MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK KARAR DESTEK YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ

SERKAN KOCAKAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Lisansüstü Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

İSTANBUL, 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
SEMBOLLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **vii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **viii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Araştırması 2
2. DEMİRYOLU ELEKTRİFİKASYONU 8
2.1. Giriş 8
2.2. Elektrikli ve Dizel Demiryolu Hatlarının Karşılaştırılması 8
2.3. Elektrifikasyon Sistemlerinde Besleme Türleri 9
2.3.1. DC beslemeli sistemler 10
2.3.2. DC beslemeli demiryolu sistem işleyişi 11
2.3.3. AC beslemeli sistemler 12
2.4. Elektrifikasyon Sistemlerinde Akım Taşıma Şekilleri 13
2.4.1. Havai hat (katener) sistemi 15
2.4.2. 3.Ray sistemi 16
2.4.3. Yerden beslemeli sistemler 17
3. BULANIK KARAR DESTEK YÖNTEMLERİ 18
3.1. Giriş 18
3.2. Topsis Yöntemi 19
3.3. Bulanık Topsis Yöntemi 22
3.4. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) 24
4. BULANIK AHP VE BULANIK TOPSIS YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ UYGULANMASI 27
4.1. Giriş 27
4.2. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçim Modeli 28
4.2.1. K1: Hat özellikleri 29
4.2.2. K2: Tren özellikleri 30
4.2.3. K3: Yolcu talebi 31
4.2.4. K4: Emniyet 32
4.2.5. K5: Çevresel etkiler 33
4.2.6. K6: Maliyetler 34
4.3. Hedeflenen Tasarım Değerlendirilmesindeki Alternatif Enerji İletim Yöntemi Seçenekleri 35
4.4. Bulanık Topsis ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi 35
4.4.1. Kriterlerin karar vericiler tarafından değerlendirilmesi 35
4.4.2. Bulanık Topsis sonucu 50
4.5. Bulanık AHP ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi 50
4.5.1. Bulanık AHP yönetiminde ana kriterlerin değerlendirilmesi 51
4.5.2. Alt kriterlerin değerlendirilmesi 53
4.5.3. Alt kriterlere göre alternatiflerin değerlendirilmesi 59
4.5.4. Bulanık AHP değerlendirme sonucu 77
4.6. SONUÇ 79
5. BULANIK TOPSIS YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ YAZILIMI 81

5.2. Yazılımın Yapısı 81
5.3. Alt Kriterlerin Değerlendirilmesi 82
5.4. Alternatiflerin Değerlendirilmesi 83
5.5. Sonuçlar 83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
KAYNAKLAR 86
ÖZGEÇMİŞ 89

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, demiryolu elektrik iletim yöntemi seçimini ele alarak gelecekteki projeler için değerli bir kaynak oluşturmayı, demiryolu altyapı projelerinde verimliliği ve sürdürülebilirliği artırmayı amaçlamaktadır. Bu süreçte desteklerini esirgemeyen birçok kişi ve kuruluşa teşekkür etmek isterim.

İlk olarak, bu çalışmada danışmanlık görevini üstlenen Prof. Dr. AHMET FEVZİ BABA'a tez sürecimdeki değerli yönlendirmeleri, katkıları ve benimle sabırla tezin son şeklini almasını sağladığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Uzman Elektrik Şefi olarak çalışmakta olduğum YAPI MERKEZİ İDİS' e, şirketin destek ve kaynakları, tez sürecimde geliştirdiğim metodoloji ve bulguların kalitesini artırmama yardımcı olduğu için sonsuz teşekkür etmek isterim.

Eşim Dilara KOCAKAPLAN' nın bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında beni cesaretlendiren, sabrı, anlayışı ve sürekli motivasyonu ile bu tez, birlikte üstesinden geldiğimiz bir başarı haline geldi. Eşim Dilara KOCAKAPLAN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez süresince yönlendirmeleri ile bana ışık tutan sevgili kardeşim Dr. Öğr. Üyesi Sedef KOCAKAPLAN SEZGİN' a, tez süresince beni sevgi ve destekleri ile motive eden babam Selim KOCAKAPLAN ve annem Songül KOCAKAPLAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla,

11.2024 **Serkan KOCAKAPLAN**

ÖZET

BULANIK KARAR DESTEK YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ

Demiryolu tasarım aşamasında enerji iletim yöntemi seçimi, taşımacılık sisteminin enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik, işletme maliyetleri, sistem güvenilirliği ve yolcu konforu gibi birçok faktörü etkiler. Enerji iletim sistemi, "Cer tren gücü" terimi, demiryolu taşımacılığındaki bir trenin çeki gücünü ifade eder. Bu, bir lokomotifin taşıdığı yükü ne kadar hızlı ve etkili bir şekilde çekebildiğini belirleyen önemli bir faktördür. Bu sistem, elektrik enerjisini iletmek için farklı teknolojiler kullanır ve bu teknolojilerin seçimi, demiryolu sistemi tasarımının verimliliği ve maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Örneğin, geleneksel enerji iletim yöntemleri olan DC (Doğru Akım) ve AC (Alternatif Akım) sