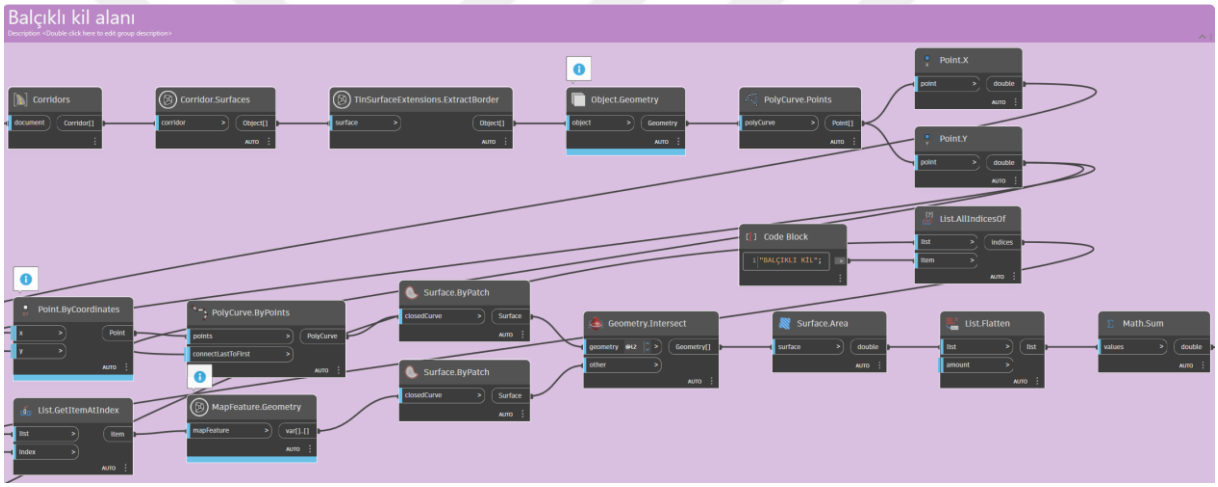
Şekil 3.48: Toprak türü CBS şematik haritası

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak koridor modelinden oluşturulan koridor yüzeyinin dış sınırı alınarak bundan Dynamo polycurveleri oluşturularak bu elemanlardan ilk Dynamo yüzeyi "*surface.patch"* kodu kullanılarak oluşturulmuştur. Sonra çizimin içinde olan CBS verisi katmanlarından toprak türünden tüm kumlu kil poligonları seçilmiş ve aynı yöntemle bir yüzey daha oluşturulmuştur. Sonrasında "*geometry.intersect"* kodu kullanılarak iki yüzey arasındaki kesişim alanları bulunmuş ve toplam alan değeri hesaplanmıştır. Bu değer toplam kumlu kil alanı çıktısı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.51).

Balçıklı kil toprak türü içinde aynı işlemler yapılmıştır. Bir önceki hesaplanamadan tek farkı çizimin içinde olan CBS verisi katmanlarından toprak türünden tüm balçıklı kil poligonları seçilmiş ve bunlardan yüzey oluşturulmuştur. Kesişim alanları toplamı değeri balçıklı kil alanı çıktısı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.52).



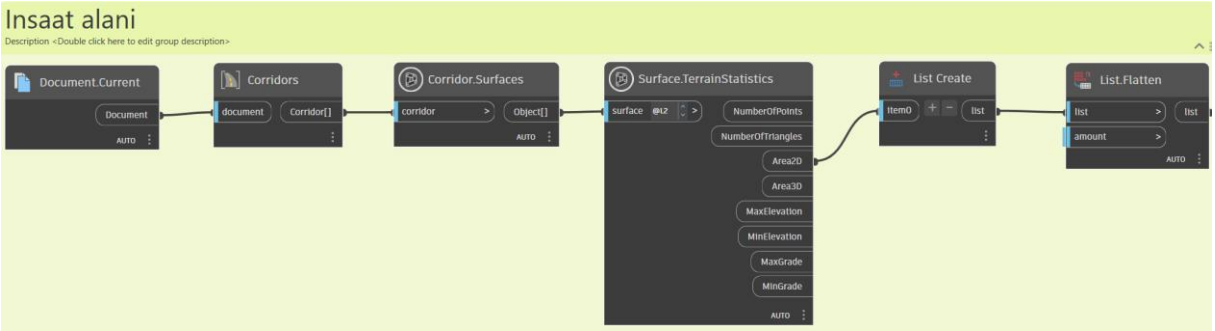
Şekil 3.49: Yol oturum alanındaki kumlu kil toprak türü alanının hesaplanması



Şekil 3.50: Yol oturum alanındaki balçıklı kil toprak türü alanının hesaplanması

İnşaat alanı: Geniş bir inşaat alanı, mühendislerin ve tasarımcıların daha esnek bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Daha geniş alanlar, daha iyi dönüş yarıçapları, daha geniş şeritler ve acil durum şeritleri gibi özellikler eklemeyi mümkün kılar. Geniş bir alanda yol yapımı sırasında, daha etkili drenaj sistemleri kurulabilir. Bu, özellikle yağışın bol olduğu bölgelerde yol güvenliği ve uzun ömürlülük açısından önemlidir. Geniş inşaat alanları, yol kenarında daha fazla boşluk olmasını sağlayarak, araçların olası bir kazada durabileceği alanlar oluşturur. Bu, genel trafik güvenliğini artırabilir. Gelecekteki genişletmeler veya bakım çalışmaları için gerekli alanın sağlanması, yolun daha uzun ömürlü olmasını ve daha az trafik kesintisi ile yenilenmesini sağlayabilir.

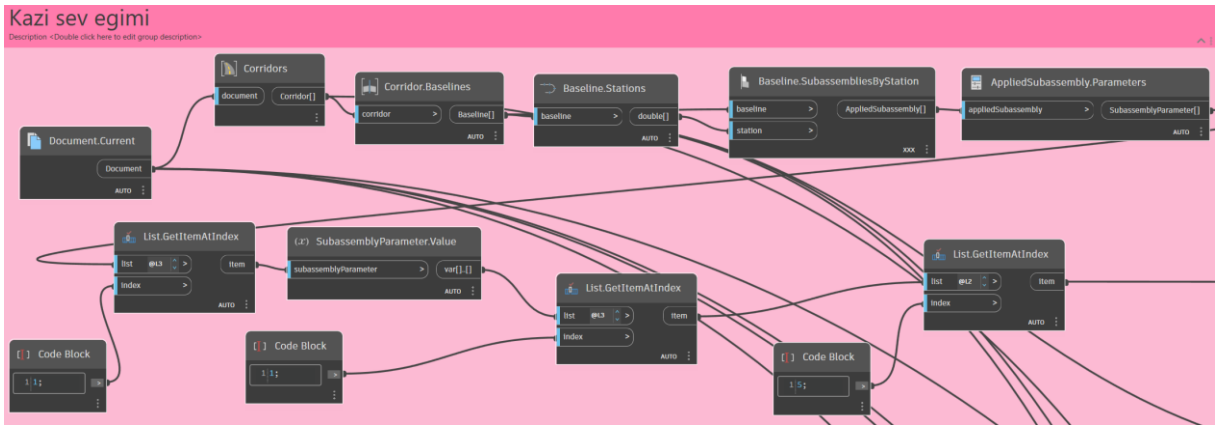
AutoCAD Civil 3D yazılımı ile oluşturulan orman yolunda koridor özelliklerine gidilerek koridor yüzeyi oluşturulmuştur. Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak bu koridor yüzeyi elemanına ait yüzey alanı bilgisi "*istatistikler*" bölümünden alınmış ve çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.53)



Şekil 3.51: İnşaat alanı bilgisinin alınması

Kazı şevi eğimi: Dik kazılar, yamaçların stabilitesini bozabilir, bu da heyelan ve toprak kaymaları riskini artırır. Özellikle yağışlı dönemlerde suyun yamaç materyalini doyurması ve ağırlık artışı nedeniyle bu durum daha da tehlikeli hale gelebilir (Reid ve Dunne, 1984). Ayrıca, yamaç stabilitesinin bozulması sonucu oluşabilecek düşmeler ve taş düşmeleri, yol güvenliğini doğrudan tehlikeye atabilir (Ramos-Scharrón ve MacDonald, 2007). Kazı şev eğimlerinin düşük olduğu (yatay/düşey) bölgelerde erozyon kontrolü zorlaşır. Toprak, suyun etkisiyle daha kolay hareket edebilir ve bu, yoldan aşağı doğru büyük miktarda sedimentin hareket etmesine yol açabilir. Erozyon, yolun temelini zayıflatabilir ve bakım maliyetlerini artırabilir (Luce ve Black, 1999). Kazıların dik bir eğimde olması, inşaat sürecini zorlaştırır ve genellikle daha fazla mühendislik çözümü, destekleyici yapılar ve stabilizasyon teknikleri gerektirir. Bu da projenin toplam maliyetini önemli ölçüde artırabilir. Güvenli ve stabil bir yol inşa etmek için ek önlemler alınması gerekir (Forman ve Alexander, 1998).

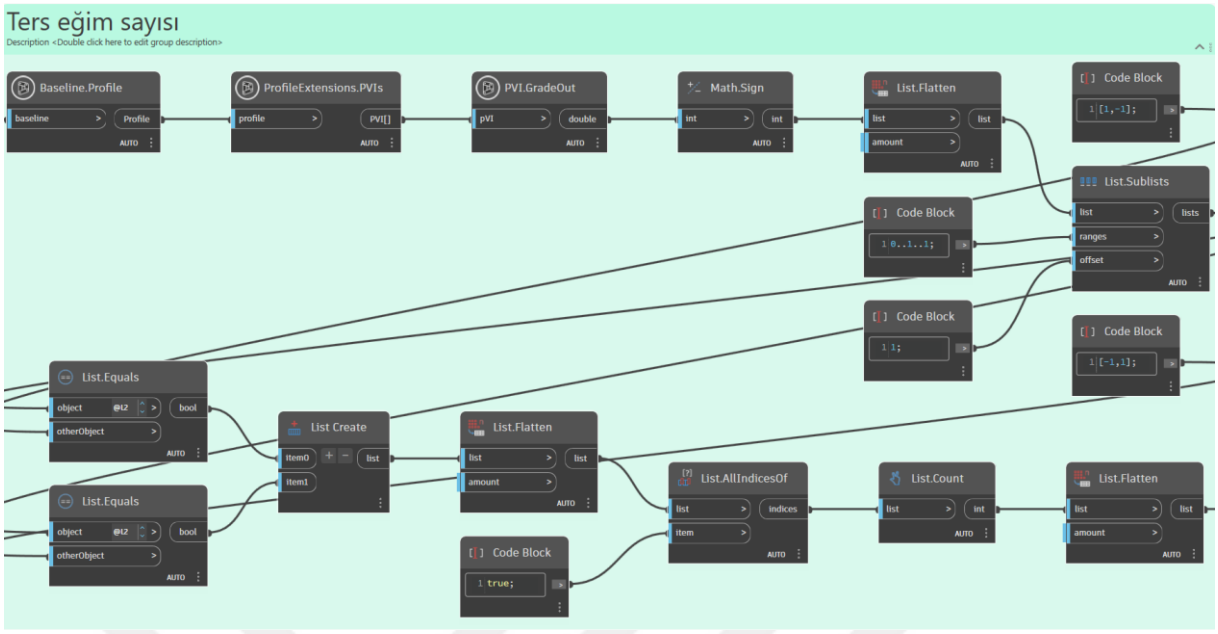
Tez kapsamında kullanılan örneklerde her bir alternatif için yol boyunca kazılarda tek bir şev değeri kullanılmıştır. Bunlar her bir koridor modelini oluşturulan "*subassembly*" elemanlarında *"cut slope*" değeri olarak girilmiştir. Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak bu değer çizimden alınmış ve çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.54)



Şekil 3.52: Kazı şevi eğiminin hesaplanması

Ters eğimlerin sayısı: Ters eğim, bir yolda ardışık olarak bir yükseltiden sonra tekrar bir alçalışın olması durumudur. Bu durum, araçların sürekli olarak yükseklik kazanıp kaybetmesine ve böylece fazladan enerji harcamasına neden olur. Araçlar yokuş yukarı çıktığında potansiyel enerji kazanır, ancak bu enerji yokuş aşağı inerken tekrar kaybedilir. Ters eğimli yollarda bu döngü sıkça tekrarlandığı için, gereksiz enerji harcaması artar ve yakıt tüketimi yükselir. Ters eğimler, araçların motor ve fren sistemleri üzerinde ekstra yük oluşturur. Sürekli iniş ve çıkışlar, özellikle ağır taşıtlarda fren sistemlerinin daha hızlı aşınmasına yol açabilir. Ters eğimli yollar, taşıma sürelerini ve dolayısıyla işletme maliyetlerini artırır. Taşıma araçlarının sıklıkla hız kesmesi ve tekrar hızlanması, genel taşıma verimliliğini düşürür. Ters eğimler, özellikle yoğun trafikte, araç akışının düzensizleşmesine ve hız dalgalanmalarına neden olabilir. Bu durum, trafik sıkışıklığına ve kazalara zemin hazırlayabilir. Ters eğim bulunduğunda, bir defa ulaşılan yükseklik tekrar kaybedilir ve bu da hareket enerjisinin yitirilmesine yol açar. Yollarda ters eğimin tesiri, aynı uzaklıkta bir defa ters eğimli ve bir defa da ters eğimsiz yapılan işlerin farkı olarak saptanabilir. Ormancılıkta taşıma şekli ve yüküne bağlı olarak, yollarda belirli koşullarda uygulanacak düz eğim ve ters eğim değerlerine kısıtlamalar getirilmiştir. Bu eğimlere kısıtlama getirilmesinin nedenleri arasında teknik olanaklar, taşıma maliyetleri ve yol bakım ve onarım giderleri bulunmaktadır.

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı kullanılarak tüm düşey somelerden çıkan pozitif ve negatif değerler listelenmiştir. *"List.sublist"* kodu kullanılarak ikili alt listeler oluşturulmuştur. Bu listelerde farklı (+) ve (-) işaret içeren listelerin eleman sayısı bulunmuş ve çıktı değeri olarak alınmıştır (Şekil 3.55)



Şekil 3.53 : Yol boyunca olan ters eğim sayısının hesaplanması

Kazı ve dolgu yükseklikleri: Yüksek dolgu ve derin kazılar, yolun yapısal bütünlüğünü ve stabilitesini etkileyebilir. Yüksek dolgu yükseklikleri, özellikle eğimli ve kararsız zeminlerde, yolun zamanla oturmasına ve hatta çökmesine neden olabilir. Derin kazılar ise yol kenarlarında heyelan ve yamaç kaymaları riskini artırabilir. Bu durumlar, yolların güvenliğini ve kullanım ömrünü olumsuz etkileyebilir (Reid ve Dunne, 1984; Ramos-Scharrón ve MacDonald, 2007). Büyük ölçekli kazı ve dolgu işlemleri, proje maliyetlerini ve yönetim zorluklarını artırabilir. Yüksek dolgu gerektiren projelerde, uygun dolgu malzemesinin temini ve taşınması ek maliyetler yaratabilir. Ayrıca, bu tür projelerde erozyon kontrolü ve yamaç stabilizasyonu gibi ek tedbirler alınması gerekebilir, bu da toplam inşaat maliyetini artırır.

Kazı ve dolgu yüksekliklerinin hesaplanmasında Denklem 3.11 kullanılmıştır:

$$\Delta_h = h_{\text{design}} - h_{\text{existing}} \tag{3.11}$$

h_{design}: Tasarım yüzeyinin yüksekliği.

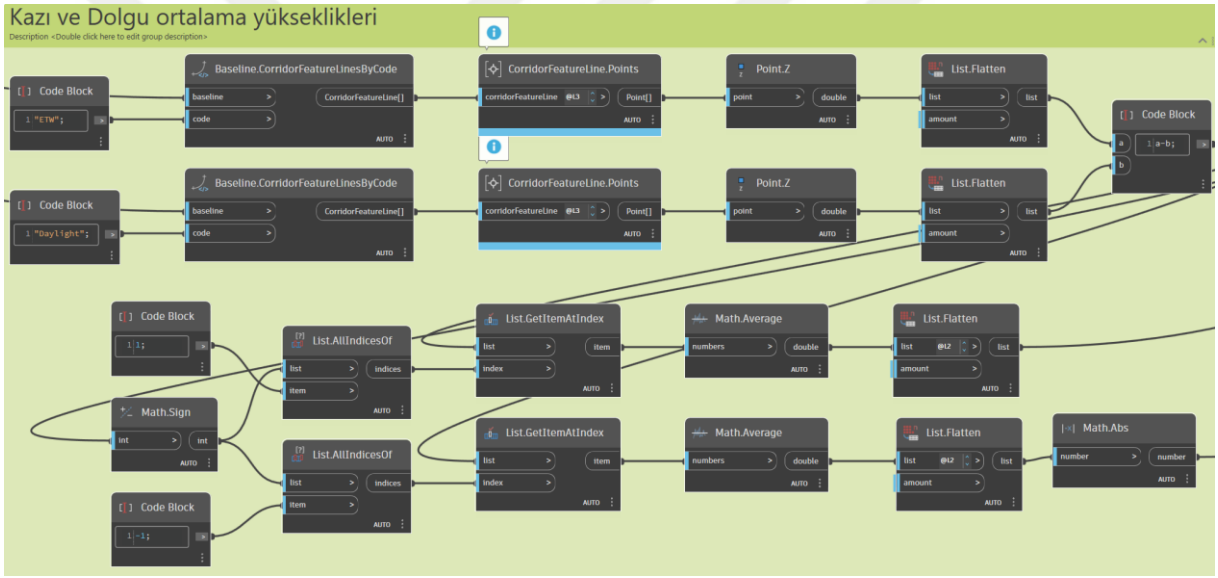
h_{existing}: Mevcut yüzeyin yüksekliği.

Δ_h: 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 denklem, 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.

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı ile Corridor elemanlarından "ETW" (yol kenarı) ve "Daylight" (şev dibi) standart kodları çekilmiştir. Her istasyona denk gelecek şekilde birbirlerinden çıkarılan değerlerden pozitif olan değerler dolgu yüksekliklerini göstermektedir. Ortalamaları alınarak ortalama dolgu yüksekliği belirlenmiştir. Negatif değerler ise kazı değerleridir. Onların da öncelikle ortalaması alınmış ve sonra mutlak değerleri kullanılarak ortalama kazı yüksekliği hesaplanmıştır (Şekil 3.56).

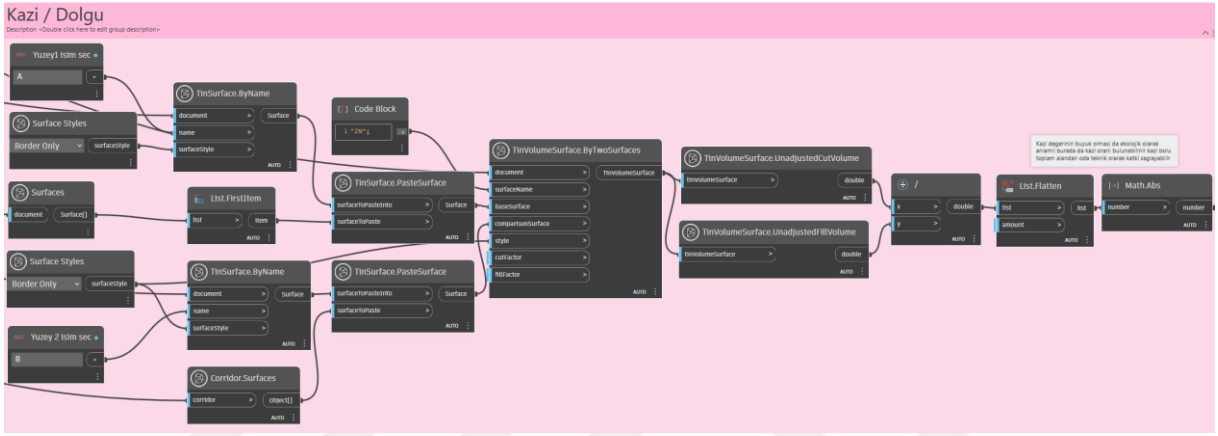


Şekil 3.54 : Kazı ve dolgu ortalama yüksekliklerinin hesaplanması

Kazı/Dolgu dengesi: Orman yolu inşaatında proje planlamasının kritik öneme sahip olduğu ve doğru verilerin kullanılmasının tahmini maliyetler ile hakediş değerleri arasındaki farkları azaltabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, modern yöntemlerin kullanılması ve kazı miktarlarının doğru belirlenmesi, orman yolu inşaatlarının daha verimli ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayabilir (Acar ve Karabacak, 2012). Kazı ve dolgu işlemleri, yolun temelinin sağlamlığını ve uzun vadeli stabilitesini etkiler. Dengeli bir kazı ve dolgu miktarı, yolda eşit yük dağılımı sağlayarak yolu daha dayanıklı hale getirir. Aşırı kazı yapılan yerlerde yol temeli zayıflayabilir, aşırı dolgu yapılan yerlerde ise temelde oturma ve çökme riski artar. Bu durumlar, yolların bakım maliyetlerini artırır ve kullanım ömrünü kısaltır. Dengeli kazı-

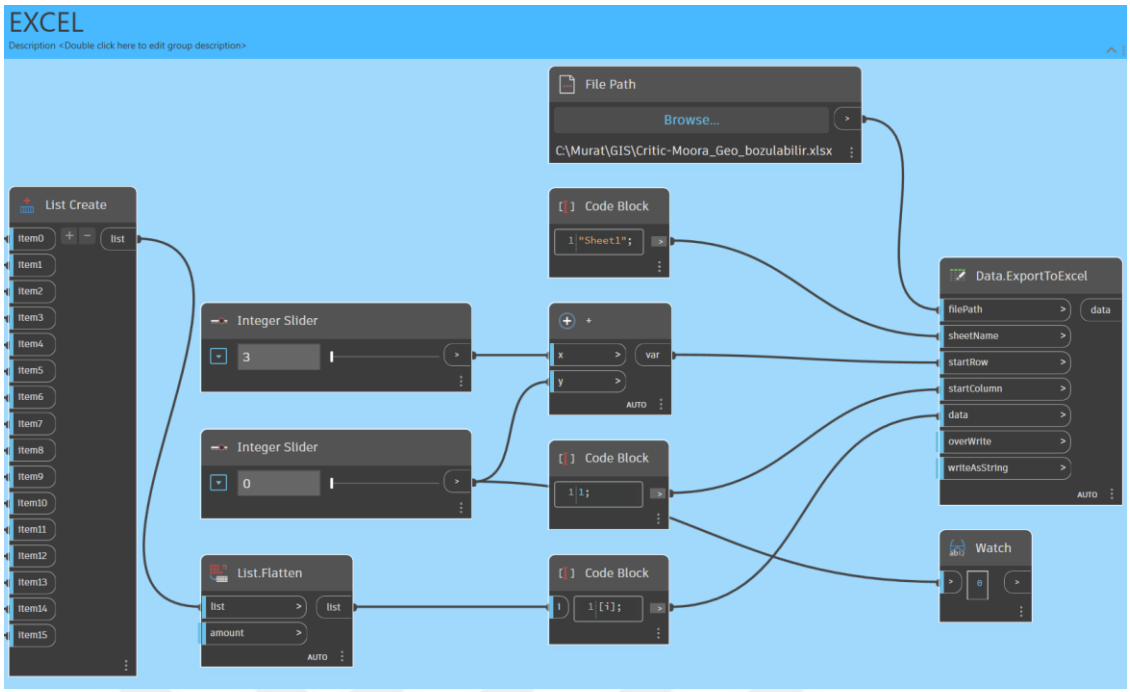
dolgu işlemleri, yol yapım projelerinde malzeme ve işçilik maliyetlerini optimize eder. Yerinde malzeme kullanımını maksimize ederek, dışarıdan malzeme getirme ve fazla malzeme çıkarma ihtiyacını azaltır. Bu da projenin toplam maliyetini düşürür ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar.

Autodesk Dynamo for Civil 3D yazılımı ile oluşturulan *"volume surface"* elemanları kullanılarak kazı-dolgu hacimleri hesaplanmıştır. Toplam kazı değeri toplam dolgu değerine bölünerek bulunan değerin mutlak değeri alınarak çıktı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.57)

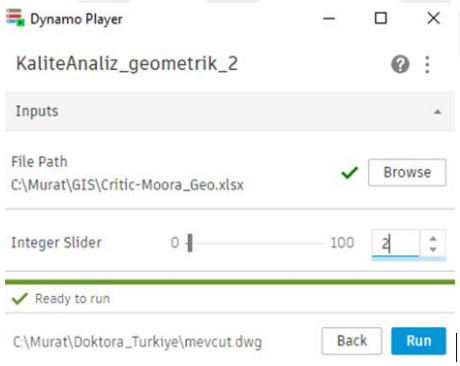


Şekil 3.55 : Kazı/dolgu oranının hesaplanması

Tüm hesaplanan çıktı değerleri "*list.create"* kodu yardımıyla birleştirilir ve "*data.exporttoexcel"* kodunun data bölümüne veri girdisi olarak tanıtılır. Ana kodun kullanıcı için iki adet girdi yeri vardır. İlki verilerin dışarıya atılacağı Excel dosyasının klasörünü seçmek diğeri ise kullanıcının koridor ile ilgili bilgileri hangi satıra yazacağıdır. Kod Autodesk Dynamo for Civil 3D arayüzünde aktarılır (Şekil 3.58- 3.59).

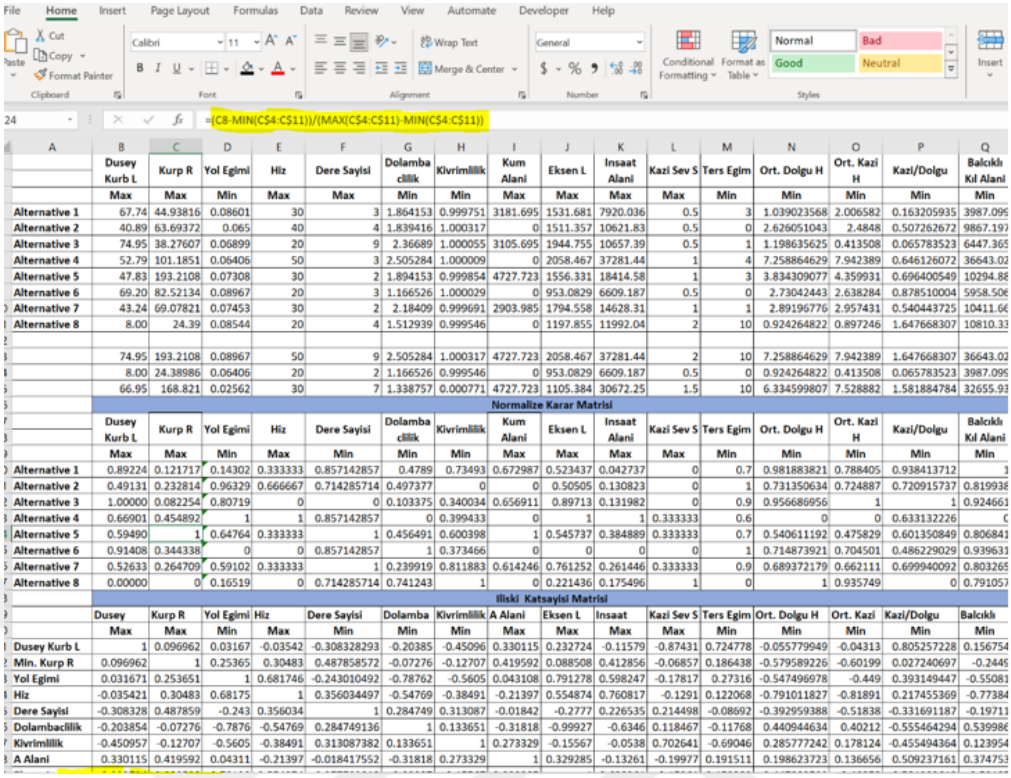


Şekil 3.56: Alınan verilerin Excel yazılımına atılması



Şekil 3.57: Dynamo player arayüzü

Verilerin yazıldığı excel dosyası CRITIC ve MOORA yöntemleri bölümünde anlatılan denklemlere göre hazırlanmış bir dosyadır. Alternatif yollardan birisini içeren çizim dosyası açılıp yukarıdaki bölümde anlatılan muhtelif gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra Dynamo Player'ın Run tuşuna basıldığında veriler seçilen Excel dosyasının kullanıcı tarafında seçilen satırına yazılır ve bu sayede aynı anda farklı Excel sayfalarında bulunan teknik, ekolojik ve sosyal anlamda en kaliteli yolu bulmak için hazırlanan denklemler sayesinde her farklı açıdan alternatifler en iyiden en kötüye doğru sıralanır (Şekil 3.60).



	Dusey Kurb L	Kurp R	Yol Egimi	Hiz	Dere Sayisi	Dolamba cilik	Kivrimlilik	Kum Alani	Eksen L	Insaat Alani	Kazi Sev S	Ters Egim	Ort. Dolgu H	Ort. Kazi H	Kazi/Dolgu	Balcıklı Kıl Alani
	Max	Max	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Min
Alternative 1	67.74	44.93816	0.08601	30	3	1.864153	0.999751	3181.695	1531.681	7920.036	0.5	3	1.039023568	2.006582	0.163205935	3987.095
Alternative 2	40.89	63.69372	0.065	40	4	1.839416	1.000317	0	1511.357	10621.83	0.5	0	2.626051043	2.4848	0.507262672	9867.197
Alternative 3	74.95	38.27607	0.06899	20	9	2.36689	1.000055	3105.695	1944.755	10657.39	0.5	1	1.198635625	0.413508	0.065783523	6447.365
Alternative 4	52.79	101.1851	0.06406	50	3	2.505284	1.000009	0	2058.467	37281.44	1	4	7.258864629	7.942389	0.646126072	36643.02
Alternative 5	47.83	193.2108	0.07308	30	2	1.894153	0.999854	4727.723	1556.331	18414.58	1	3	3.834309077	4.359931	0.696400549	10294.88
Alternative 6	69.20	82.52134	0.08967	20	3	1.166526	1.000029	0	953.0829	6609.187	0.5	0	2.73042443	2.638284	0.878510004	5958.506
Alternative 7	43.24	69.07821	0.07453	30	2	2.18409	0.999691	2903.985	1794.558	14628.31	1	1	2.89196776	2.957431	0.540443725	10411.66
Alternative 8	8.00	24.39	0.08544	20	4	1.512939	0.999546	0	1197.855	11992.04	2	10	0.924264822	0.897246	1.647668307	10810.33
	74.95	193.2108	0.08967	50	9	2.505284	1.000317	4727.723	2058.467	37281.44	2	10	7.258864629	7.942389	1.647668307	36643.02
	8.00	24.38986	0.06406	20	2	1.166526	0.999546	0	953.0829	6609.187	0.5	0	0.924264822	0.413508	0.065783523	3987.095
	66.95	168.821	0.02562	30	7	1.338757	0.000771	4727.723	1105.384	30672.25	1.5	10	6.334599807	7.528882	1.581884784	32655.93

Normalize Karar Matrisi

	Dusey Kurb L	Kurp R	Yol Egimi	Hiz	Dere Sayisi	Dolamba cilik	Kivrimlilik	Kum Alani	Eksen L	Insaat Alani	Kazi Sev S	Ters Egim	Ort. Dolgu H	Ort. Kazi H	Kazi/Dolgu	Balcıklı Kıl Alani
	Max	Max	Min	Max	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Min
Alternative 1	0.89224	0.121717	0.14302	0.333333	0.857142857	0.4789	0.73493	0.672987	0.523437	0.042737	0	0.7	0.981883821	0.788405	0.938413712	1
Alternative 2	0.49131	0.232814	0.96329	0.666667	0.714285714	0.497377	0	0	0.50505	0.130823	0	1	0.731350634	0.724887	0.720915737	0.819938
Alternative 3	1.00000	0.082254	0.80719	0	0	0.103375	0.340034	0.656911	0.89713	0.131982	0	0.9	0.956689656	1	1	0.924661
Alternative 4	0.66901	0.454892	1	1	0.857142857	0	0.399433	0	1	1	0.333333	0.6	0	0	0.633132226	0
Alternative 5	0.59490	1	0.64764	0.333333	1	0.456491	0.600398	1	0.545737	0.384889	0.333333	0.7	0.540611192	0.475829	0.601350849	0.806841
Alternative 6	0.91408	0.344338	0	0	0.857142857	1	0.373466	0	0	0	0	1	0.714873921	0.704501	0.486229029	0.939631
Alternative 7	0.52633	0.264709	0.59102	0.333333	1	0.239919	0.811883	0.614246	0.761252	0.261446	0.333333	0.9	0.689372179	0.662111	0.699940092	0.803265
Alternative 8	0.00000	0	0.16519	0	0.714285714	0.741243	1	0	0.221436	0.175496	1	0	1	0.935749	0	0.791057

Iliski Katsayisi Matrisi

	Dusey	Kurp R	Yol Egimi	Hiz	Dere Sayisi	Dolamba	Kivrimlilik	A Alani	Eksen L	Insaat	Kazi Sev S	Ters Egim	Ort. Dolgu H	Ort. Kazi	Kazi/Dolgu	Balcıklı
	Max	Max	Min	Max	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Min
Dusey Kurb L	1	0.096962	0.03167	-0.03542	-0.308328293	-0.20385	-0.45096	0.330115	0.232724	-0.11579	-0.87431	0.724778	-0.055779949	-0.04313	0.805257228	0.156754
Min. Kurp R	0.096962	1	0.25365	0.30483	0.487858572	-0.07276	-0.12707	0.419592	0.088508	0.412856	-0.06857	0.186438	-0.579589226	-0.60199	0.027240697	-0.2449
Yol Egimi	0.031671	0.253651	1	0.681746	-0.243010492	-0.78762	-0.5605	0.043108	0.791278	0.598247	-0.17817	0.27316	-0.547496978	-0.449	0.393149447	-0.55081
Hiz	-0.035421	0.30483	0.68175	1	0.356034497	-0.54769	-0.38491	-0.21397	0.554874	0.760817	-0.1291	0.122068	-0.791011827	-0.81891	0.217455369	-0.77384
Dere Sayisi	-0.308328	0.487859	-0.243	0.356034	1	0.284749	0.313087	-0.01842	-0.2777	0.226535	0.214498	-0.08692	-0.392959388	-0.51838	-0.331691187	-0.19711
Dolambacilik	-0.203854	-0.07276	-0.7876	-0.54769	0.284749136	1	0.133651	-0.31818	-0.99927	-0.6346	0.118467	-0.11768	0.440944634	0.40212	-0.555464294	0.539986
Kivrimlilik	-0.450957	-0.12707	-0.5605	-0.38491	0.313087382	0.133651	1	0.273329	-0.15567	-0.0538	0.702641	-0.69046	0.285777242	0.178124	-0.455494364	0.123954
A Alani	0.330115	0.419592	0.04311	-0.21397	-0.018417552	-0.31818	0.273329	1	0.329285	-0.13261	-0.19977	0.191511	0.198623723	0.136656	0.509237161	0.374753

Şekil 3.58: CRITIC ve MOORA yöntemleriyle karşılaştırılmanın yapıldığı ham Excel dosyası

3.5.2. Ekolojik açıdan etkili olan kriterler

Düşey kurp değerleri: Yol inşası sırasında daha az zemin müdahalesi, 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 topografik 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 (tesadüfen topraklar en sığ olan yerlerde) 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 kurp yarıçaplarının küçük olması, orman yollarının doğal araziye daha sıkı uyum sağlamasına olanak tanıyarak çevresel müdahaleyi azaltır. Bu tasarım, habitat bozulmasını ve arazi kullanımını minimize eder, böylece ekosistem üzerindeki

baskıyı azaltır. Yol tasarımında doğal topoğrafyayı mümkün olduğunca korumak, biyolojik çeşitliliği ve doğal habitatları koruma çabalarında önemli bir rol oynar.

Yol boyuna eğimi: Düşük boyuna eğimlerin orman yollarında çevresel olarak sunduğu faydalar hem erozyon kontrolü hem de doğal su döngüsünün korunması açısından önemlidir. Düşük eğimler, su akışını daha kontrollü bir şekilde yönetmeye yardımcı olur, bu da erozyonun azalmasına ve yol yapımında doğal drenajın korunmasına katkıda bulunur. Ayrıca, suyun doğal yollarla akmasını sağlayarak yakındaki su ekosistemlerinin korunmasına yardımcı olur. Özellikle orman yolları, suyun yol yüzeyinden hızla uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde tasarlandığında, yol yüzeyinin ve alt yapısının erozyona uğraması önlenmiş olur. Bu hem yolların ömrünü uzatır hem de çevresel bütünlüğü korur.

Yol tasarım hızı: Çoğu orman yolu yüksek hızda seyahat için tasarlanmadığından ve trafik hızı doğrudan ölüm oranı ile ilişkili olduğundan, orman yollarında büyük memeliler için doğrudan ölüm genellikle önemli bir faktör değildir (Lyon, 1984). Her yıl sayısız hayvan yollarda ölmesine rağmen, belgelenmiş yol ölümleri yalnızca Kuzey Amerika'daki birkaç nadir türün popülasyonlarını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır ve bu ölümler genellikle yüksek hızlı otoyollarda meydana gelmektedir (Forman ve Alexander, 1998).

Düşük tasarım hızları, orman yollarında yaban hayatı üzerindeki olumsuz etkileri azaltma konusunda önemli bir rol oynar. Düşük hız limitine sahip yollar, hayvanların yolları daha güvenli bir şekilde geçmelerine olanak tanır ve bu da araçlar ile yaban hayatı çatışmalarını minimize eder.

Dere geçiş sayısı: Yol yapımı ve kullanımı sırasında yüzey akışıyla taşınan çamur, yağ, yakıt, pestisitler ve diğer kirleticiler direkt olarak dere yataklarına karışabilir. Bu durum, suyun kimyasal bileşimini değiştirerek su kalitesini düşürür. Yollar, sucul organizmalar için kritik olan habitatları böler. Özellikle, balıkların ve diğer sucul canlıların üreme, beslenme ve göç etme yolları üzerinde engeller oluşturur. Bu, popülasyonların izole edilmesine ve genetik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Yolların dere yataklarından geçtiği bölgelerde, yağmur suyu ve eriyen karlar yolu kullanarak direkt olarak dereye ulaşır. Bu durum, normalden daha fazla erozyon ve sedimentasyon oluşturarak, sucul habitatları zararlı bir şekilde değiştirebilir. Yol yapımı sırasında doğal su yollarının değiştirilmesi, sel riskini artırabilir ve su akış rejimlerini bozabilir. Bu değişiklikler, sucul ekosistemlerin sağlığını olumsuz yönde etkiler. Yollar genellikle güneş ışığını absorbe ederek çevrelerine sıcaklık yayarlar. Bu sıcaklık, dere

sularının sıcaklığını artırabilir ki bu durum özellikle sıcaklık hassasiyetine sahip türler için tehlikeli olabilir. Akarsulara, tampon şeritlere ve kıyı bitkiliğine zarar vermekten kaçınılmalıdır (Ryan ve diğ., 2004) (Şekil 3.61).



Şekil 3.59: Planlamada dere- orman yolu ilişkisi (WSD of Natural Sources, Forest Roads)

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 kazı ve dolgu işlemleri azalır, bu da orman içi ekosistem üzerindeki stresi azaltır ve flora ile fauna için daha stabil bir ortam sağlar.

Kıvrımlılık faktörü: Kıvrımlılık faktörünün yüksek olması, orman yollarında daha az toprak ve doğal habitat bozulması anlamına gelir çünkü yol doğal arazi koşullarına daha uyumlu hale gelir. Bu, özellikle eğimli ve dağlık bölgelerde erozyonu ve yüzey akışını azaltarak su kalitesini koruma konusunda önemli faydalar sağlar. Yolun düzenlemesini arazinin topografyasıyla eşleştirerek, toprak işlerini en aza indirmelidir. Ryan ve diğ. 2004 yılında yaptığı çalışmasına göre, bu tür bir yaklaşım toprak stabilitesini artırır ve çevresel etkileri minimize eder. Ayrıca, kıvrımlılık oranı, orman yollarındaki hidrolik süreçler üzerinde de etkilidir. Örneğin, Kastridis (2020), orman yollarının yüzey akışını ve sediment taşınmasını azaltmak için uygun tasarım ve inşaat tekniklerinin önemine vurgu yapmaktadır. Orman yolu inşaatında kıvrımlılık faktörünün yüksek tutulmasının çevresel sürdürülebilirlik ve yol güvenliği açısından kritik olduğunu ifade etmektedir. Bu, su kalitesinin korunması, erozyonun azaltılması ve habitat bozulmasının minimize edilmesi gibi önemli çevresel faydalar sağlar.

Yol ekseni uzunluğu: Erişim yönetim programları geliştirilirken boz ayı mevsimsel habitat kullanımı dikkate alınmalı ve doğa rezervlerinde olası yabancı bitki istilalarını önlemek için yol

inşaatından kaçınılmalıdır (Daigle, 2010). Motorlu araçların yollar üzerindeki kullanımı, belirli alanlardaki vahşi yaşamın üreme fonksiyonlarına doğrudan müdahale etmektedir. Aynı zamanda yol yapılarından kaynaklanan dağılımlar, göçleri ve diğer hareketleri engeller (Bennett,1991). Orman sahaları içindeki uzun yollar habitat parçalanmasına, vahşi yaşam için yaşamsal alanların küçülmesine ve ekosistem bağlantılarının kopmasına neden olur. Ayrıca su akışını değiştirerek erozyon ve sedimentasyonu artırabilir. Daha kısa yollar, orman içine yapılan yapısal müdahalelerin miktarını azaltır. Bu, daha az ağaç kesimi ve habitat bozulması anlamına gelir. Kısa orman yolları, yol yapımı ve bakımı için gerekli enerji ve kaynak kullanımını azaltır. Bu, çevresel ayak izinin genel olarak azalması demektir. Yol yapım malzemelerinin, iş makinalarının ve taşımacılığın getirdiği çevresel yüklerin azaltılması, orman ekosistemlerinin daha iyi korunmasına imkân tanır. Daha az yapısal müdahale, ormanın doğal yapısını ve vahşi yaşam için gerekli olan koşulları korumaya yardımcı olur. Uzun eksenli yollar, vahşi yaşamın doğal davranışlarını ve göç yollarını daha az etkiler. Bu, hayvanların doğal yaşam alanlarında daha az rahatsız edilmesi ve ekolojik bütünlüğün korunması anlamına gelir.

İnşaat alanı: Büyük yol inşaatı alanlarının çevresel etkileri, kullanılan teknoloji ve yerel ekosistem özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Ancak genel olarak, büyük ölçekli yol inşaatlarının çevresel açıdan olumsuz etkileri olabilir. Yol inşaatları doğal habitatları böler ve ekosistemleri parçalar. Bu durum, özellikle belirli üreme koşullarına ihtiyaç duyan türler için zararlıdır (Çalışkan, 2013). Yol inşaatları sırasında artan sedimentasyon, yakın su gövdelerinde bulanıklığın artmasına neden olabilir. Bu durum, su kalitesini düşürür ve sucul yaşamı olumsuz etkiler. Yollar, orman ortamlarına gürültü kirliliği getirir ve bu da vahşi yaşamın doğal davranışlarını değiştirebilir. Özellikle gürültüye hassas türler, yollara yakın alanlardan kaçınabilir, bu da kullanılabilir habitatı daha da azaltır (Smith ve diğ., 2013). Yollar, toprağın sıkıştırılması, yüzey akış desenlerinin değişmesi ve yer altı su akışlarının bozulmasıyla doğal su akışını değiştirebilir. Bu, kuruyan topraklar ve değişen bitki örtüsü desenlerine yol açabilir (Çalışkan, 2013). Yolların negatif etkilerinden biri, inşaatlarındaki etkileri nedeniyle yamaç hidrolojisindeki değişiklikler sonucu orman alanlarının kaybıdır (Eker ve Aydın, 2014).

Kazı şevi eğimi: Yamaç kararlılığını etkileyen önemli faktörler arasında gözenek suyu basıncı, toprak dayanım parametreleri, yamaç dikliği ve derinliği bulunmaktadır (Eker ve Aydın, 2014). Kazı şev değerlerinin dikey eğime yakın olması, yolu daha dar bir alana sığdırarak çevredeki habitatın daha az bozulmasına olanak tanıyabilir. Bu yaklaşım, geniş alanların kullanımını minimize eder ve böylece doğal habitatların korunmasına katkıda bulunur. Yol yapımı için

gerekli toprak hareketinin azaltılması, özellikle büyük ormanlık alanlarda ekosistem üzerindeki baskıyı azaltabilir. Ayrıca, yolun daha az göze çarpan ve doğal peyzaja daha az müdahale eden bir şekilde entegre edilmesini sağlayabilir.

Ters eğimlerin sayısı: Ters eğimler bazen doğal topoğrafyaya daha uygun olabilir. Örneğin, doğal arazi eşyükselti eğrileri takip edilerek yapılan yollar, düz yollar yapmak için gereken büyük miktarda toprak hareketinden daha az çevreye zarar verebilir. Bu, habitat bozulmasını azaltabilir ve yerel ekosistemlere daha az müdahale edilmesini sağlar. Ters eğimler, suyun yol boyunca eşit olarak dağılmasını ve doğal drenaj hatlarına uygun bir şekilde akmasını sağlayabilir. Bu, erozyonu azaltabilir ve su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunabilir. Enerji tüketiminin azaltılması ve daha verimli taşıma yollarının kullanılması, ters eğimli yolların tasarlanmasında öne çıkarılabilecek bir diğer ekolojik yarardır. Araçların daha az yakıt tüketmesi, genel olarak karbon emisyonlarının düşmesine yardımcı olabilir.

Kazı ve dolgu yükseklikleri: Yüksek dolgu ve derin kazı işlemleri, geniş alanlarda doğal habitatları bozar ve ekosistemleri değiştirir. Bu, yerel flora ve fauna için önemli yaşam alanlarının kaybına neden olabilir, özellikle hassas veya endemik türler bu değişikliklerden olumsuz etkilenebilir (Forman ve Alexander, 1998). Büyük ölçekli kazılar ve dolgular, yüzey erozyonunu artırarak sedimentin yakın su kaynaklarına taşınmasına neden olabilir. Bu durum, su kalitesini düşürür ve sucul ekosistemler için olumsuz koşullar yaratır. Büyük ölçekli kazı ve dolgu işlemleri, erozyon ve sedimentasyon risklerini artırabilir. Yüksek dolgu alanları, özellikle yoğun yağışlar sırasında, aşırı yüzey akışına ve erozyona neden olabilir. Bu durum, yakındaki su kaynaklarına sediment taşınmasına ve su kalitesinin bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, derin kazılar, toprak stabilitesini bozarak yamaç erozyonunu tetikleyebilir. (Luce ve Black, 1999; Ramos-Scharrón ve MacDonald, 2007). Derin kazılar ve yüksek dolgular, yerel drenaj ve su akışını değiştirerek sel riskini artırabilir ve doğal su yollarını değiştirebilir. Bu tür değişiklikler, doğal su rejimlerini ve bölgedeki suyun kalitesini olumsuz etkileyebilir, aynı zamanda sel ve su baskını risklerini artırabilir. Büyük ölçekli kazı ve dolgu faaliyetleri, büyük miktarda karbon salınımı ile sonuçlanabilir. Bu işlemler için kullanılan ağır makinalar ve malzeme taşımacılığı, fosil yakıt tüketimini artırarak karbon ayak izini büyütür (Laurance ve diğ., 2009).

Kazı/Dolgu dengesi: Kazı ve dolgu miktarlarının dengeli olması, erozyon kontrolünde de kritik bir faktördür. Özellikle yağışlı ve eğimli alanlarda, yoldan aşırı malzeme çıkarılması veya fazla dolgu yapılması, su akışını değiştirebilir ve erozyonu artırabilir. Dengeli bir kazı ve dolgu

planlaması, suyun yol yapısını bozmadan doğal olarak akmasını sağlar, bu da erozyon riskini azaltır. Yol yapımında kazı ve dolgu işlemleri sırasında alınan ve yerleştirilen toprak miktarının dengelenmesi, çevresel etkiyi de önemli ölçüde azaltabilir. Doğal arazi eşyükselti eğrilerine uygun olarak yapılan kazı ve dolgu işlemleri, habitat bozulmalarını ve diğer çevresel zararları minimuma indirger. Ayrıca, malzeme taşıma ihtiyacını azaltarak karbon emisyonlarını düşürür ve inşaat süresini kısaltır. Yolun tasarımında, arazinin topoğrafyasına en uygun şekilde bir profil oluşturulup, toprak işleri en aza indirilmelidir (Ryan ve diğ., 2004).

3.5.3. Sosyal açıdan etkili olan kriterler

Yol boyuna eğimi: Düşük eğimli yollar, güvenlik açısından araç sürücülerine daha stabil ve kontrollü bir sürüş deneyimi sunarak kaza riskini azaltır. Aynı zamanda, insanlar için rekreasyon alanlarına daha erişilebilir bir yolculuk imkânı sağlar. Acil durumlarda ise, bu yollar acil durum hizmetlerinin bölgeye hızlı ve güvenli bir şekilde ulaşmasını sağlayarak müdahale sürelerini kısaltır. Ayrıca eğimin daha düşük olduğu yollarda orman ürünü taşımacılığında ağır yüklerin taşınması sırasında araçların daha stabil olmasını sağlanır, bu da taşıma kapasitesini artırır ve taşıma sürecinin verimliliğini iyileştirerek orman endüstrisi için de kritik bir rol oynar. Bu hem taşıma sürecinin verimliliğini iyileştirir hem de orman ürünlerinin piyasaya sürülmesini daha ekonomik hale getirir. Yol eğimi bir taşıtın seyri ile ilgili işletme masrafları üzerinde oldukça etkilidir. Orman yollarında uygulanan eğimler, taşıma işlemlerini etkiler. Eğimlerin uygun şekilde belirlenmesi ve uygulanması, taşıma araçlarının yükü taşırken daha verimli ve güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlar. Ayrıca, eğimlerin doğru ayarlanması, taşıma kapasitesini artırabilir ve nakliyat maliyetlerini düşürebilir. Orman yollarında eğimlerin doğru şekilde belirlenmesi, taşıma araçlarının güvenliği açısından kritiktir. Aşırı dik eğimler, araçların kontrolünü zorlaştırabilir ve kazalara neden olabilir. Bu nedenle, eğimlerin nakliyat güvenliği göz önünde bulundurularak belirlenmesi ve uygulanması önemlidir (Çağlar ve Acar, 2011).

Yol tasarım hızı: Hız limitlerinin düşük olması, yerel topluluklar için yolların daha güvenli hale gelmesini sağlar. Bu durum, özellikle yaya ve bisiklet kullanımı için daha güvenli alanlar yaratır ve sosyal etkileşimi teşvik eder. Aynı zamanda gürültü kirliliğini azalarak yaşam kalitesini yükselir.

Dere geçiş sayısı: Orman yolları, dereler üzerindeki köprülerle birleştiğinde, uzak ormanlık alanlara erişimi kolaylaştırır. Bu durum, yerel halkın orman kaynaklarına erişimini iyileştirir, ki bu da gıda, kereste ve diğer doğal kaynaklar için önemlidir. Köprüler, itfaiye, sağlık

hizmetleri ve diğer acil servislerin daha geniş bir alanı kapsamasını sağlar. Özellikle yangın gibi acil durumlarda, bu yollar yangın söndürme ekiplerinin yangına hızla müdahale etmesine ve kontrol altına almasına yardımcı olur.

Orman yolları ve köprüler, doğal güzelliklere erişimi artırarak turizm ve rekreasyon faaliyetlerini teşvik eder. Yürüyüş, kamp yapma ve doğa gözlemciliği gibi aktiviteler için gerekli altyapıyı sağlar. Köprüler, yerel ekonomilere destek olabilir. Orman ürünlerinin pazarlara ulaştırılmasını kolaylaştırır ve bu da yerel işletmeler ve orman endüstrisi için ekonomik fırsatlar yaratır.

Dolambaçlılık faktörü: Dolambaçlılık faktörünün yüksek olduğu, özellikle manzaralı yollar, turistler ve doğa severler için cazip olabilir. Bu yollar, motosiklet, bisiklet sürüşü veya sürücüler için benzersiz ve heyecan verici bir deneyim sunar. Ayrıca, bu yollar boyunca yer alan manzaralı duraklar ve piknik alanları, ziyaretçilere doğayla iç içe kalma fırsatı sunar. Bazı virajlı yollar, tarihi veya kültürel olarak önemli alanlardan geçebilir. Bu yolların korunması ve tanıtılması, yerel halkın kültürel mirasına olan bağlılığını ve bu alanların tarihine olan ilgiyi artırabilir. Doğal manzaraların ve sakin orman ortamlarının psikolojik faydaları iyi bilinmektedir. Yoğun yatay kurp içeren orman yolları, insanların stres atmasına ve fiziksel aktivite için motivasyon sağlamasına yardımcı olabilir. Orman yolları, orman ekosistemlerine erişimi iyileştirmek için inşa edilir ve manzara, hidrolojik işlev, arazi kullanımları ve özelliklerinde değişiklikler nedeniyle havzaların hidrolojik tepkisini değiştirebilir (Kastridis, 2020).

Kıvrımlılık faktörü: Yüksek sayıda düşey kıvrım, yolun estetik değerini artırabilir ve doğal manzarayla uyumlu bir sürüş deneyimi sunar. Bu, rekreasyonel kullanımı teşvik eder ve yerel halkın veya turistlerin bölgeyi keşfetmesine olanak tanır, böylece sosyal ve ekonomik faydalar sağlar.

Yol ekseni uzunluğu: Uzun orman yolları, uzak ve izole edilmiş toplulukların daha geniş alanlara erişimini sağlar. Bu gerek acil durum hizmetlerinin gerekse günlük ihtiyaçların karşılanmasında kritik bir rol oynar. Uzun yollar sayesinde, sağlık hizmetleri, eğitim olanakları ve pazar yerlerine ulaşım daha kolay ve hızlı hale gelir. Uzun orman yolları, doğal, tarihi ve kültürel öneme sahip alanlara erişimi sağlayarak bu alanların korunmasına ve tanıtılmasına yardımcı olur. Bu yollar sayesinde, yerel kültürel mirası daha geniş kitleler tarafından keşfedilebilir ve değerlendirilebilir. Orman yolları aynı zamanda yangın önleme ve kontrolü

için yangın yolları olarak da hizmet edebilir. (Simões ve diğ.,2022). Yol uzunluğu bir taşıtın seyri ile ilgili işletme masrafları üzerinde etkili olan başlıca yol karakteristiklerindendir. Orman yoluna yönelen odun kütlesinin dağılımı, dönüş noktalarının konumu ve sürükleme yollarının deseni, orman yolundaki toplam (kümülatif) trafik yükü ve taşınan miktarı, orman yolunun uzunluğuna bağlı olarak etkilenir (Potocnik ve diğ., 2005).

İnşaat alanı: Büyük bir inşaat alanı, orman yollarını kullanarak bölgeye erişmeye çalışan yerel topluluklar için geçici veya kalıcı erişim engelleri oluşturabilir. Bu durum, topluluk üyelerinin günlük aktiviteleri ve yaşam kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Örneğin, inşaat nedeniyle yolların kapanması, yerel halkın işlerine, okullara veya sağlık hizmetlerine erişimini zorlaştırabilir. Orman yöneticilerine, mevcut yolları kullanmaları, yeni yolları en aza indirmeleri ve endüstriyel kullanımdan sonra yolları kaldırmaları ve restore etmeleri önerilmektedir (Daigle, 2010). Orman yollarındaki büyük çaplı yol inşaat projeleri, çevresel ve sosyal endişeler nedeniyle yerel topluluklar arasında direniş veya tepki oluşturabilir. Yerel halkın projeye katılımı ve katkıda bulunma fırsatları, bu tür tepkileri azaltabilir ve daha sürdürülebilir çözümler üretilmesine olanak sağlayabilir. Projelerde topluluk katılımının teşvik edilmesi, sosyal kabul ve uyum sağlama açısından önemlidir (AASHTO, 2011). Yolların inşa edilmesi ve bakımı, sürdürülebilir ormancılık için kısa ve uzun vadede çevresel ve sosyal sorunlara neden olabilir (Najafi ve diğ., 2008). Yol inşaat projeleri, özellikle büyük ve geniş çaplı olanlar, kültürel ve tarihi öneme sahip alanlara zarar verebilir. Bu tür etkiler, yerel halkın kültürel kimliği ve mirasına bağlılığını zedeleyebilir. Projelerin planlanması ve uygulanması aşamasında bu tür değerlere duyarlı olunması, sosyal açıdan olumlu sonuçlar doğurabilir. Büyük inşaat projeleri, ağır makinaların ve ekstra trafik yükünün getirdiği gürültü, toz ve diğer çevresel rahatsızlıklarla beraber, orman yollarında güvenlik ve huzur ortamını bozabilir. Bu durum, yerel halkın günlük yaşantısını ve orman içerisindeki rekreasyonel faaliyetleri olumsuz yönde etkileyebilir.

Ters eğimlerin sayısı: Ters eğimlerin sayısının fazlalığı özellikle dağlık veya engebeli bölgelerde, yolların doğal araziye daha uyumlu olmasını sağlayabilir. Bu, durum ormanlara erişimi kolaylaştırır ve turizm faaliyetleri için daha fazla fırsat sunar. Kültürel ve tarihi öneme sahip alanlara daha az zarar verilir.

3.6. ÇKKV İLE ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ

3.6.1. CRITIC Ağırlıklandırma Yöntemi

Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde kullanılan bir tekniktir ve karar vericilere kriterler arasındaki ilişkileri değerlendirme ve önem sırasını belirleme konusunda yardımcı olur.

Yöntemin tarihçesi, 1995 yılında Diakolulaki ve diğ., tarafından yazılan ve yöntemin ilk anlatıldığı makaleye dayanmaktadır. Bu yöntemin ortaya çıkış sebebi objektif bir değerlendirme yapılmasıdır. Bu ilk çalışmada yöntem anlatılmıştır ve 8 adet ilaç firmalarının performans ölçümü üzerinde uygulama yapılarak yöntemin prosesi açıklanmıştır. İlerleyen yıllarda ise CRITIC yöntemini diğer ağırlıklandırma yöntemleriyle birlikte kullanarak çalışmalar yapılmıştır.

Deng ve diğ, (2000) çalışmalarında; tekstil alanında çalışan 7 firmanın, 4 finansal kriter altında performansları incelenmiştir. Objektif ağırlıklandırma metotlarından; CRITIC, ENTROPİ, Standart Sapma ve Ortalama Ağırlık yöntemleriyle kriter ağırlıklandırması yaparak sonuçları TOPSIS yöntemiyle sıralamıştır.

Yılmaz ve Harmancıoğlu (2010) yaptıkları çalışmada; Gediz nehri havzasında çevresel, sosyal ve ekonomik kriterler çerçevesinde su kaynakları yönetimi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden SAW, TOPSIS ve CP yöntemlerini kullanmışlardır. Kriter ağırlıklarını belirlemek amacıyla ise CRITIC, AHP ve ENTROPİ yöntemleri kullanılmıştır.

Zhao ve diğ. (2011), AHP ve CRITIC metotlarını diğer metotlarla beraber kullanıldığı çalışmasında ise tarçıngillerden bir bitkinin kabuk kısmında bulunan maddelerin ne yoğunlukta bulunduğunu (HPLC yöntemi) araştırmıştır.

Jahan ve diğ. (2012), malzeme seçimi için yaptıkları incelemede Ortalama Ağırlıklandırma, Standart Sapma, CRITIC ve ENTROPİ yöntemlerini tercih etmişlerdir.

İlerleyen yıllarda da CRITIC yönteminin diğer kriter ağırlıklandırma yöntemleriyle birlikte kullanılarak çalışmalar yapıldığı görülmemektedir.

CRITIC yönteminin gelişimi ve kullanımı, çok kriterli karar verme literatüründe ve uygulamalarında belirgin bir etkiye sahiptir. CRITIC, çeşitli sektörlerde, özellikle endüstri

mühendisliği, işletme yönetimi, çevre mühendisliği ve ekonomi gibi alanlarda karar verme süreçlerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Bu yöntem, farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz etmek için matematiksel ve istatistiksel teknikleri içerir. CRITIC, karar vericilerin, kriterlerin birbirleriyle olan ilişkilerini anlamalarına ve karar alma sürecinde bu ilişkileri dikkate almalarına yardımcı olur. Bu da daha sağlam ve bilgiye dayalı kararlar alınmasını sağlar.

CRITIC, çok kriterli karar verme literatüründe önemli bir yere sahiptir ve sürekli olarak geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Araştırmacılar ve uygulayıcılar, bu yöntemin teorik temellerini genişletmek ve pratik kullanımını artırmak için çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu sayede, CRITIC yöntemi, karmaşık karar verme problemleriyle başa çıkmak isteyen kuruluşlar ve karar vericiler için değerli bir araç olmaya devam etmektedir.

CRITIC yönteminin uygulanışı beş adımdan oluşmaktadır: (Diakoulaki ve diğ,1995)

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Karar martisi X, *m* adet alternatif ve *n* adet kriterlerden oluşmaktadır. Karar matrisindeki her bir x_{ij} değeri, *i*'nci alternatifin *j*'nci kriterdeki performansını gösterir.

$$X = [X_{ij}]n * m = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ . & . & \dots & . \\ . & . & \dots & . \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$X_j^{max} = J$.kriterin alternatifleri arasındaki maksimum değeri.

$X_j^{min} = J$.kriterin alternatifleri arasındaki minimum değeri.

i=1,2,3.., m alternatifleri ,j=1,2,3.., n kriterleri ifade eder.

Adım 2: Karar Matrisinin Normalizasyon İşlemi

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

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{min}}{X_j^{max} - X_j^{min}} \quad (3.13)$$

$$r_{ij} = \frac{X_j^{max} - X_{ij}}{X_j^{max} - X_j^{min}} \quad (3.14)$$

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(*xj*): *j*-inci kriterin karar matrisindeki minimum değeri.

max(*xj*): *j*-inci kriterin karar matrisindeki maksimum değeri.

Maksimum fayda kriterleri için Denklem (3.13), minimum maliyet kriterleri için ise Denklem (3.14) hesaplanır. Karar matrisinin X_{ij} elemanlarına normalizasyon işlemi uygulanarak rij değerleri sonucuna ulaşılır.

Adım 3: Kriterler Arası İlişki Derecesinin Belirlenmesi

Normalizasyon sonucunda hesaplanan r_{ij} değerleri kullanılarak Denklem (3.15) 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 karar 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 3.15'te görülen Pearson korelasyon katsayısı formülü hesaplanmalıdır.

$$P_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-r_j)(r_{ij}-r_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-r_j)^2 \sum_{i=1}^{m}(r_{ij}-r_k)^2}} \quad (3.15)$$

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

Korelasyon katsayısı *Pjk*: *j*-inci ve *k*-inci kriterler arasındaki korelasyonu gösterir.

Veriler normal dağılıma sahip değilse Spearman sıra korelasyon katsayısı formülü Denklem 3.16 ile kriterler arası ikili korelasyon katsayısı bulunabilir (Kiracı ve Bakır, 2019).

$$P_{jk} = 1 - \frac{6*\sum_{i=1}^{m} d^2}{n*(n^2-1)} \quad (3.16)$$

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

Adım 4: Kriterlere ait bilgi miktarı değerlerinin (Cj) Değerlerinin Hesaplanması

Bu adımda her bir kritere ait bilgi miktarı (C_j) Denklem (3.17) kullanarak belirlenir. Eşitlikte yer alan σ_j ifadesi *j*. kritere ait standart sapma değeri olup, Denklem (3.18) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \frac{(r_{ij} - r_j)^2}{m}} \tag{3.17}$$

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{n} (1 - P_{jk}) \tag{3.18}$$

σJ: j. kriterin standart sapma değeri

Adım 5: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Son adım olarak ise her bir *j* kriterinin *Cj* değeri, tüm kriterlerin değerlerinin toplamına oranlanarak nesnel ağırlık değerleri hesaplanmaktadır. Denklem (3.19) en yüksek değerden en düşük değere kadar kriterler sıralandığında ortaya çıkan en yüksek ağırlığa sahip kriterin belirlenmesi için kullanılır.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^{n} C_k} \tag{3.19}$$

3.6.2. MOORA Sıralama Yöntemi

MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı; 2006 yılında hem temel matematiksel varsayımlarının açıklanması hem de bir uygulama ile formüllerinin sonuçlarının oluşturulması ve yorumlanması ile çok kriterli bir karar verme yöntemi olarak literatürde yerini almıştır (Brauers ve Zavadskas, 2006; Ersöz ve Atav, 2011).

MOORA Önem Katsayısı yaklaşımı fayda ve maliyet yönlü kriterleri birlikte değerlendirmesi, ve ilgili kriterlerin yönlerinin kolaylıkla belirlenebiliyor olması ve yöntemin matematiksel işlemlerinin uygulamada oldukça kolay olması, yöntemin uygulamasında kriter önem katsayılarını dikkate alması, fakat bu kadar kolay matematiksel işlemlerin sonucunda bir alternatifin fayda-maliyet analizindeki durumunu somut bir şekilde ortaya koyması ile karar verme probleminde karar vericinin alternatifler arasında değerlendirme ve kıyaslama yapmasını kolaylaştırmaktadır (Brauers ve Zavadskas, 2006; Ersöz ve Atav, 2011).

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 3.20).

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(x_{ij})^2}} \tag{3.20}$$

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 *wk* ile çarpılır, Denklem (3.21) ile tanımlanan ölçütlere göre her bir karar alternatifinin performansı belirlenir.

$$y_i = \sum_{j=1}^{g}\left(w_k * x_{ij}^{*}\right) - \sum_{j=g+1}^{n}\left(w_k * x_{ij}^{*}\right) \tag{3.21}$$

yi = *i* alternatifinin performans değeri

wk = *k* kriterinin ağırlık değeri

xij = karar matrisindeki *i* alternatifinin *j* kriterine ait normalize değeri

g = fayda kriterlerinin sayısı

n = toplam kriter sayısı

i=1,2,…,*n* = alternatiflerin indeksi

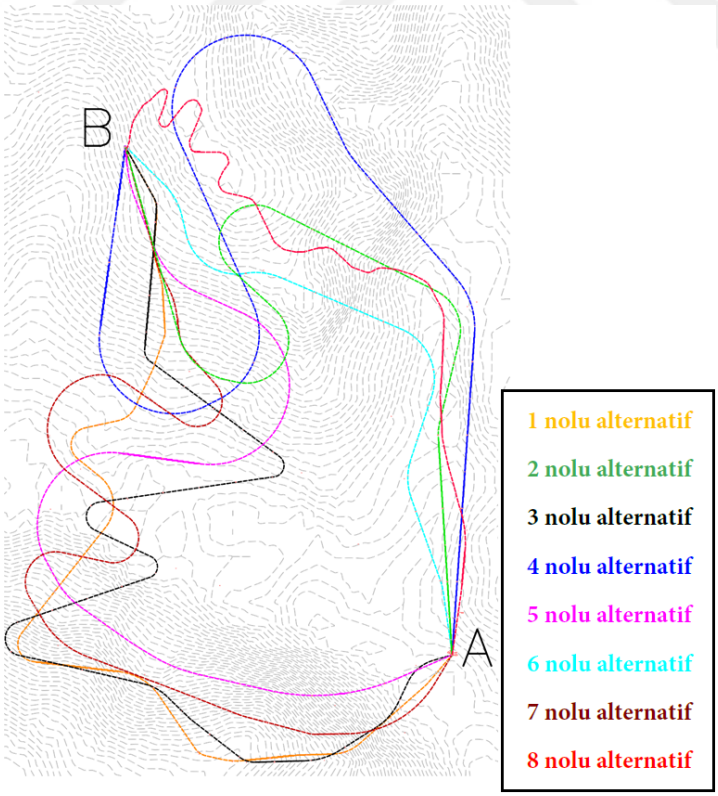
Adım 4: Alternatiflerinin Sıralaması

Bu adımda, *yi** 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.

4. BULGULAR

4.1. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT GEOMETRİK BULGULAR

Infraworks yazılımında, farklı kısıtlar dikkate alınarak yedi farklı yol alternatifi oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Bu kısıtlar, yöntem kısmında detaylandırılmıştır. Kısıtlar; hız, kazı eğimi, dolgu eğimi, maksimum eğim ve minimum yarıçap olarak belirlenmiştir. Bazı alternatifler oluşturulurken, dereler ve mevcut yollar modele eklenmiştir. Bazı alternatifler oluşturulurken ise pozitif kardinal olarak anıt ağaç dikkate alınmış ve bazı alternatiflerin de uygunluk haritaları kullanılmıştır (Tablo 4.1). Bu yol alternatiflerinden farklı olarak, yukarıdaki bölümde anlatıldığı gibi mevcut yolun olduğu alan arazi yüzeyinden çıkarılmış sonrasında o alanda Kriging metodu kullanılarak arazi, yolun önceki duruma getirilmiştir. AutoCAD Civil 3D'nin *"best fit alignment"* özelliğiyle mevcut yol ekseninden oluşturulan yatay güzergâh kullanılarak mevcut yolu temsilen konumsal alternatif bir yol modellenmiştir.



Şekil 4.1: Yol güzergâhı alternatiflerinin genel planı

Tablo 4.1: Yol alternatifleri için konumsal kısıtlar

Alternatif no	Uygunluk Haritası	Dereler	Mevcut Yollar Eklenmiş	Pozitif Kardinal (Anıt Agac)
1	(-)	(-)	(+)	(-)
2	(-)	(-)	(+)	(-)
3	(-)	(+)	(+)	(-)
4	(-)	(+)	(+)	(+)
5	(-)	(+)	(+)	(-)
6	(-)	(+)	(+)	(+)
7	(+)	(+)	(+)	(-)

Tablo 4.2'de her bir alternatif yolun belirli bir hızı, kazı ve dolgu eğimleri, maksimum eğimi ve minimum yarıçapı yer almaktadır. Örneğin, 1. alternatif yol 30 km/saat hızla, 0,5 kazı eğimi ve 0,7 dolgu eğimi ile tasarlanmıştır; maksimum eğimi 20 birimdir ve minimum yarıçapı da 20 birimdir. Diğer alternatif yollar da benzer şekilde belirli teknik kısıtlara sahiptir. Aşağıdaki özet tablo, her bir alternatif yolun hangi tasarım standardına uygun olarak tanımlandığını göstermektedir.

Tablo 4.2: Yol alternatifleri için kullanılan teknik kısıtlar

Alternatif no	Tasarım Hızı (km/sa)	Kazı Eğimi (yatay/düşey)	Dolgu Eğimi (yatay/düşey)	Yolun Maksimum Boyuna Eğimi (%)	Minimum Yatay 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	1	9,25	99,75
5	30	1	1	9,25	100
6	40	0,5	0,7	15	70
7	30	1	0,7	9,25	33,86

Mevcut yol ve yedi alternatif yol güzergahına ait yatay güzergâh özet bilgileri Tablo 4.3'te belirtilmiştir. Mevcut yol ise daha önce halihazırda inşa edildiği için tasarım hızı girilmemiştir.

Tablo 4.3: Yol güzergâhlarının yatay bilgi özeti

Alternatif no	Minimum kurp yarıçapı (m)	Tasarım hızı (km/sa)	Yatay some sayısı
1	20,00	30	17
2	50,00	40	7
3	14,63	20	16
4	99,75	50	7
5	100,00	30	11
6	70,00	40	8
7	33,86	30	15
Mevcut Yol	2,18	-	70

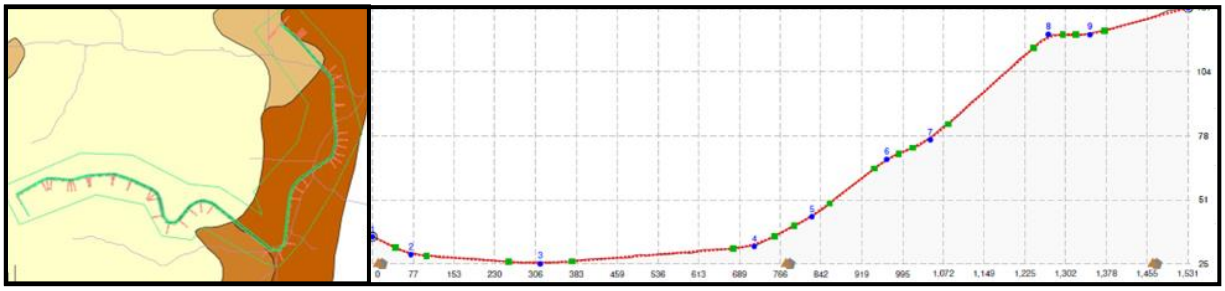
Ayrıca, bu yollara ait düşey güzergâh özet bilgileri de Tablo 4.4'te belirtilmiştir. Elde edilen tabloya göre, mevcut yol dahil olmak üzere, en kısa yol 6. alternatif olarak belirlenmiş olup uzunluğu 952,94 metredir. En uzun yol ise 4. alternatif olarak belirlenmiş olup uzunluğu 2.056,17 metredir. Düşey some sayısı bakımından en düşük değer 6. alternatifte bulunurken (5), en yüksek düşey some sayısı 4. alternatifte (22) gözlemlenmektedir. Maksimum eğim bakımından en düşük değer 2. alternatifte (%8), en yüksek değer ise mevcut yol olan "mevcut yol"da (%27) belirlenmiştir. Minimum düşey some aralığı bakımından en düşük değer "mevcut yol" alternatifte (4,25 metre), en yüksek değer ise 4. alternatifte (31,25 metre) gözlemlenmiştir.

Tablo 4.4: Yol güzergâhlarının düşey bilgi özeti

Alternatif no	Uzunluk (metre)	Düşey some sayısı	Maksimum eğim (%)	Minimum düşey some aralığı (metre)
1	1.531,45	10	20,00	18,75
2	1.511,02	16	8,00	25,00
3	1.944,44	10	10,00	15,00
4	2.056,17	22	9,25	31,25
5	1.555,92	15	9,25	18,75
6	952,94	5	15,00	25,00
7	1.794,16	16	9,25	18,75
Mevcut Yol	1.197,85	34	27,00	4,25

Alternatif güzergâh 1'e ait teknik bulgular: 1.531,45 metre uzunluğa sahip olup, 10 adet düşey some içerir. Maksimum eğim %20, minimum düşey some aralığı ise 18,75 metredir. Minimum yarıçapı 20 metre, tasarım hızı 30 km/sa olup, toplam 17 adet some bulunmaktadır. Bu alternatif

güzergâh, diğer güzergahlara nazaran yüksek eğimi ile dikkat çekmektedir (Şekil 4.2-Tablo 4.5).



Şekil 4.2: 1 nolu alternatif güzergâha ait plan ve profili

Tablo 4.5: 1 nolu alternatif güzergahın yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	48,375m		0+000,00m	0+048,38m				
2	Kurp	10,045m	72,366m	0+048,38m	0+058,42m	7,9533 (d)	10,037m	0,174	0,175m
3	Teğet	116,047m		0+058,42m	0+174,47m				
4	Kurp	39,752m	57,419m	0+174,47m	0+214,22m	39,6671 (d)	38,963m	3,406	3,621m
5	Teğet	46,771m		0+214,22m	0+260,99m				
6	Kurp	3,119m	43,824m	0+260,99m	0+264,11m	4,0777 (d)	3,118m	0,028	0,028m
7	Teğet	72,119m		0+264,11m	0+336,23m				
8	Kurp	30,340m	93,888m	0+336,23m	0+366,57m	18,5150 (d)	30,208m	1,223	1,239m
9	Teğet	21,732m		0+366,57m	0+388,30m				
10	Kurp	17,656m	23,545m	0+388,30m	0+405,96m	42,9647 (d)	17,245m	1,636	1,758m
11	Teğet	87,589m		0+405,96m	0+493,55m				
12	Kurp	64,509m	75,388m	0+493,55m	0+558,05m	49,0281 (d)	62,559m	6,795	7,469m
13	Teğet	117,890m		0+558,05m	0+675,95m				
14	Kurp	50,938m	23,978m	0+675,95m	0+726,88m	121,7160 (d)	41,886m	12,301	25,261m
15	Teğet	183,849m		0+726,88m	0+910,73m				
16	Kurp	76,796m	49,213m	0+910,73m	0+987,53m	89,4083 (d)	69,238m	14,235	20,028m
17	Teğet	39,180m		0+987,53m	1+026,71m				
18	Kurp	53,389m	23,779m	1+026,71m	1+080,10m	128,6405 (d)	42,861m	13,475	31,095m
19	Teğet	46,010m		1+080,10m	1+126,11m				
20	Kurp	31,592m	34,431m	1+126,11m	1+157,70m	52,5718 (d)	30,495m	3,56	3,971m
21	Teğet	56,650m		1+157,70m	1+214,35m				
22	Kurp	2,903m	28,134m	1+214,35m	1+217,25m	5,9122 (d)	2,902m	0,037	0,037m
23	Teğet	42,553m		1+217,25m	1+259,81m				
24	Kurp	9,463m	24,055m	1+259,81m	1+269,27m	22,5398 (d)	9,402m	0,464	0,473m
25	Teğet	57,553m		1+269,27m	1+326,82m				
26	Kurp	10,301m	49,433m	1+326,82m	1+337,12m	11,9397 (d)	10,283m	0,268	0,270m
27	Teğet	36,379m		1+337,12m	1+373,50m				
28	Kurp	10,310m	28,477m	1+373,50m	1+383,81m	20,7444 (d)	10,254m	0,465	0,473m
29	Teğet	45,110m		1+383,81m	1+428,92m				
30	Kurp	28,057m	46,143m	1+428,92m	1+456,98m	34,8391 (d)	27,627m	2,116	2,218m
31	Teğet	74.702m		1+456,98m	1+531,68m				

Bu yol güzergâhının profil geometrisi incelendiğinde, güzergâh boyunca önemli eğim değişiklikleri olduğu görülmektedir. Hem dere hem de tepe tipi profil kurpları bulunmakta olup, özellikle dere tipi düşey kurplar ağırlıktadır. Kurp uzunlukları 46,106m ile 119,073m arasında değişmektedir. En uzun kurp 119,073m ile %1,55'ten %1,78'e değişen eğimlere sahipken, en büyük yarıçap 3574,743m ile 24,594m'de yer almaktadır. Buna karşılık, en düşük K değeri

2,787 ve en küçük yarıçap 278,666m ile 119,459m'de bulunmaktadır. Güzergâh boyunca %16,96'dan %9,83'e veya %19,66'dan %0,04'e düşen keskin eğim değişiklikleri dikkat çekmektedir. Bu veriler, yolun mühendislik açısından dikkatle tasarlanması gerektiğini ve özellikle keskin eğim değişimlerinin olduğu bölgelerde araç hızlarının ve güvenliğin sağlanması için gerekli önlemlerin alınmasının önemli olduğunu göstermektedir (Tablo 4.6). Yol güzergâhına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.3 de gösterilmiştir.

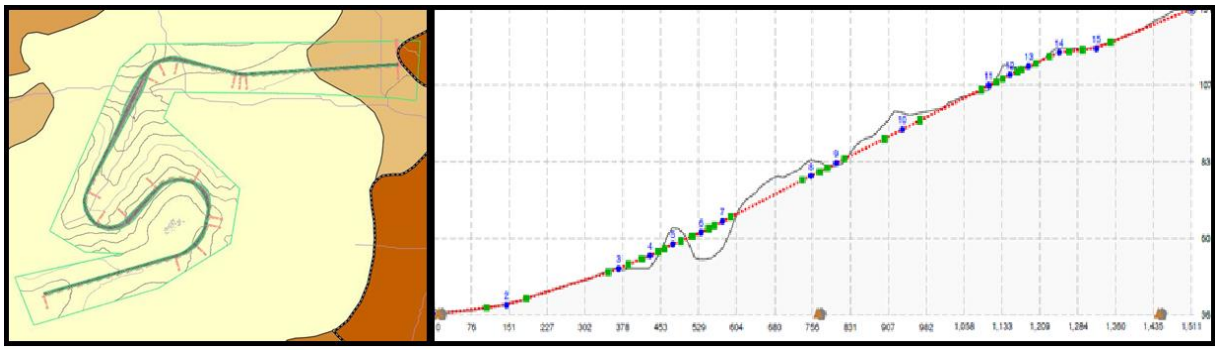
Tablo 4.6: 1 nolu alternatif güzergâhın profil geometisine ait bilgiler

Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
0+000,00m	35,746m		%-10,17					
0+072,61m	28,360m	%-10,17	%-1,55	Çukur	Simetrik parabol	58,525m	6,792	679,183m
0+315,01m	24,594m	%-1,55	%1,78	Çukur	Simetrik parabol	119,073m	35,747	3.574,743m
0+716,59m	31,729m	%1,78	%11,37	Çukur	Simetrik parabol	77,619m	8,091	809,073m
0+825,12m	44,069m	%11,37	%16,96	Çukur	Simetrik parabol	65,613m	11,734	1.173,404m
0+965,44m	67,871m	%16,96	%9,83	Tepe	Simetrik parabol	46,106m	6,462	646,170m
1+047,90m	75,974m	%9,83	%19,66	Çukur	Simetrik parabol	66,609m	6,773	677,306m
1+269,07m	119,459m	%19,66	%-0,04	Tepe	Simetrik parabol	54,894m	2,787	278,666m
1+347,28m	119,430m	%-0,04	%6,05	Çukur	Simetrik parabol	53,450m	8,784	878,396m
1+531,45m	130,567m	%6,05						



Şekil 4.3: 1 nolu alternatif güzergâha ait BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 2'ye ait teknik bulgular: 1.511,02 metre uzunluğundadır ve 16 düşey some bulunur. Maksimum eğim %8, minimum düşey some aralığı ise 25 metredir. Bu alternatif, düşük eğimi ile diğerlerinden ayrılmaktadır. Minimum yarıçapı 50 metre, tasarım hızı 40 km/sa olup, toplam 7 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.4-Tablo 4.7).



Şekil 4.4: 2 nolu alternatifin plan ve profile

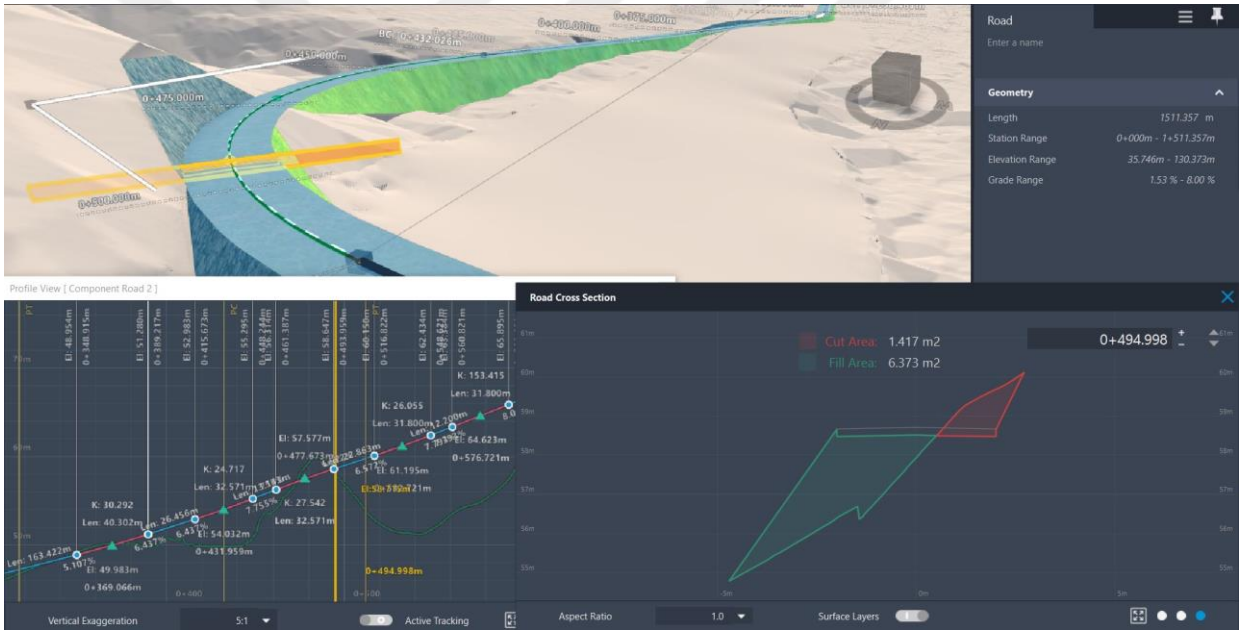
Tablo 4.7: 2 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	296,467m		0+000,00m	0+296,47m				
2	Kurp	20,000m	67,256m	0+296,47m	0+316,47m	17,0382 (d)	19,926m	0,742	0,750m
3	Teğet	115,558m		0+316,47m	0+432,03m				
4	Kurp	80,000m	59,654m	0+432,03m	0+512,03m	76,8380 (d)	74,138m	12,916	16,485m
5	Teğet	249,441m		0+512,03m	0+761,47m				
6	Kurp	143,089m	50,000m	0+761,47m	0+904,56m	163,9684 (d)	99,023m	43,028	308,562m
7	Teğet	81,396m		0+904,56m	0+985,95m				
8	Kurp	151,313m	57,840m	0+985,95m	1+137,27m	149,8878 (d)	111,710m	42,816	164,824m
9	Teğet	16,220m		1+137,27m	1+153,49m				
10	Kurp	90,000m	83,719m	1+153,49m	1+243,49m	61,5948 (d)	85,728m	11,806	13,744m
11	Teğet	267,871m		1+243,49m	1+511,36m				

Bu yol güzergahının profil geometrisi incelendiğinde, güzergâh boyunca önemli eğim değişiklikleri olduğu görülmektedir. Hem çukur hem de tepe tipi profil kurpları bulunmakta olup, özellikle sag tipi kurplar ağırlıktadır. Kurp uzunlukları 28,875m ile 79,769m arasında değişmektedir. En uzun kurp 79,769m ile %1,94'ten %5,11'e değişen eğimlere sahipken, en yüksek K değeri 711,078 ve en büyük yarıçap 48.760,123m ile 0+752,72m'de yer almaktadır. Buna karşılık, en düşük K değeri 6,617 ve en küçük yarıçap 661,686m ile 1+247,76m'de bulunmaktadır. Güzergâh boyunca %7,48'den %1,53'e veya %8,00'den %7,93'e düşen keskin eğim değişiklikleri dikkat çekmektedir. Bu veriler, yolun mühendislik açısından dikkatle tasarlanması gerektiğini ve özellikle keskin eğim değişimlerinin olduğu bölgelerde araç hızlarının ve güvenliğin sağlanması için gerekli önlemlerin alınmasının önemli olduğunu göstermektedir (Tablo 4.8). Yol güzergahına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

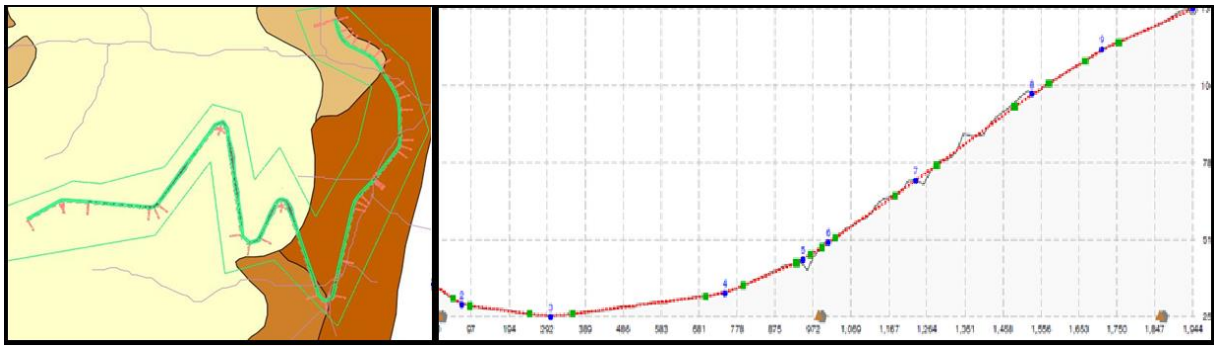
Tablo 4.8: 2 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,746m		%1,94					
2	0+145,61m	38,572m	%1,94	%5,11	Çukur	Simetrik parabol	79,769m	25,199	2.519,943m
3	0+369,07m	49,983m	%5,11	%6,44	Çukur	Simetrik parabol	40,302m	30,292	3.029,190m
4	0+431,96m	54,032m	%6,44	%7,75	Çukur	Simetrik parabol	32,571m	24,717	2.471,690m
5	0+477,67m	57,577m	%7,75	%6,57	Tepe	Simetrik parabol	32,571m	27,542	2.754,171m
6	0+532,72m	61,195m	%6,57	%7,79	Çukur	Simetrik parabol	31,800m	26,055	2.605,473m
7	0+576,72m	64,623m	%7,79	%8,00	Çukur	Simetrik parabol	31,800m	153,415	15.341,511m
8	0+752,72m	78,703m	%8,00	%7,93	Tepe	Simetrik parabol	34,263m	487,601	48.760,123m
9	0+802,19m	82,626m	%7,93	%8,00	Çukur	Simetrik parabol	34,263m	487,601	48.760,123m
10	0+934,78m	93,233m	%8,00	%7,88	Tepe	Simetrik parabol	71,664m	590,571	59.057,069m
11	1+106,75m	106,782m	%7,88	%7,83	Tepe	Simetrik parabol	31,212m	711,078	71.107,753m
12	1+149,44m	110,127m	%7,83	%6,79	Tepe	Simetrik parabol	28,875m	27,679	2.767,933m
13	1+186,94m	112,674m	%6,79	%7,48	Çukur	Simetrik parabol	28,875m	41,804	4.180,352m
14	1+247,76m	117,224m	%7,48	%1,53	Tepe	Simetrik parabol	39,366m	6,617	661,686m
15	1+321,31m	118,352m	%1,53	%6,44	Çukur	Simetrik parabol	55,173m	11,246	1.124,620m
16	1+511,02m	130,567m	%6,44						



Şekil 4.5: 2 nolu alternatif güzergaha ait BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 3'e ait teknik bulgular: 1.944,44 metre uzunluğa sahip olup, 10 düşey some içerir. Maksimum eğim %10, minimum düşey some aralığı 15 metredir. Bu alternatif, orta uzunlukta ve dengeli bir eğim sunmaktadır. Minimum yarıçapı 14,63 metre, tasarım hızı 20 km/sa olup, toplam 16 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.6-Tablo 4.9).



Şekil 4.6 : 3 nolu alternatifin plan ve profili

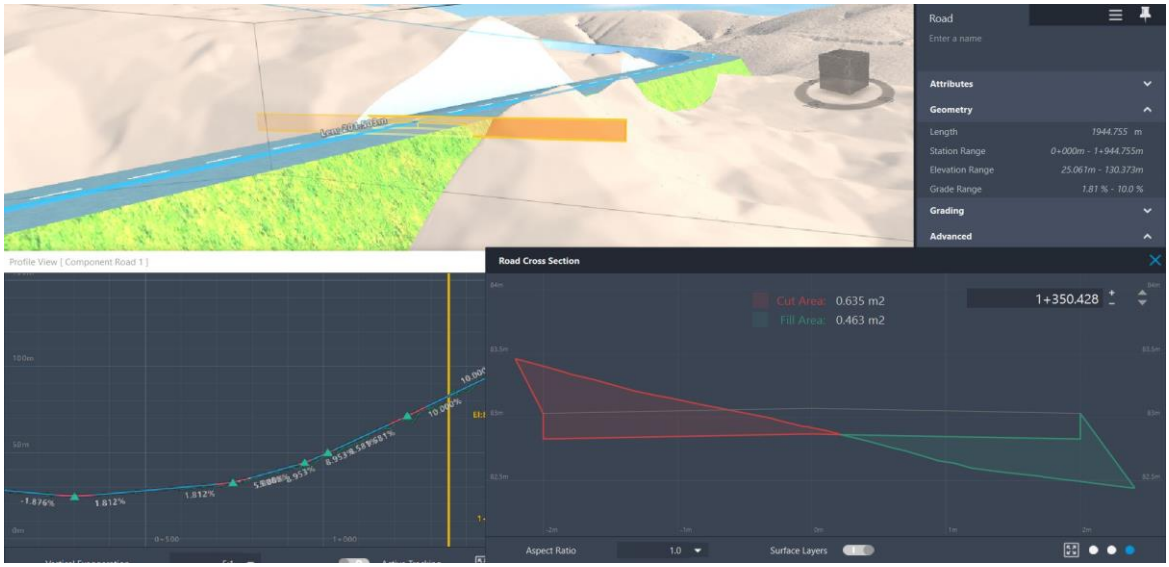
Tablo 4.9: 3 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	26,673m		0+000,00m	0+026,67m				
2	Kurp	45,814m	54,269m	0+026,67m	0+072,49m	48,3695 (d)	44,466m	4,763	5,222m
3	Teğet	31,533m		0+072,49m	0+104,02m				
4	Kurp	45,720m	81,575m	0+104,02m	0+149,74m	32,1127 (d)	45,124m	3,182	3,311m
5	Teğet	57,918m		0+149,74m	0+207,66m				
6	Kurp	50,400m	93,937m	0+207,66m	0+258,06m	30,7412 (d)	49,798m	3,36	3,485m
7	Teğet	67,786m		0+258,06m	0+325,85m				
8	Kurp	23,568m	34,261m	0+325,85m	0+349,41m	39,4126 (d)	23,106m	2,007	2,131m
9	Teğet	81,237m		0+349,41m	0+430,65m				
10	Kurp	5,437m	49,877m	0+430,65m	0+436,09m	6,2456 (d)	5,434m	0,074	0,074m
11	Teğet	42,248m		0+436,09m	0+478,34m				
12	Kurp	35,744m	66,209m	0+478,34m	0+514,08m	30,9322 (d)	35,312m	2,398	2,488m
13	Teğet	119,915m		0+514,08m	0+633,99m				
14	Kurp	0,280m	22,494m	0+633,99m	0+634,27m	0,7135 (d)	0,280m	0	0,000m
15	Teğet	79,180m		0+634,27m	0+713,45m				
16	Kurp	42,394m	16,315m	0+713,45m	0+755,85m	148,8785 (d)	31,435m	11,939	44,504m
17	Teğet	215,860m		0+755,85m	0+971,71m				
18	Kurp	36,086m	15,211m	0+971,71m	1+007,79m	135,9246 (d)	28,200m	9,504	25,329m
19	Teğet	84,690m		1+007,79m	1+092,48m				
20	Kurp	51,136m	20,010m	1+092,48m	1+143,62m	146,4219 (d)	38,314m	14,23	49,264m
21	Teğet	240,955m		1+143,62m	1+384,58m				
22	Kurp	36,279m	15,357m	1+384,58m	1+420,85m	135,3537 (d)	28,412m	9,524	25,074m
23	Teğet	218,364m		1+420,85m	1+639,22m				
24	Kurp	18,732m	18,256m	1+639,22m	1+657,95m	58,7891 (d)	17,921m	2,35	2,698m
25	Teğet	137,650m		1+657,95m	1+795,60m				
26	Kurp	0,576m	23,904m	1+795,60m	1+796,18m	1,3813 (d)	0,576m	0,002	0,002m
27	Teğet	54,507m		1+796,18m	1+850,68m				
28	Kurp	13,987m	24,189m	1+850,68m	1+864,67m	33,1296 (d)	13,793m	1,004	1,047m
29	Teğet	80,085m		1+864,67m	1+944,76m				

Bu yol güzergahının düşey kurp uzunlukları 35,295m ile 108,846m arasında değişmektedir. En uzun kurp, 108,846m ile % -1,88'den %1,81'e değişen eğimlere sahipken, en yüksek K değeri 253,626 ve en büyük yarıçap 25.362,646m ile 1+234,40m'de bulunmaktadır. Buna karşın, en düşük K değeri 5,767 ve en küçük yarıçap 576.736m ile 0+072,48m'de yer almaktadır. Güzergâh boyunca %9,58'den %10,00'a veya %10,00'dan %8,50'ye gibi belirgin eğim değişiklikleri dikkat çekmektedir (Tablo 4.10). Yol güzergahına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

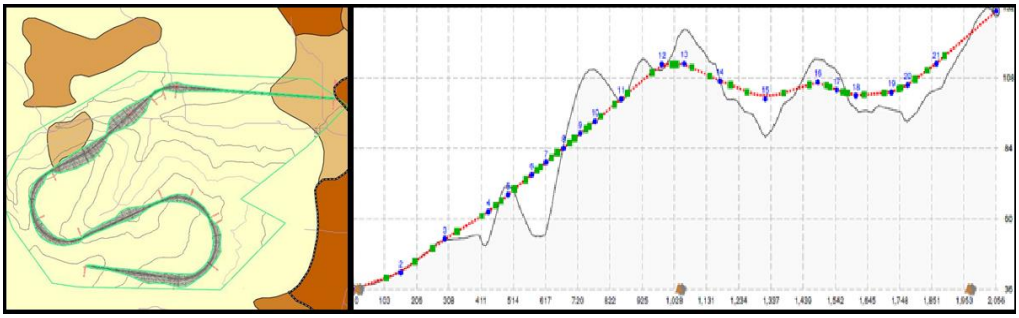
Tablo 4.10: 3 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,746m		%-9,52					
2	0+072,48m	28,846m	%-9,52	%-1,88	Çukur	Simetrik parabol	44,081m	5,767	576,736m
3	0+301,03m	24,559m	%-1,88	%1,81	Çukur	Simetrik parabol	108,846m	29,519	2.951,924m
4	0+745,14m	32,604m	%1,81	%5,81	Çukur	Simetrik parabol	96,718m	24,199	2.419,890m
5	0+946,74m	44,314m	%5,81	%8,95	Çukur	Simetrik parabol	35,295m	11,222	1.122,193m
6	1+011,83m	50,142m	%8,95	%9,58	Çukur	Simetrik parabol	35,295m	56,2	5.620,040m
7	1+234,40m	71,467m	%9,58	%10,00	Çukur	Simetrik parabol	106,154m	253,626	25.362,646m
8	1+532,28m	101,255m	%10,00	%8,50	Tepe	Simetrik parabol	86,607m	57,914	5.791,439m
9	1+711,41m	116,489m	%8,50	%6,04	Tepe	Simetrik parabol	86,607m	35,156	3.515,596m
10	1+944,44m	130,567m	%6,04						



Şekil 4.7: 3 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 4'e ait teknik bulgular: 2.056,17 metre uzunluğundadır ve 22 düşey some bulunur. Maksimum eğim %9,25, minimum düşey some aralığı ise 31,25 metredir. Bu alternatif, 2.056,17 metre uzunluğuyla en uzun alternatiftir. Minimum yarıçapı 99,75 metre, tasarım hızı 50 km/sa olup, toplam 7 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.8-Tablo 4.11).



Şekil 4.8: 4 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

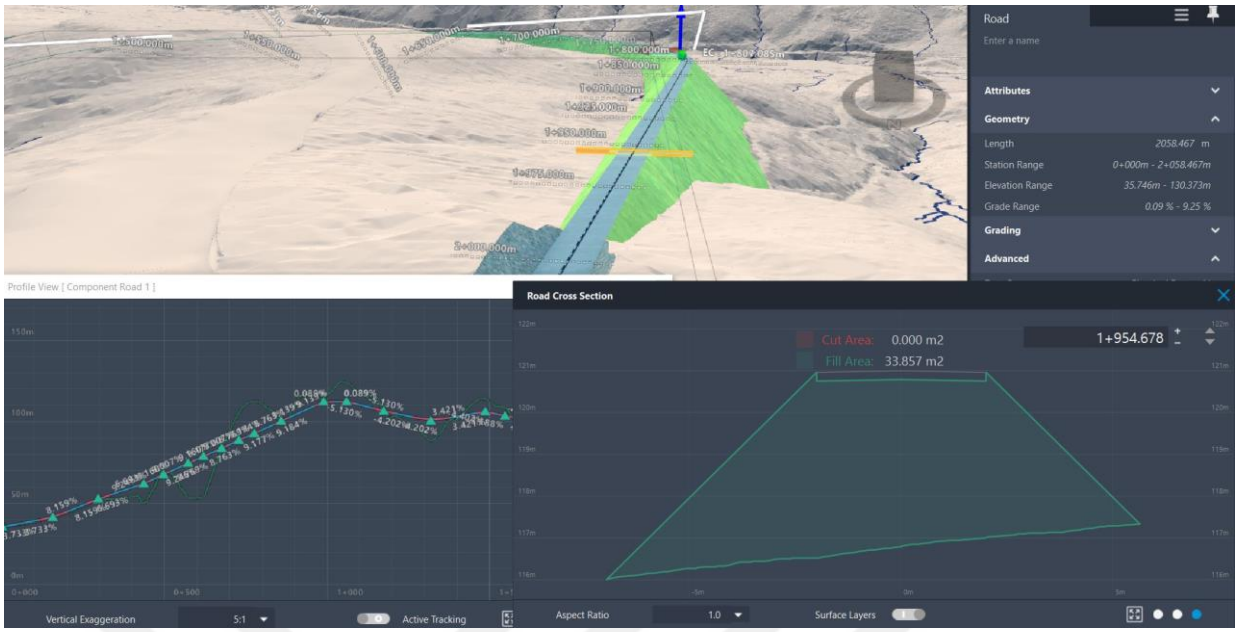
Tablo 4.11: 4 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	440,007m		0+000,00m	0+440,01m				
2	Kurp	78,382m	100,250m	0+440,01m	0+518,39m	44,7977 (d)	76,401m	7,563	8,181m
3	Teğet	210,706m		0+518,39m	0+729,10m				
4	Kurp	28,323m	105,891m	0+729,10m	0+757,42m	15,3249 (d)	28,238m	0,946	0,954m
5	Teğet	101,948m		0+757,42m	0+859,37m				
6	Kurp	311,681m	99,926m	0+859,37m	1+171,05m	178,7119 (d)	199,840m	98,803	8.789,656m
7	Teğet	246,362m		1+171,05m	1+417,41m				
8	Kurp	152,115m	99,750m	1+417,41m	1+569,52m	87,3737 (d)	137,798m	27,618	38,193m
9	Teğet	19,633m		1+569,52m	1+589,16m				
10	Kurp	217,929m	100,108m	1+589,16m	1+807,08m	124,7291 (d)	177,375m	53,673	115,714m
11	Teğet	251,382m		1+807,08m	2+058,47m				

Bu yol güzergahının profil geometrisi incelendiğinde, belirgin eğim değişiklikleri ve çeşitli kurp türleri olduğu görülmektedir. Özellikle çukur tipi kurplar ağırlıktadır. Kurp uzunlukları 36,129 m ile 114,730 m arasında değişmektedir. En uzun kurp, 114,730 m ile % -4,20'den %3,42'ye değişen eğimlere sahiptir. En yüksek K değeri 946,796 ve en büyük yarıçap 9.4679,553 m ile 100,690 m'de bulunmaktadır. Buna karşılık, en düşük K değeri 6,998 ve en küçük yarıçap 699,846 m ile 112,636 m'de yer almaktadır. Güzergâh boyunca %9,25'den %9,16'ya veya %0,09'dan %-5,13'e değişen keskin eğim değişiklikleri dikkat çekmektedir. Bu güzergahın diğer yollardan önemli bir farkı, daha sık ve keskin eğim değişikliklerinin bulunmasıdır, bu da sürücülerin dikkatini ve yolun tasarımında daha fazla mühendislik dikkati gerektirir (Tablo 4.12). Yol güzergahına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.12: 4 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,746m		%3,73					
2	0+155,02m	41,532m	%3,73	%8,16	Çukur	Simetrik parabol	91,808m	20,743	2.074,285m
3	0+295,10m	52,962m	%8,16	%6,69	Tepe	Simetrik parabol	78,039m	53,23	5.323,036m
4	0+435,19m	62,338m	%6,69	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	43,923m	17,208	1.720,787m
5	0+495,93m	67,954m	%9,25	%9,16	Tepe	Simetrik parabol	42,332m	494,219	49.421,934m
6	0+571,69m	74,894m	%9,16	%9,01	Tepe	Simetrik parabol	36,129m	235,853	23.585,270m
7	0+618,64m	79,123m	%9,01	%8,77	Tepe	Simetrik parabol	36,129m	152,276	15.227,596m
8	0+674,76m	84,044m	%8,77	%9,18	Çukur	Simetrik parabol	38,797m	95,167	9.516,707m
9	0+727,64m	88,897m	%9,18	%8,76	Tepe	Simetrik parabol	36,422m	87,884	8.788,433m
10	0+775,24m	93,068m	%8,76	%9,18	Çukur	Simetrik parabol	36,422m	86,49	8.648,973m
11	0+858,24m	100,690m	%9,18	%9,14	Tepe	Simetrik parabol	42,146m	946,796	94.679,553m
12	0+988,94m	112,636m	%9,14	%0,09	Tepe	Simetrik parabol	63,342m	6,998	699,846m
13	1+059,32m	112,698m	%0,09	%-5,13	Tepe	Simetrik parabol	49,935m	9,569	956,912m
14	1+173,83m	106,824m	%-5,13	%-4,20	Çukur	Simetrik parabol	66,527m	71,672	7.167,223m
15	1+318,67m	100,739m	%-4,20	%3,42	Çukur	Simetrik parabol	114,730m	15,05	1.505,044m
16	1+486,21m	106,471m	%3,42	%-4,40	Tepe	Simetrik parabol	54,762m	7	700,000m
17	1+547,06m	103,792m	%-4,40	%-3,19	Çukur	Simetrik parabol	42,281m	34,826	3.482,551m
18	1+607,68m	101,860m	%-3,19	%1,01	Çukur	Simetrik parabol	54,562m	13	1.300,000m
19	1+721,83m	103,012m	%1,01	%4,60	Çukur	Simetrik parabol	46,699m	13	1.299,999m
20	1+773,72m	105,400m	%4,60	%8,19	Çukur	Simetrik parabol	46,699m	13	1.300,000m
21	1+864,58m	112,845m	%8,19	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	55,887m	52,92	5.291,990m
22	2+056,17m	130,567m	%9,25						

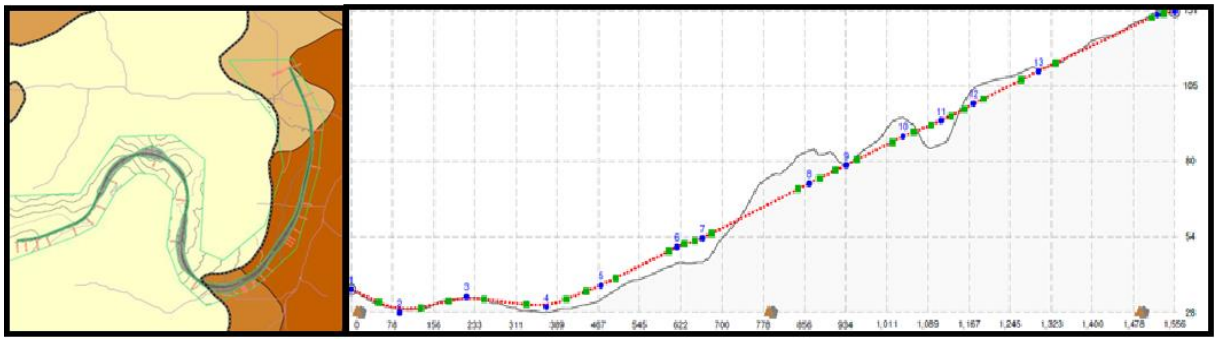


Şekil 4.9: 4 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 5'e ait teknik bulgular: 1.555,92 metre uzunluğa sahip olup, 15 düşey some içerir. Maksimum eğim %9,25, minimum düşey some aralığı 18,75 metredir. Bu alternatif, orta uzunlukta ve dengeli some sayısıyla öne çıkmaktadır. Minimum yarıçapı 100 metre, tasarım hızı 30 km/sa olup, toplam 11 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.10- Tablo 4.13).

Tablo 4.13: 5 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	80,365m		0+000,00m	0+080,36m				
2	Kurp	179,577m	284,919m	0+080,36m	0+259,94m	36,1121 (d)	176,620m	14,031	14,758m
3	Teğet	97,400m		0+259,94m	0+357,34m				
4	Kurp	68,018m	210,323m	0+357,34m	0+425,36m	18,5294 (d)	67,722m	2,744	2,780m
5	Teğet	23,264m		0+425,36m	0+448,62m				
6	Kurp	16,548m	239,798m	0+448,62m	0+465,17m	3,9539 (d)	16,545m	0,143	0,143m
7	Teğet	79,804m		0+465,17m	0+544,98m				
8	Kurp	46,300m	101,739m	0+544,98m	0+591,28m	26,0743 (d)	45,901m	2,622	2,692m
9	Teğet	23,791m		0+591,28m	0+615,07m				
10	Kurp	2,164m	401,453m	0+615,07m	0+617,23m	0,3089 (d)	2,164m	0,001	0,001m
11	Teğet	5,427m		0+617,23m	0+622,66m				
12	Kurp	219,971m	100,000m	0+622,66m	0+842,63m	126,0339 (d)	178,229m	54,627	120,397m
13	Teğet	108,142m		0+842,63m	0+950,77m				
14	Kurp	306,947m	107,808m	0+950,77m	1+257,72m	163,1312 (d)	213,283m	91,995	627,192m
15	Teğet	72,858m		1+257,72m	1+330,58m				
16	Kurp	78,568m	102,746m	1+330,58m	1+409,15m	43,8131 (d)	76,668m	7,419	7,996m
17	Teğet	71,526m		1+409,15m	1+480,67m				
18	Kurp	53,637m	190,112m	1+480,67m	1+534,31m	16,1652 (d)	53,460m	1,888	1,907m
19	Teğet	22,023m		1+534,31m	1+556,33m				

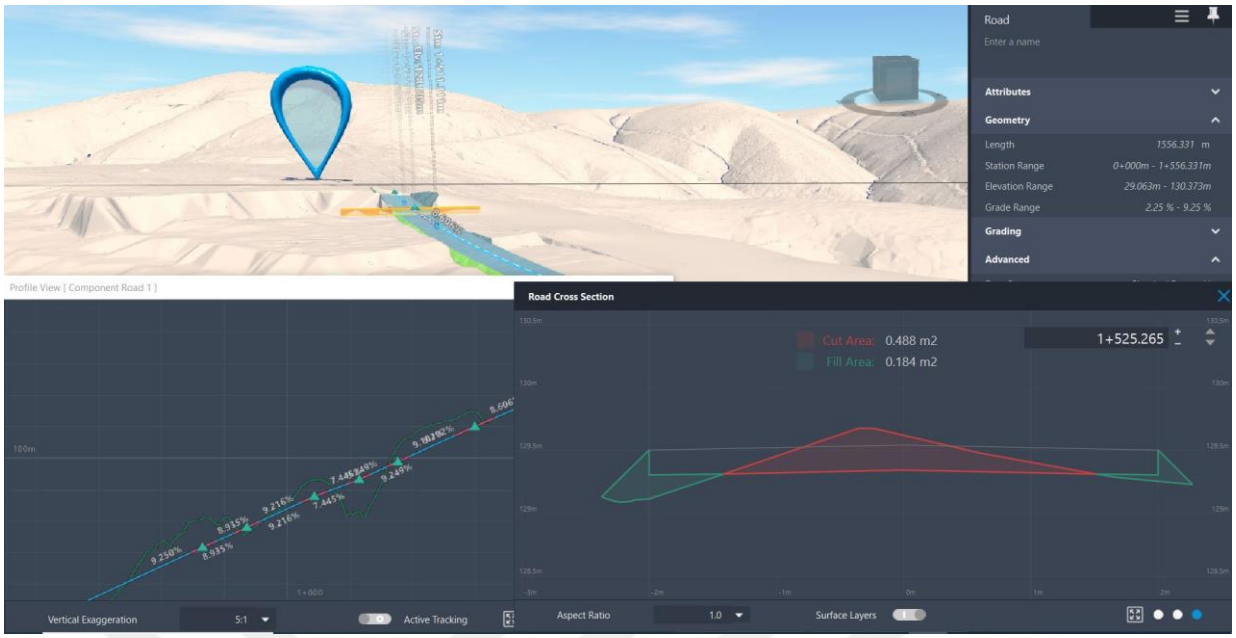


Şekil 4.10: 5 nolu alternatifin plan ve profili

Bu yol güzergahının profil geometrisi incelendiğinde, farklı eğim değişiklikleri ve çeşitli profil kurplarının bulunduğu görülmektedir. Hem çukur hem de tepe tipi profil kurpları mevcuttur ve bu kurplar oldukça sık değişim göstermektedir. Kurp uzunlukları 23,735m ile 79,157m arasında değişmektedir. En uzun kurp, 79,157m ile % -8,57'den %4.18'e değişen eğimlere sahiptir. En yüksek K değeri 249,462 ve en büyük yarıçap 24.946,188m ile 99,108m'de bulunmaktadır. Buna karşılık, en düşük K değeri 4.14 ve en küçük yarıçap 413,993m ile 129,627m'de yer almaktadır. Güzergâh boyunca %9,25'den %9,10'a veya %2,87'den % -8,57'e gibi belirgin eğim değişiklikleri dikkat çekmektedir (Tablo 4.14). Yol güzergahına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

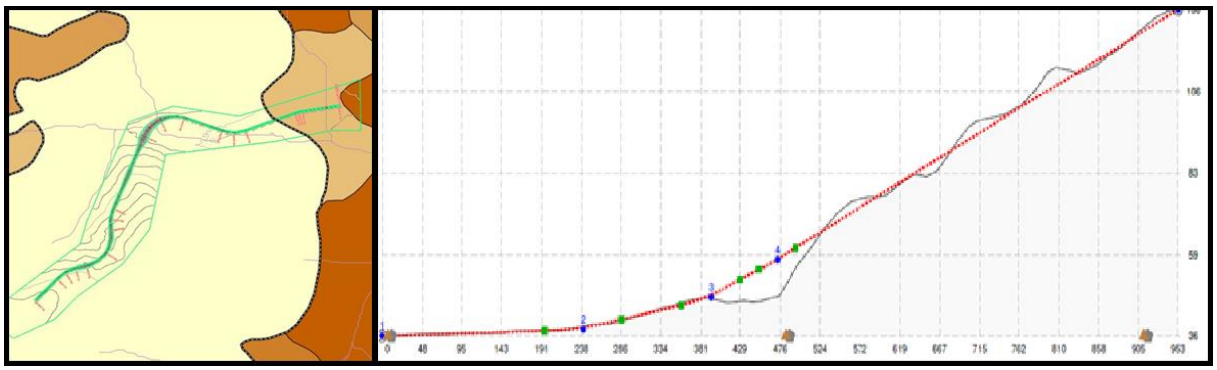
Tablo 4.14: 5 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,746m		%-8,57					
2	0+090,90m	27,951m	%-8,57	%4,18	Çukur	Simetrik parabol	79,157m	6,208	620,839m
3	0+217,66m	33,245m	%4,18	%-2,27	Tepe	Simetrik parabol	66,042m	10,246	1.024,584m
4	0+368,62m	29,818m	%-2,27	%7,17	Çukur	Simetrik parabol	74,891m	7,934	793,425m
5	0+472,12m	37,238m	%7,17	%9,10	Çukur	Simetrik parabol	55,574m	28,821	2.882,134m
6	0+614,98m	50,235m	%9,10	%6,35	Tepe	Simetrik parabol	31,257m	11,387	1.138,726m
7	0+664,44m	53,377m	%6,35	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	31,257m	10,787	1.078,730m
8	0+864,80m	71,910m	%9,25	%8,93	Tepe	Simetrik parabol	40,657m	128,931	12.893,132m
9	0+935,15m	78,196m	%8,93	%9,22	Çukur	Simetrik parabol	40,657m	144,386	14.438,610m
10	1+042,59m	88,097m	%9,22	%7,44	Tepe	Simetrik parabol	41,229m	23,274	2.327,395m
11	1+114,21m	93,429m	%7,44	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	36,625m	20,297	2.029,678m
12	1+175,60m	99,108m	%9,25	%9,10	Tepe	Simetrik parabol	36,625m	249,462	24.946,188m
13	1+297,97m	110,246m	%9,10	%8,61	Tepe	Simetrik parabol	64,066m	128,967	12.896,651m
14	1+523,18m	129,627m	%8,61	%2,87	Tepe	Simetrik parabol	23,735m	4,14	413,993m
15	1+555,92m	130,567m	%2,87						



Şekil 4.11: 5 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 6'ya ait teknik bulgular: 952,94 metre uzunluğundadır ve 5 düşey some bulunur. Maksimum eğim %15, minimum düşey some aralığı ise 25 metredir. Bu alternatif, 952,94 metre uzunluğu ile en kısa alternatiftir. Minimum yarıçapı 70 metre, tasarım hızı 40 km/sa olup, toplam 8 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.12- Tablo 4.15).



Şekil 4.12: 6 nolu alternatifin plan ve profili

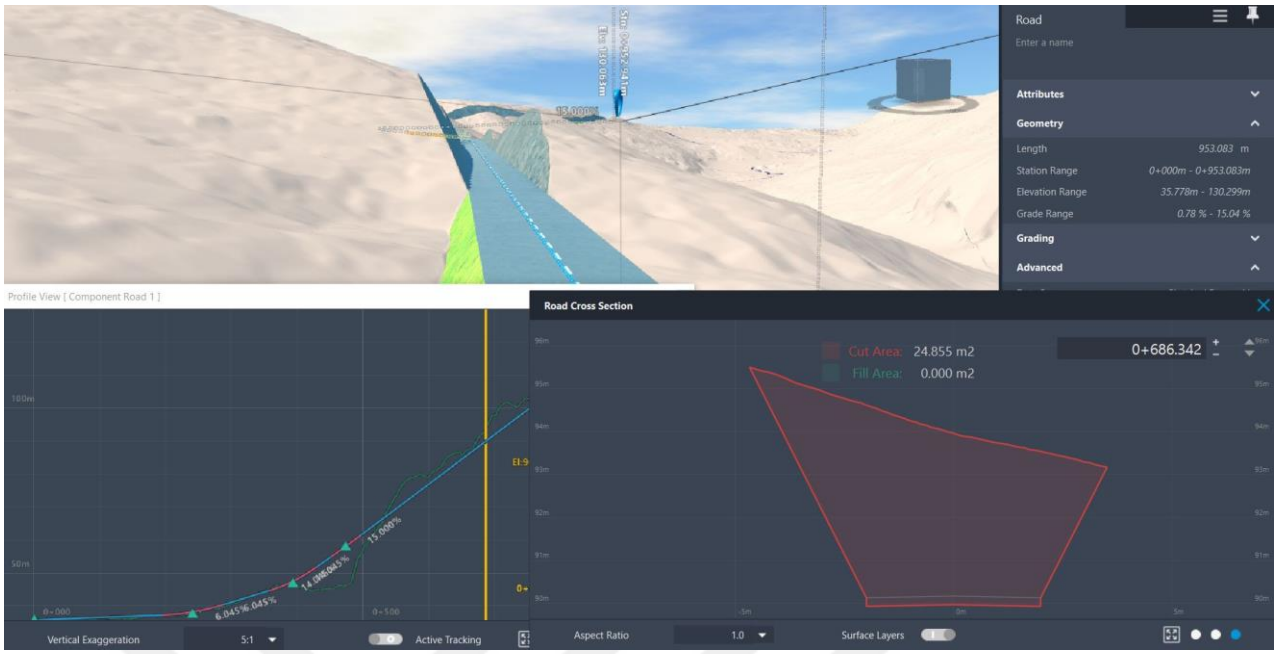
Tablo 4.15: 6 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	82,715m		0+000,00m	0+082,71m				
2	Kurp	18,193m	92,478m	0+082,71m	0+100,91m	11,2717 (d)	18,164m	0,447	0,449m
3	Teğet	118,185m		0+100,91m	0+219,09m				
4	Kurp	53,845m	81,803m	0+219,09m	0+272,94m	37,7138 (d)	52,878m	4,390	4,639m
5	Teğet	90,458m		0+272,94m	0+363,40m				
6	Kurp	110,000m	74,055m	0+363,40m	0+473,40m	85,1064 (d)	100,163m	19,502	26,474m
7	Teğet	178,057m		0+473,40m	0+651,45m				
8	Kurp	49,999m	87,598m	0+651,45m	0+701,45m	32,7034 (d)	49,323m	3,543	3,693m
9	Teğet	0,013m		0+701,45m	0+701,47m				
10	Kurp	105,489m	70,000m	0+701,47m	0+806,96m	86,3441 (d)	95,787m	18,949	25,982m
11	Teğet	25,348m		0+806,96m	0+832,30m				
12	Kurp	49,998m	89,194m	0+832,30m	0+882,30m	32,1170 (d)	49,346m	3,480	3,622m
13	Teğet	70,781m		0+882,30m	0+953,08m				

Bu yol güzergahı, diğerlerinden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Daha kısa bir toplam uzunluğa sahip olması ve sadece üç adet profil kurpu bulundurması dikkat çekmektedir. Kurp uzunlukları 43,168m ile 92,426m arasında değişmekte olup, en yüksek K değeri ve yarıçapı %14,04'ten %15,00'e değişen eğimle 58,122m'de yer almaktadır. Diğer yandan, en düşük K değeri ve yarıçapı %6,04'ten %14,04'e değişen eğimle 46,886m'de bulunmaktadır. Güzergâh boyunca %0,78'den %15,00'e kadar değişen keskin eğim artışları dikkat çekmektedir. Bu yolun daha kısa olması ve daha yüksek eğim değişiklikleri içermesi, sürücülerin dikkatli olmalarını ve tasarımın bu değişiklikleri göz önünde bulundurarak yapılmasını gerektirmektedir. Bu güzergahın daha kısa olması ve daha dik eğim değişiklikleri içermesi, mühendislik açısından daha az kurp sayısıyla daha dik eğimlerin yönetilmesini gerektirmekte ve özellikle büyük eğim değişimlerinin bulunduğu bölgelerde araç hızlarının ve güvenliğin sağlanması için dikkatli bir tasarım gerektirmektedir (Tablo 4.16). Yol güzergâhına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

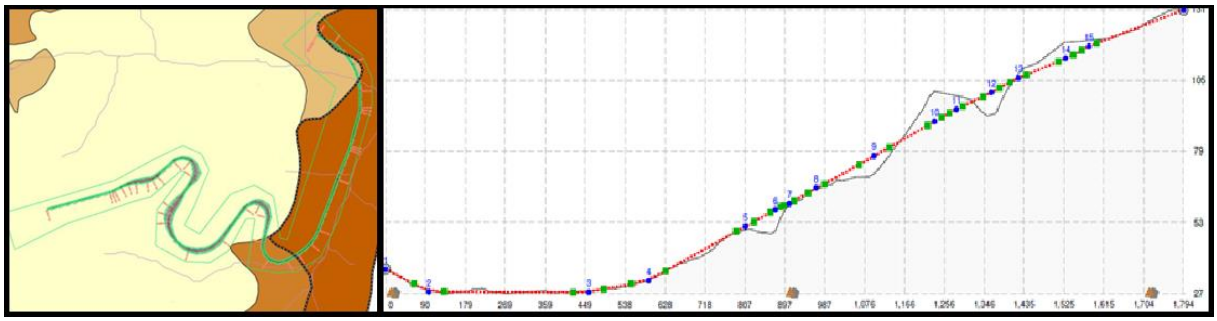
Tablo 4.16: 6 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,778m		%0,78					
2	0+240,60m	37,654m	%0,78	%6,04	Çukur	Simetrik parabol	92,426m	17,554	1.755,408m
3	0+393,34m	46,886m	%6,04	%14,04	Çukur	Simetrik parabol	72,000m	9	900,000m
4	0+473,34m	58,122m	%14,04	%15,00	Çukur	Simetrik parabol	43,168m	45,188	4.518,794m
5	0+952,94m	130,063m	%15,00						



Şekil 4.13: 6 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Alternatif güzergâh 7'ye ait teknik bulgular: 1.794,16 metre uzunluğa sahip olup, 16 düşey some içerir. Maksimum eğim %9,25, minimum düşey some aralığı 18,75 metredir. Bu alternatif, uzunluğu ve dengeli eğimiyle dikkat çekmektedir. Minimum yarıçapı 33,86 metre, tasarım hızı 30 km/sa olup, toplam 15 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.14-Tablo 4.17).



Şekil 4.14: 7 nolu alternatifin plan ve profili

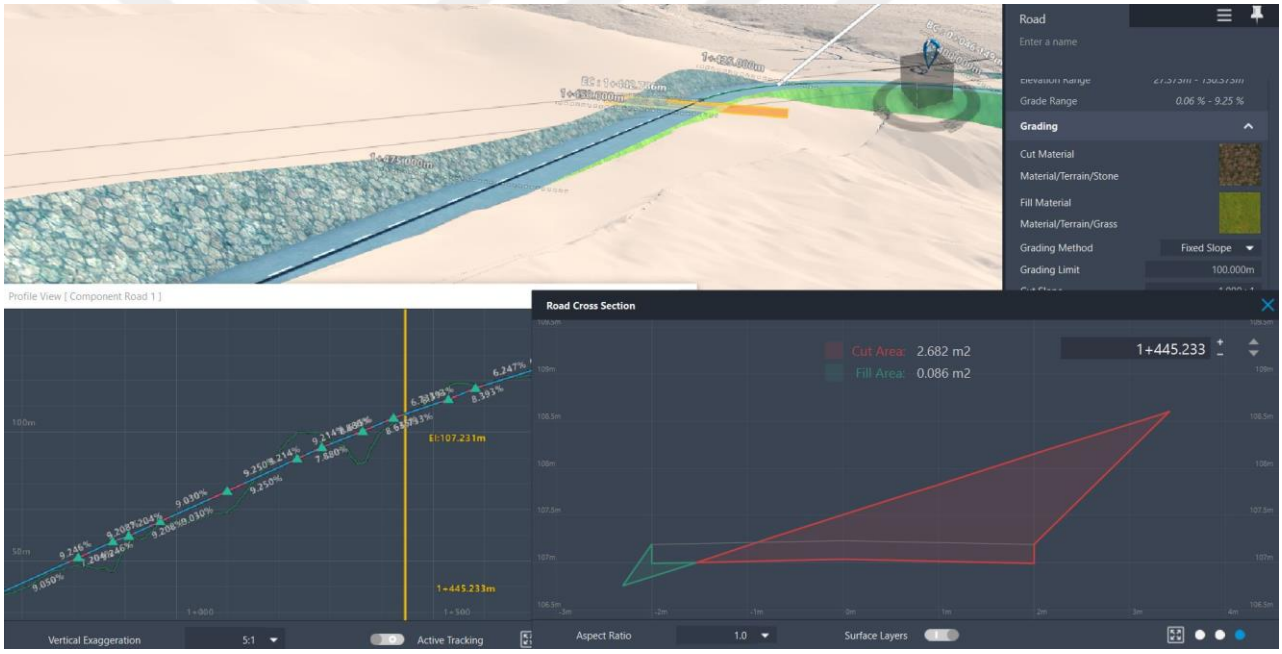
Tablo 4.17: 7 nolu alternatifin yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordinat	Bisektris Uzunluğu
1	Teğet	46,149m		0+000,00m	0+046,15m				
2	Kurp	141,998m	140,856m	0+046,15m	0+188,15m	57,7600 (d)	136,061m	17,518	20,006m
3	Teğet	43,102m		0+188,15m	0+231,25m				
4	Kurp	10,342m	37,354m	0+231,25m	0+241,59m	15,8636 (d)	10,309m	0,357	0,361m
5	Teğet	89,559m		0+241,59m	0+331,15m				
6	Kurp	10,962m	96,823m	0+331,15m	0+342,11m	6,4869 (d)	10,956m	0,155	0,155m
7	Teğet	80,550m		0+342,11m	0+422,66m				
8	Kurp	0,438m	44,473m	0+422,66m	0+423,10m	0,5640 (d)	0,438m	0,001	0,001m
9	Teğet	138,143m		0+423,10m	0+561,24m				
10	Kurp	80,003m	118,796m	0+561,24m	0+641,25m	38,5857 (d)	78,500m	6,671	7,068m
11	Teğet	34,327m		0+641,25m	0+675,57m				
12	Kurp	95,276m	41,190m	0+675,57m	0+770,85m	132,5284 (d)	75,412m	24,61	61,141m
13	Teğet	64,587m		0+770,85m	0+835,44m				
14	Kurp	92,537m	34,181m	0+835,44m	0+927,97m	155,1130 (d)	66,757m	26,816	124,449m
15	Teğet	100,639m		0+927,97m	1+028,61m				
16	Kurp	180,991m	74,450m	1+028,61m	1+209,60m	139,2892 (d)	139,601m	48,553	139,583m
17	Teğet	0,093m		1+209,60m	1+209,70m				
18	Kurp	37,923m	56,134m	1+209,70m	1+247,62m	38,7076 (d)	37,206m	3,172	3,362m
19	Teğet	95,167m		1+247,62m	1+342,78m				
20	Kurp	100,002m	34,407m	1+342,78m	1+442,79m	166,5255 (d)	68,339m	30,371	258,879m
21	Teğet	56,138m		1+442,79m	1+498,92m				
22	Kurp	28,277m	47,853m	1+498,92m	1+527,20m	33,8573 (d)	27,868m	2,074	2,167m
23	Teğet	28,781m		1+527,20m	1+555,98m				
24	Kurp	39,700m	114,229m	1+555,98m	1+595,68m	19,9133 (d)	39,501m	1,720	1,747m
25	Teğet	20,022m		1+595,68m	1+615,70m				
26	Kurp	12,559m	57,270m	1+615,70m	1+628,26m	12,5646 (d)	12,534m	0,344	0,346m
27	Teğet	166,295m		1+628,26m	1+794,56m				

Bu yol güzergahındaki eğim değişiklikleri genellikle %7,88'den %9,25'e kadar değişmektedir. Kurp uzunlukları 22,880m ile 78,116m arasında değişmektedir ve en uzun kurp 78,116m'de bulunmaktadır. Bu uzun kurp, %3,20'den %9,05'e değişen eğimlere sahiptir. En yüksek K değeri 859,958 ve en büyük yarıçap 85.995,785m ile %9,25'ten %9,21'e değişen eğimle 30,716m'de yer almaktadır. Diğer yandan, en düşük K değeri 8,194 ve en küçük yarıçap 819,381m ile % -8,45'ten % -0,06'ya değişen eğimle 68,753m'de bulunmaktadır(Tablo 4.18). Yol güzergahına ait BIM denetleme ekranı Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

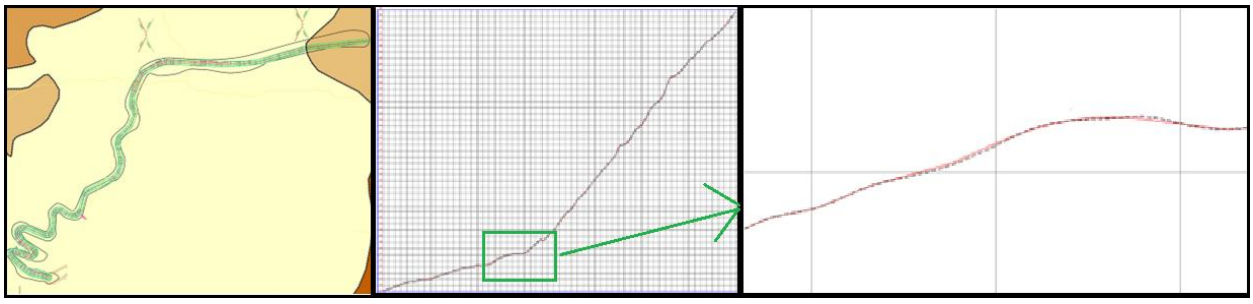
Tablo 4.18: 7 nolu alternatif güzergahın profil geometrisine ait bilgiler

No	Some Km	Some Kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp tipi	Kurp geometrisi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
1	0+000,00m	35,746m		%-8,45					
2	0+096,85m	27,563m	%-8,45	%-0,06	Çukur	Simetrik parabol	68,753m	8,194	819,381m
3	0+456,57m	27,353m	%-0,06	%3,20	Çukur	Simetrik parabol	70,340m	21,59	2.158,983m
4	0+591,16m	31,659m	%3,20	%9,05	Çukur	Simetrik parabol	78,116m	13,353	1.335,332m
5	0+808,76m	51,351m	%9,05	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	39,442m	200,716	20.071,570m
6	0+876,41m	57,606m	%9,25	%7,20	Tepe	Simetrik parabol	22,880m	11,203	1.120,307m
7	0+907,25m	59,828m	%7,20	%9,21	Çukur	Simetrik parabol	22,880m	11,417	1.141,723m
8	0+968,39m	65,458m	%9,21	%9,03	Tepe	Simetrik parabol	36,513m	205,917	20.591,667m
9	1+098,78m	77,232m	%9,03	%9,25	Çukur	Simetrik parabol	67,672m	308,276	30.827,590m
10	1+234,72m	89,807m	%9,25	%9,21	Tepe	Simetrik parabol	30,716m	859,958	85.995,785m
11	1+282,98m	94,254m	%9,21	%7,88	Tepe	Simetrik parabol	30,716m	23,017	2.301,709m
12	1+362,47m	100,518m	%7,88	%8,63	Çukur	Simetrik parabol	36,000m	47,684	4.768,389m
13	1+422,48m	105,699m	%8,63	%6,73	Tepe	Simetrik parabol	36,000m	18,934	1.893,426m
14	1+529,52m	112,907m	%6,73	%8,39	Çukur	Simetrik parabol	32,649m	19,668	1.966,792m
15	1+582,08m	117,318m	%8,39	%6,25	Tepe	Simetrik parabol	32,649m	15,214	1.521,395m
16	1+794,16m	130,567m	%6,25						



Şekil 4.15: 7 nolu alternatifin BIM modelinin 3B, profil ve kesit görünümü

Mevcut yola (alternatif güzergâh 8'e) ait teknik bulgular: 1.197,85 metre uzunluğunda olup, 34 düşey some içerir. Maksimum eğim %27, minimum düşey some aralığı ise 4,25 metredir. Mevcut yol, %27'lik yüksek eğimi ve sık düşey some aralıklarıyla diğer alternatiflerden ayrılmaktadır. Ayrıca, minimum yarıçapı 2,186 metre olup, dever eğimi %2,00'dir ve toplam 70 adet some bulunmaktadır (Şekil 4.16-Tablo 4.19).



Şekil 4.16: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin plan, profili ve 0+410.00-0+465.00 arası profil detay görünümü

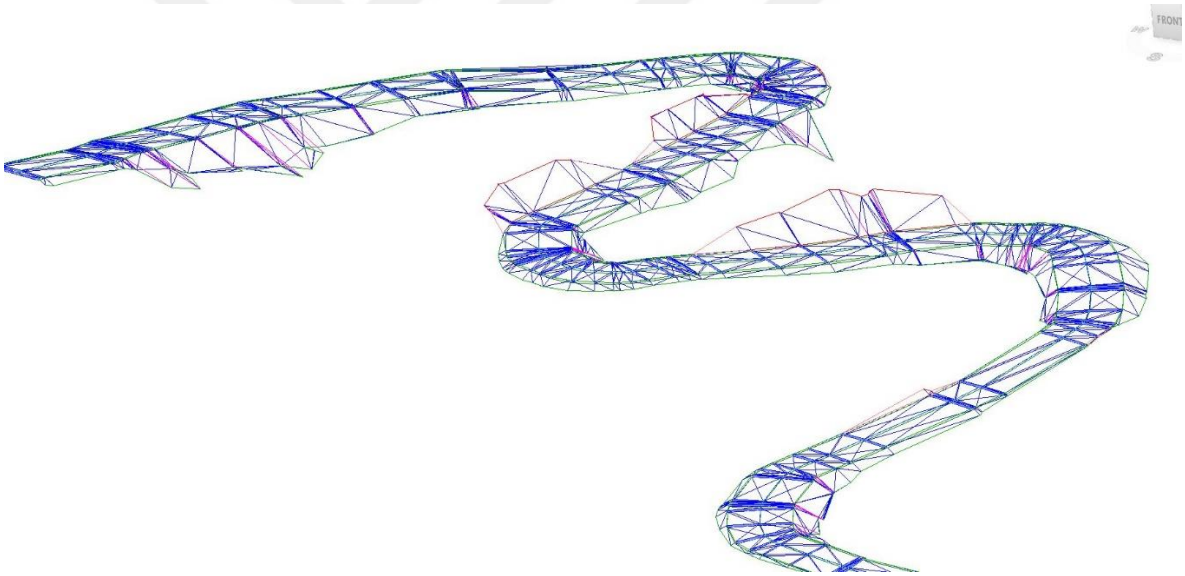
Tablo 4.19: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin (300-545m arası) yatay geometri bilgileri

No	Tip	Uzunluk	Yarıçap	Başlangıç Km	Bitiş Km	Delta açısı	Kiriş uzunluğu	Orta-Ordınasyon	Bisektris Uzunluğu
18	Kurp	9,020m	65,021m	0+299,68m	0+308,70m	7,9487 (d)	9,013m	0,156	0,157m
19	Teğet	20,848m		0+308,70m	0+329,55m				
20	Kurp	2,044m	65,021m	0+329,55m	0+331,59m	1,8012 (d)	2,044m	0,008	0,008m
21	Teğet	62,105m		0+331,59m	0+393,70m				
22	Kurp	2,194m	65,021m	0+393,70m	0+395,89m	1,9337 (d)	2,194m	0,009	0,009m
23	Teğet	11,807m		0+395,89m	0+407,70m				
24	Kurp	9,797m	31,802m	0+407,70m	0+417,50m	17,6506 (d)	9,758m	0,377	0,381m
25	Teğet	4,444m		0+417,50m	0+421,94m				
26	Kurp	5,904m	28,480m	0+421,94m	0+427,85m	11,8774 (d)	5,893m	0,153	0,154m
27	Teğet	11,499m		0+427,85m	0+439,35m				
28	Kurp	0,876m	28,480m	0+439,35m	0+440,22m	1,7616 (d)	0,876m	0,003	0,003m
29	Teğet	14,133m		0+440,22m	0+454,35m				
30	Kurp	17,645m	28,480m	0+454,35m	0+472,00m	35,4984 (d)	17,364m	1,356	1,423m
31	Teğet	11,399m		0+472,00m	0+483,40m				
32	Kurp	4,999m	28,480m	0+483,40m	0+488,40m	10,0577 (d)	4,993m	0,11	0,110m
33	Teğet	18,502m		0+488,40m	0+506,90m				
34	Kurp	4,730m	28,480m	0+506,90m	0+511,63m	9,5155 (d)	4,724m	0,098	0,098m
35	Teğet	11,565m		0+511,63m	0+523,20m				
36	Kurp	4,450m	28,480m	0+523,20m	0+527,65m	8,9524 (d)	4,445m	0,087	0,087m
37	Teğet	4,016m		0+527,65m	0+531,66m				
38	Kurp	5,259m	11,374m	0+531,66m	0+536,92m	26,4914 (d)	5,212m	0,303	0,311m
39	Teğet	7,393m		0+536,92m	0+544,31m				
40	Kurp	9,289m	11,233m	0+544,31m	0+553,60m	47,3804 (d)	9,027m	0,947	1,034m

Bu yol güzergahı oldukça çeşitli eğim değişiklikleri ve profil kurplarıyla karakterizedir. Profil boyunca genellikle çukur ve tepe tipi profil kurpları mevcuttur. Eğimler genellikle %7,54'ten %26,10'a kadar değişmektedir. Kurp uzunlukları 0,012m ile 32,159m arasında değişmektedir ve en uzun kurp 32,159m'dir. Bu uzun kurp, %7,71'den %13.40'a değişen eğimlere sahiptir. En yüksek K değeri 6,789 ve en büyük yarıçap 678,949m ile %5,51'den %5,44'e değişen eğimde 107,27m'de yer almaktadır. Diğer yandan, en düşük K değeri 0,002 ve en küçük yarıçap 0,184m ile %18,65'ten %18,91'e değişen eğimde bulunmaktadır. Bu yol, diğerlerine kıyasla daha çeşitli eğim değişiklikleri ve daha kısa kurplar içermektedir. Bu özellikleriyle sürücülerin dikkatli olması ve yol güvenliğine uygun bir şekilde sürüş yapmaları gerekmektedir (Tablo 4.20-Şekil 4.17).

Tablo 4.20: 8 nolu (mevcut yol) alternatifin (300-550m arası) profil bilgileri

Some no	Some km	Some kot	Giriş eğim	Çıkış eğim	Profil kurp	Kurp tipi	Profil kurp uzunluğu	K değeri	Kurp yarıçapı
14	0+291,40m	47,762m	%1,13	%2,62	Çukur	Simetrik parabol	12,133m	8,168	816,834m
15	0+321,81m	48,557m	%2,62	%-1,86	Tepe	Simetrik parabol	23,805m	5,315	531,516m
16	0+338,49m	48,247m	%-1,86	%3,10	Çukur	Simetrik parabol	5,252m	1,058	105,759m
17	0+350,35m	48,615m	%3,10	%1,00	Tepe	Simetrik parabol	2,211m	1,051	105,075m
18	0+367,53m	48,787m	%1,00	%8,46	Çukur	Simetrik parabol	27,792m	3,724	372,432m
19	0+390,61m	50,740m	%8,46	%2,46	Tepe	Simetrik parabol	11,128m	1,855	185,468m
20	0+404,58m	51,084m	%2,46	%5,30	Çukur	Simetrik parabol	6,860m	2,418	241,812m
21	0+414,45m	51,606m	%5,30	%1,10	Tepe	Simetrik parabol	6,739m	1,606	160,622m
22	0+420,16m	51,669m	%1,10	%3,42	Çukur	Simetrik parabol	4,674m	2,018	201,847m
23	0+426,31m	51,880m	%3,42	%2,21	Tepe	Simetrik parabol	1,761m	1,452	145,212m
24	0+435,40m	52,080m	%2,21	%3,64	Çukur	Simetrik parabol	0,399m	0,278	27,769m
25	0+448,13m	52,544m	%3,64	%-1,07	Tepe	Simetrik parabol	16,826m	3,572	357,200m
26	0+465,60m	52,358m	%-1,07	%1,65	Çukur	Simetrik parabol	3,465m	1,275	127,465m
27	0+487,89m	52,726m	%1,65	%10,64	Çukur	Simetrik parabol	11,860m	1,319	131,900m
28	0+501,66m	54,192m	%10,64	%7,21	Tepe	Simetrik parabol	0,034m	0,01	0,997m
29	0+517,42m	55,329m	%7,21	%10,56	Çukur	Simetrik parabol	5,057m	1,511	151,132m
30	0+534,38m	57,120m	%10,56	%-5,72	Tepe	Simetrik parabol	6,800m	0,418	41,758m
31	0+545,82m	56,465m	%-5,72	%11,27	Çukur	Simetrik parabol	7,876m	0,463	46,339m



Şekil 4.17: 8 nolu alternatifin AutoCAD Civil 3D yazılımındaki modeli

4.2. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT PARAMETRELERİN TEKNİK AÇINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Tez kapsamında oluşturulan mevcut yol ve bu yola ait yedi alternatif güzergâh, BIM ortamında modellendikten sonra, güzergâhlardaki parametrelere göre, sırasıyla teknik kriterler, ekolojik kriterler ve sosyal kriterler açısından ÇKKV yöntemleri kullanılarak kriterlerin ağırlıklandırması ve alternatiflerin sıralamasına ilişkin sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

4.2.1. Teknik Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular

Alternatif güzergahların teknik, ekolojik ve sosyal performanslarına ilişkin veriler, CRITIC yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Öncelikle, her bir performans kriteri için ayrı ayrı kriter ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Bu kriter ağırlıkları, MOORA yöntemine uygulanarak alternatifler arasında bir fayda-maliyet analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda, çalışmadaki alternatif güzergâhların teknik, ekolojik ve sosyal sıralamaları belirlenmiştir. Tablo 4.21'de, Dynamo yazılımı kullanılarak alternatiflerin BIM modellerinden çıkarılan bilgiler görülmektedir. Her bir satırda, alternatiflerden çıkarılan 16 farklı veri değişkeni bulunmaktadır.

Tablo 4.21: Yol geometrik kriterlerine ilişkin veri

			Alternatifler							
Kriterler	**Birim**	**Mak/Min**	**Yol 1**	**Yol 2**	**Yol 3**	**Yol 4**	**Yol 5**	**Yol 6**	**Yol 7**	**Mevcut yol**
Düşey kurp uzunluğu	metre	Mak	67,74	40,89	74,95	52,79	47,83	69,20	43,24	8,00
Min. kurp yarıçapı	metre	Mak	44,94	63,69	38,28	101,19	193,21	82,52	69,08	24,39
Boyuna yol eğimi	%	Min	0,09	0,06	0,07	0,06	0,07	0,09	0,07	0,09
Proje tasarım hızı	km/sa	Mak	30	40	20	50	30	20	30	20
Dere sayısı	adet	Min	3	4	9	3	2	3	2	4
Dolambaçlılık	oran	Min	1,86	1,84	2,37	2,51	1,89	1,17	2,18	1,51
Kıvrımlılık	oran	Min	0,99975	1,00031	1,00005	1,00009	0,99985	1,00003	0,999691	0,999546
Kum alanı	m^2	Mak	3.181,70	0,00	3.105,70	0,00	4.727,72	0,00	2.903,99	0,00
Yol eksen uzunluğu	m	Mak	1.531,68	1.511,36	1.944,76	2058,47	1.556,33	953,08	1.794,56	1.197,85
İnşaat alanı	m^2	Mak	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 şev oranı	oran	Mak	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	1	2
Ters eğim sayısı	adet	Min	3	0	1	4	3	0	1	10
Ort. dolgu yüksekliği	m	Min	1,04	2,63	1,20	7,26	3,83	2,73	2,89	0,92
Ort. kazı yüksekliği	m	Min	2,01	2,48	0,41	7,94	4,36	2,64	2,96	0,90
Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	oran	Min	0,16	0,51	0,07	0,65	0,70	0,88	0,54	1,65
Balçıklı kil alanı	m^2	Min	3.987,10	9.867,20	6.447,36	36.643,02	10.294,88	5.958,51	10.411,66	10.810,33

Çalışmada ilk olarak, kriter ağırlıklarını belirlemek için CRITIC yöntemi uygulanmıştır. CRITIC yöntemi uygulaması kapsamında oluşturulan Tablo 4.22'de belirtilen karar matrisinde, alternatifler ele alınmıştır.

Tablo 4.22: Karar matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	**Min. kurp yarıçapı**	**Boyuna yol eğimi**	**Proje tasarım hızı**	**Dere sayısı**	**Dolambaçlılık**	**Kıvrımlılık**	**Kum alanı**	**Yol eksen uzunluğu**	**İnşaat Alanı**	**Kazı şev oranı**	**Ters eğim sayısı**	**Ort. dolgu yüksekliği**	**Ort. kazı yüksekliği**	**Kazı hacmi/ Dolgu**	**Balçıklı Kil Alanı**
	Mak	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**
Mak	74,95	193,21	0,09	50	9	2,51	1,00	4.727,72	2.058,47	37.281,44	2	10	7,26	7,94	1,65	36.643,02
Min.	8,00	24,39	0,06	20	2	1,17	1,00	0,00	953,08	6.609,19	0,5	0	0,92	0,41	0,07	3.987,10
Fark	66,95	168,82	0,03	30	7	1,34	0,00	4.727,72	1.105,38	30.672,25	1,5	10	6,33	7,53	1,58	32.655,93

CRITIC yöntemi karar matrisi verisine, yöntemin ilk aşamasında Tablo 4.23'te ifade edilen CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.23: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Kum alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	Mak	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min	Min	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,89	0,12	0,14	0,33	0,86	0,48	0,73	0,67	0,52	0,04	0,00	0,70	0,98	0,79	0,94	1,00
Alternatif 2	0,49	0,23	0,96	0,67	0,71	0,50	0,00	0,00	0,51	0,13	0,00	1,00	0,73	0,72	0,72	0,82
Alternatif 3	1,00	0,08	0,81	0,00	0,00	0,10	0,34	0,66	0,90	0,13	0,00	0,90	0,96	1,00	1,00	0,92
Alternatif 4	0,67	0,45	1,00	1,00	0,86	0,00	0,40	0,00	1,00	1,00	0,33	0,60	0,00	0,00	0,63	0,00
Alternatif 5	0,59	1,00	0,65	0,33	1,00	0,46	0,60	1,00	0,55	0,38	0,33	0,70	0,54	0,48	0,60	0,81
Alternatif 6	0,91	0,34	0,00	0,00	0,86	1,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,71	0,70	0,49	0,94
Alternatif 7	0,53	0,26	0,59	0,33	1,00	0,24	0,81	0,61	0,76	0,26	0,33	0,90	0,69	0,66	0,70	0,80
Mevcut yol	0,00	0,00	0,17	0,00	0,71	0,74	1,00	0,00	0,22	0,18	1,00	0,00	1,00	0,94	0,00	0,79

Oluşturulan CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi ile yönteminin 2. aşamasında korelasyon matrisi elde edilmiştir. Oluşturulan korelasyon matrisi Tablo 4.24'te sunulmaktadır.

Tablo 4.24: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Kum alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**
Düşey kurp uzunluğu	1,00	0,10	0,03	-0,04	-0,31	-0,20	-0,45	0,33	0,23	-0,12	-0,87	0,72	-0,06	-0,04	0,81	0,16
Min. kurp yarıçapı	0,10	1,00	0,25	0,30	0,49	-0,07	-0,13	0,42	0,09	0,41	-0,07	0,19	-0,58	-0,60	0,03	-0,24
Boyuna yol eğimi	0,03	0,25	1,00	0,68	-0,24	-0,79	-0,56	0,04	0,79	0,60	-0,18	0,27	-0,55	-0,45	0,39	-0,55
Proje tasarım hızı	-0,04	0,30	0,68	1,00	0,36	-0,55	-0,38	-0,21	0,55	0,76	-0,13	0,12	-0,79	-0,82	0,22	-0,77
Dere sayısı	-0,31	0,49	-0,24	0,36	1,00	0,28	0,31	-0,02	-0,28	0,23	0,21	-0,09	-0,39	-0,52	-0,33	-0,20
Dolambaçlılık	-0,20	-0,07	-0,79	-0,55	0,28	1,00	0,13	-0,32	-1,00	-0,63	0,12	-0,12	0,44	0,40	-0,56	0,54
Kıvrımlılık	-0,45	-0,13	-0,56	-0,38	0,31	0,13	1,00	0,27	-0,16	-0,05	0,70	-0,69	0,29	0,18	-0,46	0,12
Kum alanı	0,33	0,42	0,04	-0,21	-0,02	-0,32	0,27	1,00	0,33	-0,13	-0,20	0,19	0,20	0,14	0,51	0,37
Yol eksen uzunluğu	0,23	0,09	0,79	0,55	-0,28	-1,00	-0,16	0,33	1,00	0,63	-0,15	0,15	-0,45	-0,41	0,58	-0,53
İnşaat alanı	-0,12	0,41	0,60	0,76	0,23	-0,63	-0,05	-0,13	0,63	1,00	0,25	-0,21	-0,91	-0,89	-0,05	-0,97
Kazı şev oranı	-0,87	-0,07	-0,18	-0,13	0,21	0,12	0,70	-0,20	-0,15	0,25	1,00	-0,90	0,01	-0,01	-0,84	-0,25
Ters eğim sayısı	0,72	0,19	0,27	0,12	-0,09	-0,12	-0,69	0,19	0,19	0,19	0,19	1,00	-0,10	-0,04	0,72	0,23
Ort. dolgu yüksekliği	-0,06	-0,58	-0,55	-0,79	-0,39	0,44	0,29	0,20	-0,45	-0,91	0,01	-0,10	1,00	0,98	-0,01	0,89
Ort. kazı yüksekliği	-0,04	-0,60	-0,45	-0,82	-0,52	0,40	0,18	0,14	-0,41	-0,89	-0,01	-0,04	0,98	1,00	-0,01	0,87
Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	0,81	0,03	0,39	0,22	-0,33	-0,56	-0,46	0,51	0,58	-0,05	-0,84	0,72	-0,01	-0,01	1,00	0,14
Balçıklı kil alanı	0,16	-0,24	-0,55	-0,77	-0,20	0,54	0,12	0,37	-0,53	-0,97	-0,25	0,23	0,89	0,87	0,14	1,00

Korelasyon katsayısı ve standart sapma ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşan sonuçları yansıtan **Pjk** katsayıları, yöntemin 3. aşamasında yer alan denklemlerle oluşturularak Tablo 4.25'te ifade edilmiştir.

Tablo 4.25: P*Jk* katsayıları

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Kum alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**	**Min**
Düşey kurp uzunluğu	0,00	0,90	0,97	1,04	1,31	1,20	1,45	0,67	0,77	1,12	1,87	0,28	1,06	1,04	0,19	0,84
Min. kurp yarıçapı	0,90	0,00	0,75	0,70	0,51	1,07	1,13	0,58	0,91	0,59	1,07	0,81	1,58	1,60	0,97	1,24
Boyuna yol eğimi	0,97	0,75	0,00	0,32	1,24	1,79	1,56	0,96	0,21	0,40	1,18	0,73	1,55	1,45	0,61	1,55
Proje tasarım hızı	1,04	0,70	0,32	0,00	0,64	1,55	1,38	1,21	0,45	0,24	1,13	0,88	1,79	1,82	0,78	1,77
Dere sayısı	1,31	0,51	1,24	0,64	0,00	0,72	0,69	1,02	1,28	0,77	0,79	1,09	1,39	1,52	1,33	1,20
Dolambaçlılık	1,20	1,07	1,79	1,55	0,72	0,00	0,87	1,32	2,00	1,63	0,88	1,12	0,56	0,60	1,56	0,46
Kıvrımlılık	1,45	1,13	1,56	1,38	0,69	0,87	0,00	0,73	1,16	1,05	0,30	1,69	0,71	0,82	1,46	0,88
Kum alanı	0,67	0,58	0,96	1,21	1,02	1,32	0,73	0,00	0,67	1,13	1,20	0,81	0,80	0,86	0,49	0,63
Yol eksen uzunluğu	0,77	0,91	0,21	0,45	1,28	2,00	1,16	0,67	0,00	0,37	1,15	0,85	1,45	1,41	0,42	1,53
İnşaat alanı	1,12	0,59	0,40	0,24	0,77	1,63	1,05	1,13	0,37	0,00	0,75	1,21	1,91	1,89	1,05	1,97
Kazı şev oranı	1,87	1,07	1,18	1,13	0,79	0,88	0,30	1,20	1,15	0,75	0,00	1,90	0,99	1,01	1,84	1,25
Ters eğim sayısı	0,28	0,81	0,73	0,88	1,09	1,12	1,69	0,81	0,81	0,81	0,81	0,00	1,10	1,04	0,28	0,77
Ort. dolgu yüksekliği	1,06	1,58	1,55	1,79	1,39	0,56	0,71	0,80	1,45	1,91	0,99	1,10	0,00	0,02	1,01	0,11
Ort. kazı yüksekliği	1,04	1,60	1,45	1,82	1,52	0,60	0,82	0,86	1,41	1,89	1,01	1,04	0,02	0,00	1,01	0,13
Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	0,19	0,97	0,61	0,78	1,33	1,56	1,46	0,49	0,42	1,05	1,84	0,28	1,01	1,01	0,00	0,86
Balçıklı kil alanı	0,84	1,24	1,55	1,77	1,20	0,46	0,88	0,63	1,53	1,97	1,25	0,77	0,11	0,13	0,86	0,00

Daha sonra *Pjk* katsayılarına, yöntemin son aşamasında belirtilen denklemin uygulanması ile hesaplanan tüm kriter ağırlık değerlerine ilişkin sonuçlar, Tablo 4.26'da sunulmuştur. Tabloya göre standart sapma değerleri, parametreler arasında genel bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Değerlerin çoğu 0,30 ile 0,40 arasında değişmektedir, bu da ölçümlerin orta derecede değişkenlik gösterdiği anlamına gelmektedir. *Cj* katsayıları, belirli parametrelerin diğerlerine göre daha fazla değişkenlik gösterebileceğini ve ölçümlerin biraz daha değişken olduğunu göstermektedir. Özellikle, dolambaçlılık ve kıvrımlılık parametreleri diğerlerine göre daha yüksek *Cj* katsayılarına sahiptir, bu da bu parametrelerin daha fazla değişkenlik gösterdiğini belirtmektedir. *Wj* ağırlıkları, her bir parametrenin genel değerlendirmedeki katkısının benzer olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.26: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	A Alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	Mak	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min	Min	Min	Min	Min
Standart Sapma	0,32	0,31	0,39	0,36	0,32	0,33	0,32	0,41	0,33	0,32	0,35	0,33	0,33	0,31	0,31	0,32
***Cj* katsayısı**	4,43	4,13	5,35	4,96	4,60	5,54	4,76	5,11	4,36	4,39	5,17	4,53	5,22	5,03	4,00	4,82
Wj	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07

4.2.2. Teknik Kriterlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular

Teknik kriterlerin, yol güzergâhlarının sıralamasına ait öncelikle normalizasyon matrisi sonuçları (Tablo 4.27) ortaya konmuştur.

Tablo 4.27: MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	A Alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	Mak	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min	Min	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,44	0,17	0,40	0,34	0,25	0,34	0,35	0,45	0,34	0,16	0,18	0,26	0,11	0,19	0,07	0,09
Alternatif 2	0,27	0,25	0,30	0,45	0,33	0,33	0,35	0,00	0,33	0,22	0,18	0,00	0,27	0,24	0,23	0,23
Alternatif 3	0,49	0,15	0,32	0,22	0,74	0,43	0,35	0,44	0,43	0,22	0,18	0,09	0,12	0,04	0,03	0,15
Alternatif 4	0,34	0,39	0,30	0,56	0,25	0,45	0,35	0,00	0,45	0,76	0,35	0,34	0,75	0,76	0,29	0,85
Alternatif 5	0,31	0,74	0,34	0,34	0,16	0,34	0,35	0,66	0,34	0,37	0,35	0,26	0,40	0,42	0,31	0,24
Alternatif 6	0,45	0,32	0,41	0,22	0,25	0,21	0,35	0,00	0,21	0,13	0,18	0,00	0,28	0,25	0,39	0,14
Alternatif 7	0,28	0,27	0,34	0,34	0,16	0,39	0,35	0,41	0,40	0,30	0,35	0,09	0,30	0,28	0,24	0,24
Mevcut yol	0,05	0,09	0,40	0,22	0,33	0,27	0,35	0,00	0,26	0,24	0,71	0,86	0,10	0,09	0,74	0,25

Takip eden aşamada ise CRITIC yöntemi kriter ağırlık değerlerinin her birinin ilgili kritere ilişkin sütun vektörü ile çarpılmasıyla, Tablo 4.28'de gösterilen MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.28: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	A Alanı	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi	Balçıklı Kil Alanı
	Mak	Mak	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min	Min	Min	Min	Min
Alternatif 1	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01
Alternatif 2	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,02
Alternatif 3	0,03	0,01	0,02	0,02	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Alternatif 4	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,00	0,03	0,05	0,03	0,02	0,05	0,05	0,02	0,06
Alternatif 5	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Alternatif 6	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01
Alternatif 7	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Mevcut yol	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	0,04	0,02

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 Tablo 4.29'da ifade edildiği üzeredir. Buna göre en iyi performans gösteren alternatifler sırasıyla 5, 1, 7, 3, 2, 6, mevcut yol ve 4. alternatif olarak sıralanmıştır. Bu sıralamaya göre, en iyi performansa sahip olan alternatifin alternatif 5 olduğu ve en düşük performansın alternatif 4 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.29: Fayda-maliyet analizi değerleri

	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Mevcut yol
Yi	0,000792	0,018174575	0,078968	-0,053438973	0,064567	0,014948	0,033989	0,010403
Sıralaması	2	5	4	8	1	6	3	7

4.3. EKOLOJİK AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI

4.3.1. Ekolojik Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular

MOORA yöntemiyle 14 farklı kriterin ağırlıkları dikkate alınarak alternatifler arasında bir fayda-maliyet analizi yapılmıştır (Tablo 4.30). Bu analiz sonucunda, çalışmadaki alternatif güzergahların ekolojik sıralamaları belirlenmiştir.

Tablo 4.30: Yol ekolojik kriterlerine ilişkin veri

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. 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	0,999751	1.531,68	7.920,04	0,50	3	1,04	2,01	0,16
Alternatif 2	40,89	63,69	0,06	40	4	1,84	1,000317	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	1,000055	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	1,000009	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	0,999854	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	1,000029	953,08	6609,19	0,50	0	2,73	2,64	0,88
Alternatif 7	43,24	69,08	0,07	30	2	2,18	0,999691	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	0,999546	1.197,85	11.992,04	2,00	10	0,92	0,90	1,65

Öncelikle kriter ağırlıklarını belirlemek için CRITIC yöntemi uygulanmıştır. CRITIC yöntemi uygulaması kapsamında oluşturulan Tablo 4.31'de belirtilen karar matrisinde, alternatifler ele alınmıştır.

Tablo 4.31: Karar matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Maks.	74,95	193,21	0,09	50,00	0,00	2,51	1,000317	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	0,999546	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	0,000771	1.105,38	30.672,25	1,50	10,00	6,33	7,53	1,58

CRITIC yöntemi karar matrisi verisiyle yöntemin ilk aşamasında Tablo 4.32'da ifade edilen CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.32: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. 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

Oluşturulan CRITIC yöntemi Normalizasyon matrisiyle, yönteminin 2.Aşamasında korelasyon matrisi elde edilmiştir. İlgili korelasyon matrisi Tablo 4.33'te belirtilmiştir.

Tablo 4.33: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. 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
Min. 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
Boyuna yol 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
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 şev oranı	-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 sayısı	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
Ort. 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
Ort. 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

Korelasyon katsayısı ve Standart sapma ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşan sonuçları yansıtan *Pjk* katsayıları, yöntemin 3. Aşamasında yer alan denklemlerle oluşturularak Tablo 4.34'te ifade edilmiştir.

Tablo 4.34: *PJk* katsayıları

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
Düşey kurp uzunluğu	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 yarıçapı	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
Boyuna 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
Proje tasarım hızı	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
Yol eksen uzunluğu	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 şev oranı	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 sayısı	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 yüksekliği	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 yüksekliği	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 hacmi/ Dolgu hacmi	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

Daha sonra *Pjk* Katsayılarına, yöntemin son aşamasında belirtilen formülün uygulanması ile hesaplanan tüm kriter ağırlık değerlerine ilişkin sonuçlar, Tablo 4.35'te 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.

Tablo 4.35: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. 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

4.3.2. Ekolojik Kriterlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular

Ekolojik kriterlerin MOORA sıralama yöntemi kapsamında oluşturulan normalizayon matrisi sonuçları Tablo 4.36'de belirtilmiştir.

Tablo 4.36: MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi

	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu hacmi
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Max	Min	Min	Min	Max	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

Takip eden aşamada ise CRITIC yöntemi kriter ağırlık değerlerinin her birinin ilgili kritere ilişkin sütün vektörü ile çarpılmasıyla, Tablo 4.37'de gösterilen MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.37: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi

Alternatif no	Düşey kurp uzunluğu	Min. kurp yarıçapı	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat Alanı	Kazı şev oranı	Ters eğim sayısı	Ort. dolgu yüksekliği	Ort. kazı yüksekliği	Kazı hacmi/ Dolgu
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min	Mak	Min	Min	Min
1	0,033	0,011	0,044	0,022	0,021	0,021	0,027	0,021	0,009	0,014	0,021	0,006	0,010	0,006
2	0,020	0,015	0,033	0,030	0,028	0,020	0,027	0,021	0,011	0,014	0,000	0,015	0,013	0,017
3	0,037	0,009	0,035	0,015	0,062	0,026	0,027	0,027	0,012	0,014	0,007	0,007	0,002	0,002
4	0,026	0,024	0,033	0,037	0,021	0,028	0,027	0,028	0,040	0,028	0,028	0,042	0,041	0,022
5	0,023	0,047	0,037	0,022	0,014	0,021	0,027	0,021	0,020	0,028	0,021	0,022	0,022	0,024
6	0,034	0,020	0,046	0,015	0,021	0,013	0,027	0,013	0,007	0,014	0,000	0,016	0,014	0,030
7	0,021	0,017	0,038	0,022	0,014	0,024	0,027	0,025	0,016	0,028	0,007	0,017	0,015	0,019
Mevcut yol	0,004	0,006	0,044	0,015	0,028	0,017	0,027	0,016	0,013	0,057	0,069	0,005	0,005	0,057

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 Tablo 4.38'de ifade edildiği üzeredir. Buna

göre en iyi performans sıralaması mevcut yolda iken, en düşük performansı ise 4 numaralı yol almıştır.

Tablo 4.38: Fayda-maliyet analizi değerleri

	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Mevcut yol
Yi	-0,16959	-0,211197898	-0,21401	-0,316059231	-0,25503	-0,21509	-0,22173	-0,16938
Sıralaması	2	3	4	8	7	5	6	1

4.4. ALTERNATİF YOL GÜZERGAHLARINA AİT PARAMETRELERİN SOSYAL AÇIDAN KARŞILAŞTIRILMASI

4.4.1. Sosyal Kriterler Açısından Ağırlıklandırma Sonuçlarına Ait Bulgular

Sosyal kriterler açısından alternatif yollara ait kriterlere ilişkin veri seti Tablo 4.39'da belirtilmiştir. Ardından karar matrisi oluşturulmuştur (Tablo 4.40).

Tablo 4.39: Yolun sosyal kriterlere ilişkin verisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min
Alternatif 1	0,0860	30,0000	3,0000	1,8642	0,9998	1.531,6814	7.920,0364
Alternatif 2	0,0650	40,0000	4,0000	1,8394	1,0003	1.511,3565	10.621,8343
Alternatif 3	0,0690	20,0000	9,0000	2,3669	1,0001	1.944,7553	10.657,3861
Alternatif 4	0,0641	50,0000	3,0000	2,5053	1,0000	2.058,4666	37.281,4358
Alternatif 5	0,0731	30,0000	2,0000	1,8942	0,9999	1.556,3314	18.414,5845
Alternatif 6	0,0897	20,0000	3,0000	1,1665	1,0000	953,0829	6.609,1870
Alternatif 7	0,0745	30,0000	2,0000	2,1841	0,9997	1.794,5583	14.628,3101
Mevcut yol	0,0854	20,0000	4,0000	1,5129	0,9995	1.197,8548	11.992,0439

Tablo 4.40: Karar matrisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Min	Min	Min	Min	Mak
Maks.	0,0897	50,0000	0,0000	2,5053	1,0003	2.058,4666	37.281,4358
Min.	0,0641	20,0000	6,0000	1,1665	0,9995	953,0829	6.609,1870
Fark	0,0256	30,0000	-6,0000	1,3388	0,0008	1.105,3837	30.672,2489

CRITIC yöntemiyle karar matrisi verisi oluşturulduktan sonra yöntemin diğer aşamasına geçilmiştir (Tablo 4.40). Bu aşamada Tablo 4.41'de ifade edilen CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.41: CRITIC yöntemi normalizasyon matrisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min
Alternatif 1	0,1430	0,6667	0,1429	0,5211	0,2651	0,5234	0,9573
Alternatif 2	0,9633	0,3333	0,2857	0,5026	1,0000	0,5050	0,8692
Alternatif 3	0,8072	1,0000	1,0000	0,8966	0,6600	0,8971	0,8680
Alternatif 4	1,0000	0,0000	0,1429	1,0000	0,6006	1,0000	0,0000
Alternatif 5	0,6476	0,6667	0,0000	0,5435	0,3996	0,5457	0,6151
Alternatif 6	0,0000	1,0000	0,1429	0,0000	0,6265	0,0000	1,0000
Alternatif 7	0,5910	0,6667	0,0000	0,7601	0,1881	0,7613	0,7386
Mevcut yol	0,1652	1,0000	0,2857	0,2588	0,0000	0,2214	0,8245

Oluşturulan CRITIC yöntemi normalizasyon matrisiyle, yönteminin 2. aşamasında korelasyon matrisi elde edilmiştir. Oluşturulan korelasyon matrisi Tablo 4.42'de verilmiştir.

Tablo 4.42: CRITIC yöntemi korelasyon matrisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min
Boyuna yol eğimi	1,0000	-0,6817	0,2430	0,7876	0,5605	0,7913	-0,5982
Proje tasarım hızı	-0,6817	1,0000	0,3560	-0,5477	-0,3849	-0,5549	0,7608
Dere sayısı	0,2430	0,3560	1,0000	0,2847	0,3131	0,2777	0,2265
Dolambaçlılık	0,7876	-0,5477	0,2847	1,0000	0,1337	0,9993	-0,6346
Kıvrımlılık	0,5605	-0,3849	0,3131	0,1337	1,0000	0,1557	-0,0538
Yol eksen uzunluğu	0,7913	-0,5549	0,2777	0,9993	0,1557	1,0000	-0,6284
İnşaat alani	-0,5982	0,7608	0,2265	-0,6346	-0,0538	-0,6284	1,0000

Korelasyon katsayısı ve standart sapma ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşan sonuçları yansıtan *Pjk* katsayıları, yöntemin 3. aşamasında yer alan denklemlerle oluşturularak Tablo 4.43'te ifade edilmiştir.

Tablo 4.43: P*Jk* katsayıları

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min
Boyuna yol eğimi	0,0000	1,6817	0,7570	0,2124	0,4395	0,2087	1,5982
Proje tasarım hızı	1,6817	0,0000	0,6440	1,5477	1,3849	1,5549	0,2392
Dere sayısı	0,7570	0,6440	0,0000	0,7153	0,6869	0,7223	0,7735
Dolambaçlılık	0,2124	1,5477	0,7153	0,0000	0,8663	0,0007	1,6346
Kıvrımlılık	0,4395	1,3849	0,6869	0,8663	0,0000	0,8443	1,0538
Yol eksen uzunluğu	0,2087	1,5549	0,7223	0,0007	0,8443	0,0000	1,6284
İnşaat alani	1,5982	0,2392	0,7735	1,6346	1,0538	1,6284	0,0000

Daha sonra *Pjk* katsayılarına yöntemin son aşamasında belirtilen formülün uygulanması ile hesaplanan tüm kriter ağırlık değerlerine ilişkin sonuçlar, Tablo 4.44'te sunulmuştur. Standart sapması ve *Cj* katsayısı diğer parametrelere göre daha düşük olan yol eğiminin, aynı zamanda *Wj* ağırlığı da diğerlerine göre daha yüksektir. Bu, Yol Eğiminin değerlendirme sürecinde önemli bir role sahip olduğunu ve karar verme sürecinde dikkate alınması gerektiğini gösterir. Hız parametresi, diğer parametrelere göre orta seviyede bir standart sapma ve *Cj* katsayısına sahiptir. Ancak, Yol Eğimi kadar yüksek bir *Wj* ağırlığına sahip değildir, bu da Yol Eğimi kadar önemli olmadığını gösterebilir. Dere Sayısı parametresi, düşük standart sapma ve *Cj* katsayısı ile karar verme sürecinde daha istikrarlı bir role sahiptir. Ancak, *Wj* ağırlığı diğer parametrelere göre daha düşüktür, bu nedenle karar verme sürecinde diğer parametreler kadar etkili olmayabilir. Dolambaçlılık parametresi, düşük standart sapma ve *Cj* katsayısı ile istikrarlı bir şekilde ölçülmektedir. Ancak, *Wj* ağırlığı diğer parametrelere göre daha düşüktür, bu da Dolambaçlılık parametresinin karar verme sürecinde daha az etkili olabileceğini gösterir. Kıvrımlılık parametresi, diğer parametrelere göre düşük standart sapma ve *Cj* katsayısına sahiptir. Ancak, *Wj* ağırlığı diğer parametrelere göre daha düşüktür, bu da Kıvrımlılık parametresinin karar verme sürecinde daha az etkili olabileceğini gösterir. Eksen *L* parametresi, düşük standart sapma ve *Cj* katsayısı ile istikrarlı bir şekilde ölçülmektedir. Ancak, *Wj* ağırlığı diğer parametrelere göre daha düşüktür, bu da Eksen *L* parametresinin karar verme sürecinde daha az etkili olabileceğini gösterir. İnşaat Alanı parametresi, düşük standart sapma ve *Cj* katsayısı ile istikrarlı bir şekilde ölçülmektedir. Ancak, *Wj* ağırlığı diğer parametrelere göre daha düşüktür, bu da İnşaat Alanı parametresinin karar verme sürecinde daha az etkili olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.44: CRITIC yöntemi ile hesaplanan standart sapma, Cj ve kriter ağırlıkları

	Boyuna yol eğimi	**Proje tasarım hızı**	**Dere sayısı**	**Dolambaçlılık**	**Kıvrımlılık**	**Yol eksen uzunluğu**	**İnşaat alani**
	Min	**Min**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Mak**	**Min**
Standart Sapma	0,3902	0,3563	0,3217	0,3287	0,3175	0,3339	0,3203
Cj katsayısı	1,9113	2,5131	1,3830	1,6360	1,6753	1,6560	2,2186
Wj	0,1471	0,1934	0,1064	0,1259	0,1289	0,1274	0,1708

4.4.2. Sosyal Kritelerlerin Sıralama Sonuçlarına Ait Bulgular

Sosyal kriterlere göre alternatif yolların MOORA sıralama yöntemine sıralama amaçlı oluşturulan normalizasyon matrisi Tablo 4.45'te gösterilmiştir.

Tablo 4.45 : MOORA önem katsayısı yaklaşımı normalizasyon matrisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Mak	Mak	Mak	Mak	Min
Alternatif 1	0,3979	0,3354	0,2466	0,3362	0,3535	0,3372	0,1610
Alternatif 2	0,3007	0,4472	0,3288	0,3317	0,3537	0,3327	0,2159
Alternatif 3	0,3192	0,2236	0,7398	0,4269	0,3536	0,4281	0,2167
Alternatif 4	0,2963	0,5590	0,2466	0,4518	0,3536	0,4531	0,7579
Alternatif 5	0,3381	0,3354	0,1644	0,3416	0,3535	0,3426	0,3744
Alternatif 6	0,4149	0,2236	0,2466	0,2104	0,3536	0,2098	0,1344
Alternatif 7	0,3448	0,3354	0,1644	0,3939	0,3535	0,3950	0,2974
Mevcut yol	0,3953	0,2236	0,3288	0,2729	0,3534	0,2637	0,2438

Takip eden aşamada ise CRITIC yöntemi kriter ağırlık değerlerinin her birinin Tablo 4.45'te yer alan ilgili kritere ilişkin sütün vektörü ile çarpılmasıyla, Tablo 4.46'da gösterilen MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 4.46: MOORA önem katsayısı yaklaşımı ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi

	Boyuna yol eğimi	Proje tasarım hızı	Dere sayısı	Dolambaçlılık	Kıvrımlılık	Yol eksen uzunluğu	İnşaat alani
	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min
Alternatif 1	0,0585	0,0649	0,0262	0,0423	0,0456	0,0430	0,0275
Alternatif 2	0,0442	0,0865	0,0350	0,0418	0,0456	0,0424	0,0369
Alternatif 3	0,0470	0,0432	0,0787	0,0537	0,0456	0,0546	0,0370
Alternatif 4	0,0436	0,1081	0,0262	0,0569	0,0456	0,0578	0,1294
Alternatif 5	0,0497	0,0649	0,0175	0,0430	0,0456	0,0437	0,0639
Alternatif 6	0,0610	0,0432	0,0262	0,0265	0,0456	0,0267	0,0229
Alternatif 7	0,0507	0,0649	0,0175	0,0496	0,0456	0,0503	0,0508
Mevcut yol	0,0581	0,0432	0,0350	0,0344	0,0456	0,0336	0,0416

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 Tablo 4.47'de ifade edildiği üzeredir. Bu sıralama sonuçlarına göre en iyi sıralama skoru 3 numaralı alternatif yol için elde edilirken, en düşük sıralama skoru ise 4 numaralı alternatif yol için elde edilmiştir.

Tablo 4.47: Fayda-maliyet analizi değerleri

	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Alternatif 8
Yi	0,0062330	-0,0028274	0,1054493	-0,0946488	-0,028771	-0,0021475	-0,0033550	0,0055077
Sıralaması	2	5	1	8	7	4	6	3

4.5. ALTERNATİF YOL GÜZERGÂHLARININ MALİYETLERİNE AİT BULGULAR

Orman yolları, ormancılık faaliyetlerinde kritik bir altyapı unsuru olarak kabul edilir ve inşaat ile bakım maliyetleri oldukça yüksek seviyelere çıkar. Orman yolu planlama aşamasında, teknik ve çevresel gereksinimleri karşılayan, en uygun maliyetli alternatif rotanın belirlenmesi önemlidir (Çalışkan ve Çağlar, 2010).

Teknik, ekolojik ve sosyal açıdan en iyi alternatif bulunurken CRITIC ve MOORA yöntemlerine başvurulmuş, maliyet hesabı BIM modellerinden çekilen değerlerle yapılmıştır. Yol inşaat maliyetlerinin hesaplanması çok detaylı bir hesaplama gerektirmektedir. Bu doktora tezi kapsamında maliyet hesabı için kazı-dolgu miktarları ve sanat yapıları dikkate alınmıştır.

Toprak yollarda, yüzeysel aksla gelen materyalin yolun diğer tarafına aktarılmasında hendek ve büzlerin kullanımının ekonomik bir çözüm yolu olacağı belirtilmiştir (Cook ve Hewlett, 1979). Orman yollarının akarsu yataklarını geçişi için sanat yapıları gereklidir. Bu yapılar, yol maliyetini artıran en önemli unsurlardan biridir (Çalışkan ve diğ., 2004).

Bu hesap yapılırken alt maliyet kalemlerinin hesaplanmasında Türkiye'deki bazı idarelerin birim fiyat cetvellerindeki pozlardan yararlanılmıştır.

Maliyet hesabında kullanılacak ve alternatif yolların BIM modellerinden çıkarılan değerler Tabloda 4.48'de gösterilmiştir. Alternatif 4, en yüksek kazı ve dolgu miktarına sahiptir, bu da yolun inşası sırasında büyük ölçekli toprak hareketlerinin ve dolguların gerekeceğini işaret etmektedir. Alternatif 2 ve Alternatif 5'te önemli kazı ve dolgu miktarlarına sahiptir. Bunlar, yolun geçtiği alanlarda önemli topoğrafik değişikliklerin beklendiğini gösterir. Diğer yandan, Alternatif 6 ve 7 daha ılımlı kazı ve dolgu miktarlarına sahiptir. Menfez sayılarına gelince, Alternatif 3 en yüksek menfez sayısına sahiptir. Bu, yolun geçtiği alanlarda su yönetimi için daha fazla menfeze ihtiyaç olduğunu gösterir. Alternatif 1, 4 ve 6 da birbirine yakın menfez sayılarına sahiptir. Mevcut yolun ise en düşük kazı ve dolgu miktarına ve menfez sayısına sahip

olduğu, bunun da mevcut yolun daha az değişiklik gerektirebileceğini veya daha az su yönetimi sorunuyla karşılaşabileceği tespit edilmiştir.

Tablo 4.48: Alternatif yol güzergâhlarına ait kazı, dolgu ve menfez değerleri

Alternatif No	Kazı hacmi (m^3)	Dolgu hacmi (m^3)	Menfez Sayısı
1	697,91	532,82	3
2	11.149,34	8.480,05	4
3	2.588,28	1.968,26	9
4	75.376,90	122.952,18	3
5	30.255,01	24.830,92	2
6	3.412,59	8.727,28	3
7	17.475,06	13.557,63	2
Mevcut Yol	1.089,23	15,83	4

Bulunan bu metrajlar için maliyet çalışması yapılmıştır. İlk olarak kazı metrajları maliyet hesabı için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2024 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatlarından faydalanılmıştır. Kazı pozu için 15.120.1001 nolu "*makine ile yumuşak ve sert toprak kazılması (serbest kazı)*" pozu kullanılmıştır. Bu poz kazı, kazının taşıtlara yüklenmesi, 25 metre mesafeye kadar taşınması, boşaltılması, depo veya dolguya konulması, kazının serilmesi, kazı yeri, depo ve dolgunun tesviyesi, düzeltilmesi, boşlukların doldurulması ve makine ekipman kiralarını içermektedir. Tablo 4.49'da bu kalemlere göre hesaplanan kazı maliyetlerinde 4 nolu alternatifin en yüksek kazı maliyeti içerdiği görülmektedir.

Tablo 4.49: Alternatif yol güzergahlarına ait kazı maliyeti hesabı

Alternatif No	Kazı (m^3)	Birim Fiyat 15.120.1001	Toplam Tutar
1	697,91	₺38,25	₺26.695,06
2	11149,34	₺38,25	₺426.462,26
3	2588,28	₺38,25	₺99.001,71
4	75376,9	₺38,25	₺2.883.166,43
5	30255,01	₺38,25	₺1.157.254,13
6	3412,59	₺38,25	₺130.531,57
7	17475,06	₺38,25	₺668.421,05
Mevcut Yol	1089,23	₺38,25	₺41.663,05

Dolgu metrajları maliyet hesabı için İller Bankası 2024 Yılı Altyapı Tesisleri Birim Fiyatları kullanılmıştır. Dolgu pozu için 43.610.1021 nolu *"stabilize malzeme ile hendek ve temel dolgusu yapılması"* pozu esas alınmıştır. Bu poz makina ile kum çakıl hazırlanması, stabilize malzeme, serme ve sıkıştırma karşılığı işçiliği içermektedir. Tablo 4.50 tüm alternatiflere ait dolgu miktarlarını ve toplam tutarını vermektedir. Buna göre dolgu miktarı en düşük olan

alternatif mevcut yolun güzergahıyken, köprü inşası alternatifi tez kapsamında dikkate alınmadığı için yüksek dolgu değerlerine sahip olan 4. alternatif en yüksek toplam tutara sahiptir.

Tablo 4.50: Alternatif yol güzergahlarına ait dolgu maliyeti hesabı

Alternatif No	Dolgu(m^3)	Birim Fiyat 43.610.1021	Toplam Tutar
1	532,82	₺286,90	₺152.866,06
2	8.480,05	₺286,90	₺2.432.926,35
3	1..968,26	₺286,90	₺564.693,79
4	122.952,18	₺286,90	₺35.274.980,44
5	24.830,92	₺286,90	₺7.123.990,95
6	8.727,28	₺286,90	₺2.503.856,63
7	13.557,63	₺286,90	₺3.889.684,05
Mevcut Yol	15,83	₺286,90	₺4.541,63

Menfez işleri maliyet hesabı için Karayolları Genel Müdürlüğü 2024 Yılı Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşaretlerine ait Birim Fiyat Listesi kullanılmıştır. Menfez pozu için menfezlerin yerinde döküm yapılacağı öngörülmüştür. Bu sebeple menfez pozu için *"KGM/16.130/K-H nolu Her Türlü İnşaatta (Kirişli ve Kutu Menfezler, Köprüler ve Betonarme Kazık Hariç, Plak ve Kompozit Menfezler Dahil) Kuruda ve Suda Her Dozda Demirli Beton (C 25/30 Hazır Beton Harcı ile)"* pozu esas alınmıştır. Bu poz beton, kalıp, makine, ekipman ve işçilik işlerini kapsamaktadır. Standart menfez boyutu olarak 2 metre yükseklik, 2 metre genişlik ve 10 metre uzunluk kabulü yapılmıştır. Buna göre Tablo 4.51'de belirtilen alternatif yol güzergâhlarına ait menfez maliyetlerine ait sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.51: Alternatif yol güzergâhlarına ait menfez maliyeti hesabı

Alternatif No	Menfez Sayısı (2*2*10)	Metraj m3	Birim Fiyat	Toplam Tutar
1	3	14,4	₺3.854,09	₺166.496,69
2	4	14,4	₺3.854,09	₺221.995,58
3	9	14,4	₺3.854,09	₺499.490,06
4	3	14,4	₺3.854,09	₺166.496,69
5	2	14,4	₺3.854,09	₺110.997,79
6	3	14,4	₺3.854,09	₺166.496,69
7	2	14,4	₺3.854,09	₺110.997,79
Mevcut Yol	4	14,4	₺3.854,09	₺221.995,58

Son olarak tüm alternatif yollar için toplam maliyet oluşturulmuştur ve analizler karşılaştırılmıştır (Tablo 4.52-4.53). Mevcut yol güzergâhının (₺268.200,26) en düşük maliyete sahip olduğu ve bu nedenle ekonomik açıdan en avantajlı seçenek olarak öne çıktığı tespit edilmiştir. Alternatif 1 (₺346.057,80) ve Alternatif 3 (₺1.163.185,57) de düşük maliyetleri ile dikkat çekmektedir, bu da onları maliyet etkinliği açısından uygun alternatifler yapmaktadır. Orta maliyetli seçenekler arasında yer alan Alternatif 6 (₺2.800.884,89) ve Alternatif 2 (₺3.081.384,18), maliyet ve diğer kriterler dengesi açısından değerlendirilmelidir. Yüksek maliyetli alternatifler olan Alternatif 7 (₺4.669.102,88) ve Alternatif 5 (₺8.392.242,87), ekonomik açıdan daha az avantajlıdır. Özellikle Alternatif 4 (₺38.324.643,56), en yüksek maliyete sahip olup, bu durum onu ekonomik açıdan en dezavantajlı seçenek haline getirmektedir. Bu bulgular, yol güzergâhı seçiminin maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.52: Alternatif yol güzergâhlarına ait toplam maliyetler

Alternatif No	Toplam Tutar
1	₺346.057,80
2	₺3.081.384,18
3	₺1.163.185,57
4	₺38.324.643,56
5	₺8.392.242,87
6	₺2.800.884,89
7	₺4.669.102,88
Mevcut Yol	₺268.200,26

Tablo 4.53: Alternatif yol güzergâhlarının maliyetlerine göre sıralaması

	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Mevcut yol
Maliyet	₺346.057,80	₺3.081.384,18	₺1.163.185,57	₺38.324.643,56	₺8.392.242,87	₺2.800.884,89	₺4.669.102,88	₺268.200,26
Sıralaması	2	5	3	8	7	4	6	1

5. TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma Ormanı içerisinde yer alan bir orman yolu, LiDAR tabanlı SAM kaynağı baz alınarak, BIM ortamında yeniden planlanmıştır. Planlama sırasında BIM ortamında yapılan optimizasyon modelleri ile mevcut yol güzergâhına alternatif olarak yedi adet farklı güzergâh tanımlanmıştır. Elde edilen yedi alternatif güzergâh ve mevcut yol güzergahı da teknik, ekolojik ve sosyal açıdan ÇKKV yöntemlerinden CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve MOORA yöntemi ile sıralanarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan alternatif yolların tamamı (yedi adet) ve mevcut yol güzergâhı dikkate alındığında ÇKKV tabanlı uygunluk sıralama sonuçları Tablo 5.1'de belirtilmiştir.

Tablo 5.1: Alternatif yol güzergahlarının ekolojik, teknik, sosyal ve maliyetleri açısından sıralaması

Kriter	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Mevcut yol
Maliyet	2	5	3	8	7	4	6	1
Teknik	2	5	4	8	1	6	3	7
Ekolojik	2	3	4	8	7	5	6	1
Sosyal	2	5	1	8	7	4	6	3

Sıralama sonuçlarına göre ***Maliyet açısından*** değerlendirildiğinde, mevcut yol güzergâhı (Alternatif 8) en düşük maliyetlidir. Bunu Alternatif 1 izlemekte ve Alternatif 3 ile Alternatif 6 da maliyet açısından avantajlı konumdadır. Diğer yandan, en yüksek maliyet ise Alternatif 4'te gözlemlenmektedir.

Teknik açıdan incelendiğinde, Alternatif 5 sıralamada en üst sırada yer almıştır. Bu, bu güzergâhın teknik açıdan en sağlam seçenek olduğunu işaret etmektedir. Alternatif 1 ve Alternatif 7, teknik açıdan iyi bir performans sergilemişlerdir. Ancak, Alternatif 4 en düşük teknik skorunu almıştır.

Ekolojik açıdan, Alternatif 4 ve Alternatif 5 sıralamada en alt sıralara sahiplerdir, bu nedenle çevresel etkiler açısından en olumsuz seçeneklerdir. Alternatif 1 ve Alternatif 2, iyi düzeyde

ekolojik performans göstermiştir. Ancak, mevcut yol (Alternatif 8) ekolojik açıdan en iyi seçenek olmuştur.

Sosyal etki açısından, Alternatif 3 sıralamada en üst sırayı elde etmiştir. Alternatif 1 ve mevcut yol güzergâhı da (Alternatif 8) sosyal açıdan iyi performans göstermişlerdir. Ancak, Alternatif 4 sıralamada en alt sıralamada yer almıştır.

Maliyet açısından ele alındığında ise *Alternatif 1:* Uzunluğu 1.531,45 metre olan bu yol, düşük bir düşey some sayısına (10) sahiptir. Maksimum eğimi %20, minimum düşey some aralığı ise 18,75 metredir. Maliyeti ₺346.057,80'dir. Orta uzunlukta ve düşük maliyetli bir alternatif olarak öne çıkıyor.

Alternatif 2: Uzunluğu 1.511,02 metre olan bu yol, en yüksek düşey some sayısına (16) sahiptir. Maksimum eğimi %8, minimum düşey some aralığı ise 25 metre olarak belirlenmiştir. Maliyeti ₺3.081.384,18'dir. Uzunluğu ve düşük maksimum eğimi göz önüne alındığında maliyeti yüksek bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Alternatif 3: Uzunluğu 1.944,44 metre olan bu yol, düşük bir düşey some sayısına (10) sahiptir. Maksimum eğimi %10, minimum düşey some aralığı ise 15 metredir. Maliyeti ₺1.163.185,57'dir. Orta uzunlukta ve düşük maliyetli bir alternatif olarak dikkat çekmektedir.

Alternatif 4: Uzunluğu 2.056,17 metre olan bu yol, en yüksek düşey some sayısına (22) sahiptir. Maksimum eğimi %9,25, minimum düşey some aralığı ise 31,25 metredir. Maliyeti ₺38.324.643,56'dir. En uzun yol olmasının yanı sıra yüksek maliyetiyle dikkat çekmektedir.

Alternatif 5: Uzunluğu 1.555,92 metre olan bu yol, orta düzeyde bir düşey some sayısına (15) sahiptir. Maksimum eğimi %9,25, minimum düşey some aralığı ise 18,75 metredir. Maliyeti ₺8.392.242,87'dir. Orta uzunlukta olmasına rağmen yüksek maliyetiyle dikkat çekmektedir.

Alternatif 6: Uzunluğu 952,94 metre olan bu yol, en düşük düşey some sayısına (5) sahiptir. Maksimum eğimi %15, minimum düşey some aralığı ise 25 metredir. Maliyeti ₺2.800.884,89'dir. En kısa yol olmasına rağmen orta maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Alternatif 7: Uzunluğu 1.794,16 metre olan bu yol, orta düzeyde bir düşey some sayısına (16) sahiptir. Maksimum eğimi %9,25, minimum düşey some aralığı ise 18,75 metredir. Maliyeti ₺4.669.102,88'dir. Orta uzunlukta ve yüksek maliyetli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Mevcut yolun maliyeti ₺268.200,26 olarak belirtilmiştir ve en düşük maliyetli seçenek olarak öne çıkmaktadır. Alternatifler arasındaki maliyet farkları, uzunluk, düşey some sayısı, maksimum eğim ve minimum düşey some aralığı gibi faktörlere dayanmaktadır. En uygun alternatifin seçilmesi için maliyet etkinliğinin yanı sıra sürdürülebilirlik ve teknik kısıtlar da dikkate alınmalıdır.

Sıralama sonuçlarına göre genel olarak bakıldığında ise, mevcut yol güzergâhı maliyet, ekolojik ve sosyal açılardan avantajlı olsa da, teknik açıdan bazı zayıf noktalara sahiptir. Diğer alternatifler, belirli kriterlere göre farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Karar verme sürecinde, tüm bu faktörlerin dengeli bir şekilde dikkate alınması önemlidir.

Tüm alternatiflerin farklı açılardan en iyiden en kötüye sıralanmasından sonra tüm kriterleri dikkate alarak en iyi alternatifin seçilebilmesi için ağırlık kriteri yöntemi kullanılmıştır. Bu aşamada her bir kriter için eşit ağırlık değeri seçilerek, maliyet için %25, teknik için %25, ekolojik için %25, sosyal için %25 ağırlıklı ortalamalar alınmıştır.

$$Ağırlıklı\ Puan = (Maliyet\ Puanı \times Maliyet\ Ağırlığı) + (Teknik\ Puanı \times Teknik\ Ağırlığı) + (Ekolojik\ Puanı \times Ekolojik\ Ağırlığı) + (Sosyal\ Puanı \times Sosyal\ Ağırlığı) \quad (3.10)$$

Bu ağırlık hesaplama yöntemiyle en yüksek puanı alan en kötü alternatif ve en düşük puanı alan ise en iyi alternatif olarak belirlenmiştir (Tablo 5.2).

Tablo 5.2: Alternatif yol güzergahlarının ağırlıklı puan hesabı

Alternatif	Maliyet	Teknik	Ekolojik	Sosyal	Ağırlıklı Puan
1	2	2	2	2	2,00
2	5	5	3	5	4,50
3	3	4	4	1	3,00
4	8	8	8	8	8,00
5	7	1	7	7	5,50
6	4	6	5	4	4,75
7	6	3	6	6	5,25
Mevcut yol	1	7	1	3	3,00

Tablo 5.3: Alternatif yol güzergâhlarının genel açıdan sıralaması

Sıralama	Alternatif No	Ağırlıklı Puan
1	1	2,00
2	3	3,00
3	Mevcut Yol	3,00
4	2	4,50
5	6	4,75
6	7	5.25
7	5	5,50
8	4	8.00

Tüm kriterlerin ağırlıklı ortalamalarına göre yapılan değerlendirmede, en düşük ağırlıklı puanı alan Alternatif 1, tüm açılardan en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatif 1, maliyet, teknik, ekolojik ve sosyal açılardan dengeli bir performans sergilemiş ve en iyi alternatif olarak seçilmiştir. Diğer yandan, en yüksek ağırlıklı puanı alan Alternatif 4, tüm kriterler göz önünde bulundurulduğunda en kötü alternatif olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, yol güzergahı seçiminde maliyet, teknik uygunluk, ekolojik etkiler ve sosyal kabul gibi çok yönlü kriterlerin dengeli bir şekilde değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Buna göre tüm sıralamalar dikkate alındığında 1 numaralı alternatifin en iyi seçim olduğu belirlenmiştir. Alternatif 1'ün tüm bu kriterler açısından en uygun seçenek olarak belirlenmesi, bu alternatifin sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlara göre mevcut yolun modellemesi olan mevcut yol güzergâhını temsil eden Alternatif 8 maliyet ve çevresel anlamda en iyi alternatif olurken, Alternatif 3 sosyal ve Alternatif 5`de teknik etki bakımından en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatif 1 maliyet, ekolojik, teknik ve sosyal anlamda en iyi 2. alternatif olmasına rağmen genel anlamda en iyi alternatiftir. Alternatif 1'ün tüm kriterler açısından en uygun seçenek olması, bu alternatifi tercih etmenin mantıklı ve sürdürülebilir olacağını göstermektedir. Mevcut yolun (Alternatif 8) hala oldukça uygun bir seçenek olması, mevcut altyapının değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Alternatif 4'ün en yüksek puana sahip olması, bu alternatifin ciddi dezavantajları olduğunu ve yeniden değerlendirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Bu sıralama, yol güzergâhı seçiminde dengeli ve çok yönlü bir değerlendirme yapmanın önemini göstermektedir. Her bir kriterin eşit ağırlıkla dikkate alınması, en uygun alternatifin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Bu yaklaşımın, hem mevcut kaynakların etkin kullanımını sağlamakta hem de çevresel ve sosyal etkileri en aza indirmekte etkili olduğu düşünülmektedir.

Drosos ve diğ. (2020), Yunanistan'daki orman yollarının tasarımı, inşası ve bakımı konularını ele alarak, bu yolların geniş alanların sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayıp sağlamadığını incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, ölçülebilir kriterler kullanarak alternatif orman yolu güzergâhlarını değerlendirmek ve çevresel kaynaklar üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Araştırma alanı, Yunanistan'ın Kozani Bölgesi'ndeki Vlastis – Emporiou Kamu Ormanı'dır. Bu çalışmada, inşaat alanının büyüklüğünün ekolojik ve sosyal etkileri de irdelenmiştir. Tez çalışmamızla ortak dikkate alınan diğer konular ise dolgu yükseklikleri, yamaç yükseklikleri ve eğimlerdir. Ayrıca, güzergâh maliyetleri de değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, iki alternatiften hangisinin daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, orman yolu inşaatında uygun önlemler alınarak çevresel etkilerin minimize edilebileceği ve alternatif yol inşaatı çözümlerinin, inşaat başlamadan önce karşılaştırmalı olarak belirlenmesinin büyük önem taşıdığı sonucuna varılmıştır. Orman altyapısının geliştirilmesi, arazi koşulları ve orman ekosisteminin korunması çerçevesinde en yeni planlama tekniklerine dayandırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Eker ve Ada (2011), bir orman yolunun kalite düzeyinin belirlenebilmesi için yol kalitesini ortaya çıkaran bileşenlerin tarif edilmesi, yolun ve/veya yol ağının kaliteli olup olmadığına karar vermede etkili olacak ölçüt ve gösterge setlerinin oluşturulmasına ilişkin bir yöntembilim geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, orman yolu kalitesinin analiz edilip değerlendirilebilmesi için ekonomi, ekoloji, sosyal ve teknik ana ölçütleri içeren hiyerarşik bir analiz seti oluşturulmuştur. Çalışma, orman yollarının geometrik özelliklerinin yanı sıra, orman ekosistemine olan etkilerini de değerlendirerek kapsamlı bir kalite değerlendirme yöntemi sunmaktadır ve gelecek çalışmalarda yeni kriterler ve ölçütler eklenebileceğini bildirmişlerdir.

Bu tez kapsamındaki sonuçlarda da Drosos ve diğ. (2020) ve Eker ve Ada (2011) tarafından belirlenen kriterlerin optimum yol güzergahının seçilmesindeki rolü vurgulanmaktadır. Drosos ve diğ. (2020), ekolojik ve sosyal etkiler gibi kriterleri değerlendirerek sürdürülebilir

kalkınmaya katkıda bulunmayı hedeflemiştir. 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 Ada (2011) tarafından geliştirilen hiyerarşik analiz seti, yol kalitesinin çok boyutlu bir perspektiften değerlendirilmesini sağlamıştır. Bizim çalışmamız da benzer bir şekilde, orman yolu güzergâhlarının seçilmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak daha kapsamlı bir yaklaşım sunmuştur. Karşılaştırmalı analizlerin faydaları arasında, alternatif güzergâhların sistematik olarak değerlendirilmesi, çevresel ve sosyal etkilerin minimize edilmesi, maliyet etkinliğinin sağlanması ve teknik uygunluğun optimize edilmesi bulunmaktadır.

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 bıraktığını vurgulamaktadır. 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. (2013), LiDAR tabanlı modellerin orman yolu planlamasında nasıl kullanılabileceğini araştırmışlardır. Bu çalışmalar, LiDAR verilerinin yüksek doğrulukta arazi modelleri oluşturarak yol güzergâhlarının belirlenmesindeki önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, yukarıda bahsedilen diğer çalışmalarda vurgulanan 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, kazı-dolgu yükseklikleri gibi birçok kriteri doğrudan etkileyerek CRITIC yöntemiyle belirlenen ağırlıkları değiştirecektir. Veriye dayalı bu çok kriterli karar verme (ÇKKV) yönteminde, en doğru ve optimum çözümü bulabilmek için en hassas verilere sahip olmak gerekliliği açıkça görülmektedir.

CBS tabanlı orman yolu optimizasyonu konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin, Akay ve Sessions (2005), CBS ve uzaktan algılama tekniklerinin orman yolu planlamasında nasıl kullanılabileceğini incelemişlerdir. Hayati ve diğ. (2012), orman yolu ağlarının planlanmasında çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla Delphi yöntemi, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanarak üç aşamalı bir metodoloji sunmaktadır. İran'ın kuzeyindeki Baharbon bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada, Delphi yöntemi ile eğim, jeoloji ve toprak dokusu gibi kriterlerin yanı sıra litoloji, akarsu ağına uzaklık, fay hattına uzaklık, heyelan duyarlılığı ve erozyon duyarlılığı en önemli kriterler olarak belirlenmiş ve AHP ile bu kriterlerin göreceli önem dereceleri hesaplanmıştır. CBS ortamında bu kriterlerin haritaları hazırlanmış, bulanık mantık kullanılarak standartlaştırılmış ve uygunluk haritası oluşturulmuştur. Dokuz yol ağı alternatifi tasarlanmış ve bu alternatifler uygunluk haritası üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, bazı alternatiflerin en düşük çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiş ve maliyet açısından en uygun çözüm bulunmuştur. Bu metodolojinin diğer bölgelerde de orman yolu planlamasında kullanılabileceği ve gelecekteki çalışmalarda toplumsal faktörler gibi diğer kriterlerin de değerlendirilmesi gerektiği önerilmektedir.

Ezzati ve diğ. (2021), orman yollarının onarım kararlarını mekânsal olarak yönlendirmek için bütünleşmiş bir CBS destekli çok kriterli karar analizi ve optimizasyon modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Bu yaklaşım, çevresel etkiler ve operasyonel maliyetler arasındaki dengeyi sağlayarak yol segmentleri için uygun onarım seçeneklerini belirlemektedir. Bu yaklaşımlarla, çeşitli arazi koşulları altında mekânsal olarak bilgilendirilmiş yol kararları için detaylı alternatif çözümler tasarlanabileceğini iddia etmişlerdir.

Dodson ve diğ. (2006), AHP'yi orman yollarının bakımı ve iyileştirilmesi için yapılan yatırımların önceliklendirilmesinde kullanılabilecek tutarlı ve kantitatif bir yöntem olarak kullanmışlardır. Bu çalışmaya göre AHP, bilimsel olarak kesin ilişkilerin tanımlanmadığı durumlarda profesyonel yargıları ve kullanıcı tercihlerini modele entegre ederek tutarlı kararlar almayı sağlamış ve maliyet-fayda analizleri ve kaynak tahsis modelleri gibi çeşitli uygulamalara entegrasyonunu mümkün kılmıştır. Sonuç olarak ÇKKV'lerinin orman yolları gibi karmaşık çok kriterli karar verme problemlerini içeren projelerde nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu çalışma, yukarıdaki paragraflardaki bahsedilen çalışmalarda vurgulanan ÇKKV ve CBS gibi yöntemlerin çevresel ve teknik kriterlerin değerlendirilmesinde ne kadar etkili olduğunu

desteklemektedir. Bu tez kapsamında CRITIC ve MOORA yöntemleri kullanılarak, alternatif güzergâhların çevresel, teknik ve sosyal etkileri çok detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve optimizasyon sağlanmıştır. Bu yöntemlerin bir arada kullanılması, orman yolu planlamasında daha kapsamlı ve bütünleşmiş bir yaklaşım sunarak, çevresel etkileri en aza indirirken, maliyet etkinliği ve teknik uygunluğu da optimize etmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan hassas LiDAR verileri ve BIM ortamındaki analizler, bu değerlendirmelerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırarak daha iyi kararlar alınmasını sağlamıştır.

Bu çalışmada, farklı CBS verisinin yanına BIM de eklenerek kapsamın ve sonuç hassasiyetinin artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, BIM modeli üzerinde optimizasyon araçlarının yüksek sayıda alternatif üretme potansiyeline odaklanılmış ve CRITIC yönteminin herhangi bir başka bilgi kaynağına gerek duymadan farklı alternatiflerden kriter ağırlığı oluşturma özelliğinin en kaliteli yolu bulmaya yardımcı olması incelenmiştir. Ayrıca, LiDAR ve CBS gibi hassas ormancılık araçlarının BIM modeline adaptasyonu ve sonuç hassasiyetine katkısı da gözler önüne serilmiştir. Kullanıcılar, kendi kriterlerini belirleyerek kolay bir arayüzde değerlendirme yapabilmekte ve bu sistemleri kullanarak daha etkin kararlar alabilmektedirler. Bu yöntem, ÇKKV süreçleri ile entegre bir yaklaşımla orman yolu planlamasında kullanıcı dostu bir çözüm sunmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Orman yolu güzergâhlarının belirlenmesinde yüksek çözünürlüklü veri setleri (LiDAR verisi, CBS verileri vb.) ve BIM yaklaşımı kullanılarak detaylı bir analiz yapılmıştır. Bu sayede, seçilecek yol güzergâhının geometrik standartlara uygunluğu, negatif ekolojik etkilerinin ve maliyetlerinin minimize edilmesi, pozitif sosyal etkilerinin maksimize edilmesi hedeflenmiştir.

Kriging metodunun arazinin mevcut yollar öncesi verilerinin bulunamadığı ve veri eksiklerinin olduğu yerlerde BIM ortamında uygulanabilir olduğu ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Mevcut yolu temsil eden alternatif 8 yol güzergahının en iyi 2. opsiyon olması bunu desteklemiştir.

Mevcut yolların güzergâhlarının standartlara uygun bir şekilde modellenmesinde kullanılan *"best fit alignment"* aracı sadece bu çalışmadaki amaçla değil, aynı zamanda yol rehabilitasyon çalışmalarında da proje uygulamasında geometrilerin değiştiği yerleri belirlemeyi kolaylaştıracak ve sonuçların hassasiyetini arttıracaktır.

Alternatif güzergâhların değerlendirilmesinde CRITIC ve MOORA gibi ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır. BIM ortamında çok sayıda alternatifin optimizasyon araçlarıyla, kriterlerin değiştirilerek üretilmesi sayesinde teknik, ekolojik ve sosyal kriterler dikkate alınarak en uygun güzergâhlar belirlenmiştir. CRITIC yönteminin herhangi bir ideal kriter bilgisine veya herhangi ankete ihtiyaç duymaması, BIM ortamında sayısız alternatif üretebilme iş akışıyla tam uyum sağlamıştır.

Farklı şartlara bağlı olarak farklı sayıda ve amaçta kriter tanımının yapılarak Dynamo aracı sayesinde BIM modellerinden çekilen verilerin, ÇKKV yöntemlerinde kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

En yüksek yol standartlarına sahip 4 no'lu alternatifin teknik anlamda en iyi alternatif olarak beklenmesi gerekirken tüm hat boyunca kötü bir zeminden geçmesi ve en büyük inşaat alanına sahip olması sebebiyle her açıdan en kötü alternatif olarak çıkması, tasarımcının kriterleri belirlerken ki kararların ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda, mevcut yol modellemesi olan alternatif 8'in maliyet ve çevresel anlamda en iyi alternatif olduğu; alternatif 5'in teknik, alternatif 3'ün ise sosyal etki bakımından en iyi alternatif olduğu belirlenmiştir. Alternatif 1 maliyet, ekolojik ve sosyal ve teknik anlamda en iyi ikinci alternatif olmasına rağmen, genel anlamda en iyi alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, farklı veri setlerinin (örneğin, iklim verileri, su kaynakları verileri, üst yapı kalitesi, duvar zorunlulukları, köprü gereklilikleri vs.) BIM yazılımına entegrasyonu sağlanarak daha kapsamlı analizler yapılabilir. Bu, yol güzergâhlarının belirlenmesinde daha fazla kriterin dikkate alınmasını sağlayacaktır.

ÇKKV yöntemlerinin daha da geliştirilerek, farklı ağırlıklandırma ve normalizasyon teknikleri kullanılması, alternatif güzergâhların daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. Bu sayede, orman yollarının sürdürülebilir yönetimi ve planlaması daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir.

BIM, CBS yazılımlarının ve ÇKKV yöntemlerinin entegrasyonu, orman yolu projelendirmesinde planlama aşamasında onlarca farklı alternatifi farklı kriter filtresinden geçirmesi nedeniyle önemli avantajlar sunmaktadır. Bu entegrasyonun daha etkin bir şekilde kullanılması, yol güzergâhlarının belirlenmesinde hem zaman ve para tasarrufu sağlayacak hem de teknik olarak doğruluğu artırarak daha güvenli yollar inşa edilmesini sağlayacaktır.

Orman mühendisleri ve diğer ilgili paydaşların, BIM ve ÇKKV yöntemleri konularında sürekli eğitim alması, projelerin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlayacaktır. Bu kapsamda, üniversiteler ve meslek örgütleri tarafından düzenlenen eğitim programlarına katılım teşvik edilmelidir.

KAYNAKLAR

İller Bankası A.Ş. Yatırım Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, 2024, *Altyapı tesisleri birim fiyatları*, Ankara

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024, *İnşaat ve tesisat birim fiyatları*, Ankara

Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2024, *Yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar*, Ankara

AASHTO, *A policy on geometric design of highways and streets*, 2011

Acar, H., Karabacak M., 2012, Göller bölgesi orman yolu inşaatlarında yaklaşık maliyet ve hakediş değerlerinin irdelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi orman fakültesi dergisi*, 13(1): 21-27.

Akay, A. E., Wing, M. G., Sivrikaya, F., Sakar, D., 2013, A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: A case study in the Mediterranean Region of Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 183(1), 631-645.

Akay, A. E., Sessions, J., 2005, Applying the decision support system, TRACER, to forest road design, *Journal of forest research*, 10(1), 45-52.

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., Oguz, H., Karas, I. R., Aruga, K., 2009, Using lidar technology in forestry activities, *Environmental monitoring and assessment*, 151(1), 117-125.

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.

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.

Akgul, M., Demir, M., Ozturk, T., Topatan, H., Budak, Y. E., 2016, Investigation of recreational vehicles maneuverability on forest roads by computer-aided driving analysis. *The baltic journal of road and bridge engineering*, 11(2), 111-119.

Akima, H., 1978, A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points, *ACM transactions on mathematical software (TOMS)*, 4(2), 148-159.

Akob, Z., Abang Hipni, M.Z., Abd Razak, A.A.A., 2019, Deployment of GIS and BIM in the construction of Pan Borneo highway Sarawak, Malaysia, *IOP Conference series: materials science and engineering*, Vol. 512, p. 012037.

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.

Anderson, A. E., Nelson, J., 2004, Projecting vector-based road networks with a shortest path algorithm, *Canadian journal of forest research*, 34(7), 1444-1457.

Ardiansyah, P.O.D., Yokoyama, R., 2002, DEM generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and a monotone interpolation function, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 57, 86–101.

Arıcak, B., Ozer Genc, Ç., 2018, Technical efficiency evaluation of forest roads with respect to topographical factors and soil characteristics. *Baltic forestry*, 24: 123-130.

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.

Autodesk Civil3D 2024 Help Document, 2024, https:// help.autodesk.com/ view/ CIV3D/ 2024/ ENU, [Erişim tarihi: 12 Kasım 2023]

Azizi, N.Z.M., Abidin, N.Z., Raofuddin, A., 2015, Identification of Soft Cost Elements in Green Projects: Exploring Experts' Experience, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*,170, 18–26.

Barazzetti, L., Banfi, F., 2017, BIM and GIS: When parametric modeling meets geospatial data, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, 4, 1-8.

Barazzetti, L., Previtali, M., Scaioni, M., 2020, Roads detection and parametrization in integrated BIM-GIS using LiDAR, *Infrastructures*, 5(7), 55.

Biancardo, S. A., Capano, A., de Oliveira, S. G., Tibaut, A., 2020, Integration of BIM and procedural modeling tools for road design, *Infrastructures*, 5(4), 37.

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.

Benyamin, M., Aidin, P., Jahangir, M., Shataee, J. S., 2017, Monitoring geometric properties of an existing forest road using airborne Lidar data, *Journal of forest science*, 63, 490–495.

Bhandari, S. B., Nalmpantis, D., 2018, Application of various multiple criteria analysis methods for the evaluation of rural road projects, *The open transportation journal*, 12(1).

Bobko, P., Roth, P. L., Buster, M. A., 2007, The Usefulness of Unit Weights in Creating Composite Scores: A Literature Review, Application to Content Validity, and Meta-Analysis, *Organizational research methods*, 10(4), 689–709.

Bongiorno, N., Bosurgi, G., Carbone, F., Pellegrino, O., Sollazzo, G., 2019, Potentialities of a highway alignment optimization method in an I-BIM environment, *Periodica polytechnica civil engineering*, 63(2), 352-361.

Boye, B. A., Wilcock, M. J., 2023, Automated tunnel design with Dynamo and SAP2000, In: *Expanding underground - knowledge and passion to make a positive impact on the world*, CRC Press, pp. 2398-2405.

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.

Briggs, I. C., 1974, Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, 39(1), 39-48.

Brown, A., 2019, Ecological Impacts of Forest Roads, *Journal of environmental management*, 45(2), 210-225.

Bryceson, D.F., Bradbury, A., Bradbury, T., 2008, Roads to poverty reduction? Exploring rural roads' impact on mobility in Africa and Asia, *Dev. Policy Rev*., 26, 459–482.

Cartenì, A., Henke, I., Mallozzi, F., Molitierno, C., 2018, A multi-criteria analysis as a rational evaluation process for building a new highway in Italy, *SDP*, 713-723.

Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., Pellicer, E., Porras, H., 2021, BIM-based traffic analysis and simulation at road intersection design, *Automation in construction*, 131, 103911

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.

Chen, L., Luo, H., 2014, A BIM-based construction quality management model and its applications, *Automation in construction*, 46, 64-73.

Cheng, J. C., Lu, Q., Deng, Y., 2016, Analytical review and evaluation of civil information modeling, *Automation in construction*, 67, 31-47.

Chong, H. Y., Lopez, R., Wang, J., Wang, X., Zhao, Z., 2016, Comparative analysis on the adoption and use of BIM in road infrastructure projects, *Journal of management in engineering*, 32(6), 05016021.

Chung, W., Sessions, J., 2001, Designing a forest road network using heuristic optimization techniques, *Appalachian Hardwood: Managing Change*, Corvallis, Oregon.

Chung, W., Stückelberger, 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.

Cook, W. L., Jr., Hewlett, J. D., 1979, The Broad-Based Dip on Piedmont Woods Roads, *Southern journal of applied forestry*, 3(3), 77-81.

Çağlar, S., Acar, H., 2011, An Evaluation of Forest Road Standards and Road Gradients in Turkey in View of FAO Criteria and Some EU Practices. *Artvin Çoruh Üniversitesi orman fakültesi dergisi*, 10 (1), 1-8.

Çalışkan, E., 2017, Planning of environmentally sound forest road route using GIS & S-MCDM, *Šumarski list*, 583.

Çalışkan, E., 2013, Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain, *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 10, 23.

Çalışkan, E., Karaman, A., Acar, H. H., 2004, Coğrafi bilgi sistemi yazılımı ile orman yolu sanat yapıları haritasının oluşturulması tekniği (Yeşiltepe Orman İşletme Şefliği örneği), *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 6(6), 153-164.

Çalışkan, E., Çağlar, S., 2010, Orman yolu yapım çalışmalarının çevreye verdiği zararların değerlendirilmesi, *III. ulusal karadeniz ormancılık kongresi*, Artvin, Türkiye, 20-22 Mayıs 2010, Cilt 2, 564-570.

Çalişkan, E., Bediroglu, S., Yildirim, V., 2019, Determination Forest Road routes via gis-based spatial multi-criterion decision methods, *Applied ecology and environmental research*, 17, 759-779.

Çelikbilek, Y., Özdemir, M., 2020, *Çok kriterli karar verme yöntemleri açiklamali ve karşilaştirmali sağlik bilimleri uygulamaları*, Nobel yayın evi, Ankara.

Daigle, P., 2010, A summary of the environmental impacts of roads, management responses, and research gaps: A literature review, *British columbia journal of ecosystems and management*, 10.

Dalbudak, E., Rençber, Ö. F., 2022, Çok kriterli karar verme yöntemleri üzerine literatür incelemesi, *Gaziantep üniversitesi iktisadi ve idari bilimler fakültesi dergisi*, 4(1), 1-17.

Demir, G., Özyalçın, A., Bircan, H., 2021, *Çok kriterli karar verme yöntemleri ve ÇKKV yazilimi ile problem çözümü*, Nobel Yayın evi, Ankara.

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.

Deng, H., Yeh, C. H., Willis, R. J., 2000, Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights, *Computers & Operations Research*, 27, 963-973.

Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L., 1995, Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method, *Computers & operations research*, 22(7), 763-770.

Díaz, B., Rivera, M., Rodriguez, S., Carrera, E., 2019, October, Time and cost optimization for road projects through BIM, *2019 Congreso internacional de innovación y tendencias en ingenieria (CONIITI)*, IEEE, pp. 1-6.

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, Brașov, Romania.

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.

Dowman, I., 2004, Integration of LIDAR and IFSAR for mapping, *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 35, 90–100.

Dynamoprimer, 2016, *Introduction to Dynamo*, https://primer.dynamobim.org/01_Introduction/ 1_introduction.html, [Erişim tarihi: Ekim 2023]

Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., McNiff, S., 2013, BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis, *Automation in construction*, 36, 145-151.

Eker, M., 2004. Ormancılıkta Odun Hammaddesi Üretiminde Operasyonel Planlama Modelinin Geliştirilmesi, *KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, 239 s.

Eker, M., Ada, N., 2011, Orman yolu kalite analizine yönelik ölçüt ve gösterge setinin oluşturulması, *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 12: 89-97

Eker, R., Aydin, 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.

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.

Elibüyük, M. ve Yılmaz, E., 2010, Türkiye'nin coğrafi bölge ve bölümlerine göre yükselti basamakları ve eğim grupları, *Coğrafi bilimler dergisi*, 8(1), pp.27-56.

Erdaş, O., 1997, *Orman yolları*, KTÜ Orman Fakültesi.

Erdik, M., Gökuç, Y. T., 2020, Türk yapı sektöründe yapı bilgi modellemesinin adaptasyonu, *Balıkesir üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi*, 22(1), 159-171.

Ersoy, N., 2022, Kriter Ağırlıklandırma Yöntemlerinin ÇKKV Sonuçları Üzerindeki Etkisine Yönelik Gerçek Bir Hayat Uygulaması, *MANAS sosyal araştirmalar dergisi*, 11(4), 1449-1463.

Ezzati, S., Palma, C.D., Bettinger, P., Eriksson, L.O., Awasthi, A., Caglayan, İ., 2021, An integrated multi-criteria decision analysis and optimization modeling approach to spatially operational road repair decisions. *Canadian Journal of Forest Research*, 51, 465–483.

Fanning, B., Clevenger, C. M., Ozbek, M. E., Mahmoud, H., 2015, Implementing BIM on infrastructure: Comparison of two bridge construction projects, *Practice periodical on structural design and construction*, 20(4), 04014044.

Ferraz, A., Mallet, C., Chehata, N., 2016, Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 112, 23-36.

Fisher, P. F., Tate, N. J., 2006, Causes and consequences of error in digital elevation models, *Progress in physical geography*, 30(4), 467-489.

Forman, R.T.T., Alexander, L.E., 1998, Roads and their major ecological effects, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207-231.

Forman, R., 2000, Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States, *Conservation Biology*, 14, 31-35.

Fortune, S., 1987, A sweepline algorithm for Voronoi diagrams, *Algorithmica*, 2(1-4), 153-174.

Gebreslasie, M. T., Beyene, T. F., 2016, Accuracy assessment of SRTM C- and X-Band DEMs using RTK-GPS surveyed data over mountainous terrain in North Ethiopia, *Remote sensing*, 8(6), 489.

Ghajar, I., Najafi, A., Karimimajd, 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.

Ginevicius, R., Podvezko, V., 2005, Objective and subjective approaches to determining the criterion weight in multicriteria models, *Proceedings of international conference relstat transport and telecommunication*, 6(1), 133-137.

Göktepe, A. B., Lav, A. H., 2003, Method for balancing cut-fill and minimizing the amount of earthwork in the geometric design of highways, *Journal of transportation engineering*, 129(5), 564-571.

Han, C., Han, T., Ma, T., Tong, Z., Wang, S., Hei, T., 2023, End-to-end BIM-based optimization for dual-objective road alignment design with driving safety and construction cost efficiency, *Automation in construction*, 151, 104884.

Hallén, K. O., Forsman, M., Eriksson, A., 2023, Interactions between human, technology and organization in building information modelling (BIM)-a scoping review of critical factors for the individual user, *International journal of industrial ergonomics*, 97, 103480.

Hardy, R. L., 1971, Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *Journal of geophysical research*, 76(8), 1905-1915.

Hartmann, T., Van Meerveld, H., Vossebeld, N., Adriaanse, A., 2012, Aligning building information model tools and construction management methods, *Automation in construction*, 22, 605-613.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Sessions, J., Makhdoum, M., 2012, An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation, *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 1767-1776.

Heesom, D., Mahdjoubi, L., 2004, Trends of 4D CAD applications for construction planning, *Construction management and economics*, 22(2), pp. 171–182.

Heralt, L., 2002, Using the road system to design an optimum forest road variant aimed at the minimization of negative impacts on the natural environment, *Journal of forest science*, 48(8), 361–365.

Hettige, H., 2006, When do rural roads benefit the poor and how? An indepth analysis, Manila, Philippines, *Asian development bank*, 95.

Hosseini, S., Mazrae, M., Lotfalian, M., Parsakhoo, A., 2011, Designing an optimal forest road network by consideration of environmental impacts in GIS, *Journal of environmental engineering and landscape management*, 20, 58-66.

Hutchinson, M., 1989, A new procedure for gridding elevation and streamline data with automatic removal of spurious pits, *Journal of hydrology*, 106(3-4), 211-232.

Hutchinson, M., Bischof, R., 1983, A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Hunter Valley, New South Wales, *Australian meteorological magazine*, 31(3), 179- 184.

Ishizaka, A., Siraj, S., 2018, Are multi-criteria decision-making tools useful? An experimental comparative study of three methods, *European journal of operational research*, 264(2), 462-471.

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.

Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S.M., Ismail, M.Y., Bahraminasab, M., 2012, A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process, *The International journal of advanced manufacturing technology*, 58, 411–420.

Karagöz, M. E., 2019, BIM ile yapı yaklaşık maliyeti hesaplama önerisi, *Yapı bilgi modelleme*, 1(1), 39-45.

Kalach, M., Srour, I., Abdul-Malak, M. A., 2018, Envisioned roles of BIM for design delivery under design-build projects, *Construction research congress 2018* (552-561).

Kantartzis, A., Arabatzis, G., Christopoulou, O., Sfougaris, A., Sakellariou, S., Malesios, C., Tsiaras, E. S. F., Tampekis, S., 2021, Forest roads planning and management in terms of Social-Ecological Systems (SES) framework. *IOP conference series: earth and environmental science*, 899.

Kashid, U. S., Kashid, D. U., Mehta, S. N., 2019, A review of mathematical multi-criteria decision models with a case study, In *International conference on efficacy of software tools for mathematical modeling (ICESTMM'19)*.

Kastridis, A., 2020, Impact of forest roads on hydrological processes, *Forests*, 11(11), 1201.

Khanal, M., Hasan, M., Sterbentz, N., Johnson, R., Weatherly, J., 2020, Accuracy comparison of aerial lidar, mobile-terrestrial lidar, and uav photogrammetric capture data elevations over different terrain types, *Infrastructures*, 5, 65.

Killinger, D.K., 2014, Lidar (light detection and ranging*), Laser Spectroscopy for Sensing*, 292-312, Woodhead Publishing.

Kim, H. S., Cho, B. N., Moon, H. S., Ju, K. B., Kang, L. S., 2014, Enhancing interoperability of construction data for managing integrated active BIM features, *Advanced materials research*, 831, 442-445.

Kim, J., Lee, S., Seo, J., Lee, D. E., Choi, H. S., 2021, The integration of earthwork design review and planning using UAV-based point cloud and BIM, *Applied sciences*, 11(8), 3435.

Kiracı, K, Bakır, M., 2019, Critic temelli edas yöntemi ile havayolu işletmelerinde performans ölçümü uygulaması, *Pamukkale Üniversitesi sosyal bilimler enstitüsü dergisi*, 35, 57-174.

Kök, B. V., 2019, *Karayolu mühendisliği ve tasarımı*, Nobel Yayıncılık. Ankara

Laurance, W.F., Sloan, S., Weng, L., & Sayer, J.A., 2015, Estimating the environmental costs of Africa's massive 'Development Corridors', *Current biology*, 25, 3202–3208.

Li, X., Shen, H., Feng, R., Li, J., Zhang, L., 2017, DEM generation from contours and a low-resolution DEM. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 134, 135–147.

Liu, X., 2008, Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues, *physical geography*, 32(1): 31-49.

Lu, D. ve Jiang, X., 2024, A brief overview and perspective of using airborne lidar data for forest biomass estimation, *International journal of image and data fusion*, 1-24.

Lu, W., Peng, Y., Shen, Q., Li, H., 2013, Generic model for measuring benefits of BIM as a learning tool in construction tasks, *Journal of construction engineering and management*, 139(2), 195-203.

Lu, X., Wang, Z., Chen, Y., 2017, Advances in digital elevation model (DEM) generation techniques: case study of TanDEM-X and SRTM. *Remote sensing*, 9(8), 805.

Luce, C. H., Black, T. A., 1999, Sediment production from forest roads in western Oregon, *Water resources research*.

Luce, C. 2002, Hydrological processes and pathways affected by forest roads: what do we still need to learn? , *Hydrological processes*, 16. 2901- 2904.

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.

Makarovic, B., 1977, Regressive rejection—a digital data compression technique, *Proc. ASP/ACSM fall technical meeting*, Little Rock, USA.

Makarovic, B., 1984, Structures for geo-information and their application in selective sampling for digital terrain models, *ITC Journal*(4), 285-295.

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.

Meignan, D., Frayret, J. M., Pesant, G., 2013, Interactive planning system for forest road location. *Cirrelt*, 37, 1–22.

Mitas, L., Mitasova, H., 1999, Spatial interpolation, *Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W., eds. Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, New York: Wiley, 481-492.

Mohamed, A. G., Abdallah, M. R., Marzouk, M., 2020, BIM and semantic web-based maintenance information for existing buildings. *Automation in construction*, 116, 103209.

Mohammadi, M., Rezaei, J., 2020, Ensemble ranking: Aggregation of rankings produced by different multi-criteria decision-making methods. *Omega*, 96, 102254.

Mohammadi Samani, K., Hosseini, S. A., Lotfian, M., Najafi, A., 2010, Planning road network in mountain forests using GIS and analytic hierarchical process (AHP), *Caspian journal of environmental sciences*, 8(2), 151-162.

Muir, J., Goodwin, N., Armston, J., Phinn, S., Scarth, P., 2017, An accuracy assessment of derived digital elevation models from terrestrial laser scanning in a sub-tropical forested environment. *Remote sensing*, 9(8), 843.

Naghdi, R., Mohammadi Limaei, S., Babapour, R., Ariamanesh, M., 2012, Designing of forest road network based on technical and economic considerations using GIS & AHP. *International journal of applied and natural sciences* (IJANS), 1(2), 39–44.

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.

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.

Nandi, A., 2018, Classification of Rocks, *Bobrowsky, P.T., Marker, B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Cham.

Nasiri, M., 2012, Investigation of horizontal sightline offset on horizontal curves in Hyrcanian forest roads. *Chiang mai journal of sciences*, 39, 639-647.

Odu, G. O., 2019, Weighting methods for multi-criteria decision-making technique, *Journal of applied sciences and environmental management*, 23(8), 1449–1457.

OGM., 2008, Orman yolları planlanması yapımı ve bakımı, *Tebliğ no.* 292, Ankara.

Pan, F., Mao, Y., 2022, Research and application of construction technology of intelligent functional area based on BIM-GIS in highway engineering, in Yang, M., Lanzinha, J.C.G., Samui, P., Bao, X., Hu, J. (Eds), *Advances in transdisciplinary engineering*, IOS Press.

Pentek, T. , Pičman , D. , Potočnik , I. , Dvorščak , P. and Nevečerel , H., 2005, Analysis of an existing forest road network. *Croatian journal of forest engineering*, 26 (1) : 39 – 50 .

Polat, N., Uysal, M., 2016, Hava lazer tarama sistemi, uygulama alanlari ve kullanilan yazilimlara genel bir bakiş, *Afyon kocatepe üniversitesi fen ve mühendislik bilimleri dergisi*, 16(3), 679-692.

Popescu, C., Dragomir, L., Filip, O., 2015, Airborne lidar topographical surveying, *15th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015*, pp. 949-956.

Potočnik, I., Pentek, T., Pičman, D., 2005, Impact of traffic characteristics on forest roads due to forest management. *Croatian journal of forest engineering*; 26 :1-26.

Ramos-Scharrón, C. E., MacDonald, L. H., 2007, Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands, *Earth surface processes and landforms*.

Reid, L. M., Dunne, T., 1984, Sediment production from forest road surfaces, *Water resources research*.

Rokooei, S., 2015, Building information modeling in project management: necessities, challenges and outcomes, *Procedia-social and behavioral sciences*, 210, 87-95.

Rogers, L.W., 2005, *Automating contour-based route projection for preliminary forest road designs using GIS*, PhD Thesis, University of Washington.

Ryan, T., Phillips, H., Ramsay, J., Dempsey, J., 2004, Forest Road Manual: Guidelines for the design, construction and management of forest roads, *COFORD*, Dublin.

Sadeghi-Niaraki, A., Kim, K., Varshosaz, M., 2010, Multi-criteria decision-based model for road network process, *International journal of environmental research*, 4(4), 573-582.

Sarı, F., Şen, M., 2022, Highway route planning via least cost path algorithm and multi criteria decision analysis integration, a comparison of AHP, TOPSIS and VIKOR, *International journal of environment and geoinformatics*, 9(2), 27-38.

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 & manufacturing research*, 3(1), 324-342.

Scaioni, M., Höfle, B., Baungarten Kersting, A.P., Barazzetti, L., Previtali, M., Wujanz, D., 2018, Methods from information extraction from lidar intensity data and multispectral lidar technology, *The International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 42, 1503-1510.

Sekulic, M., 2019, *Multi-Criteria GIS modelling for optimal alignment of roadway by-passes in the Tlokweng planning area*, Botswana, Master Thesis, Geographical information science.

Shahsavand Baghdadi, N., Pir Bavaghar, M., Sobhani, H., 2011, Forest road network planning based on environmental, technical and economic considerations using GIS and AHP (Case study: Baharbon district in Kheyroud Forest). *Iranian journal of forest and poplar research*, 19(3), 380–395.

Sharma, A., Gupta, D., 2014, Derivation of topographic map from elevation data available in google earth. *Civil engineering and urban planning*, 1(2), 14-21.

Simões, D., Cavalcante, F.S., Lima, R.C.A., Rocha, Q.S., Pereira, G., Miyajima, R.H., 2022, Optimal Forest road density as decision-making factor in wood extraction, *Forests*, 13, 1703.

Singh, M., Pant, M., 2021, A review of selected weighing methods in MCDM with a case study. *International journal of system assurance engineering and management*, 12, 126-144.

Smith, P., 2014, BIM Implementation - Global Strategies. *Procedia engineering*, 85, 482-492.

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.

Stückelberger, J. A., Heinimann, 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.

Şakar, D., Aydın, A., Akay, A.E., 2020, Using GIS-based multicriteria decision support system for planning road networks with visual quality constraints: a case study of protected areas in Ankara, Turkey, *Environmental monitoring and assessment*, 192, 447.

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.

Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., Gao, X., 2020, BIM assisted building automation system information exchange using BACnet and IFC, *Automation in construction*, 110, 103049.

Uysal, M., Toprak, A. S., Polat, N., 2015, DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73, 539-543.

Washıngton State Deparment of Natural Sources, *Forest Roads Chapter 34*, pg.38

Watson, D. F., 1992, Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data, *Pergamon Press*.

Yabuki, N., Shitani, T., 2005, A management system for cut and fill earthworks based on 4D CAD and EVMS. *Computing in civil engineering*, pp. 1-8.

Yakar, F., Celik, F., 2014, A highway alignment determination model incorporating GIS and Multi-Criteria Decision Making. *KSCE journal of civil engineering*, 18, 1847–1857.

Yılmaz, B., Harmancıoğlu, N. B., 2010, Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA*, 36(5), 563-576.

Yurtseven, H., 2019, Comparison of GNSS-, TLS-and different altitude UAV-generated datasets on the basis of spatial differences. *ISPRS international journal of geo-information*, 8(4), 175.

Yurtseven, H., Akgul, M., Coban, S., Gulci, S., 2019, Determination and accuracy analysis of individual tree crown parameters using UAV based imagery and OBIA techniques, *Measurement*, 145, 651-664.

Zhang, H., Tang, G., Xiong, L., Yang, X., Li, F., 2024, Geomorphology-oriented theoretical framework and construction method for value-added DEM, *Journal of geographical sciences*, 34(1), pp.165-184.

Zhao, L., Liu, Z., Mbachu, J., 2019, Highway alignment optimization: An integrated BIM and GIS approach. *ISPRS international journal of geo-information*, 8(4), 172.

Zhou, W., Whyte, J., Sacks, R., 2019, Construction safety and digital design: A review. *Automation in construction*, 105, 102835.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

HASSAS ORMANCILIK YAKLAŞIMIYLA BIM YAZILIMI KULLANILARAK OPTİMİZE ORMAN YOLU GÜZERGAHININ BELİRLENMESİ

ORİJİNALLİK RAPORU

%9	%7	%4	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	pdfs.semanticscholar.org İnternet Kaynağı	%2
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
3	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	%1
4	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
5	Submitted to Kahramanmaraş Sütçü İmam University Öğrenci Ödevi	<%1
6	Simona KILDIENĖ. "Tvarios statybos technologijų plėtros daugiapakopis vertinimas", Vilnius Gediminas Technical University, 2014 Yayın	<%1
7	Submitted to Abant İzzet Baysal Universitesi Öğrenci Ödevi	

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Murat ÖZMEN
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Murat ÖZMEN
(İmza)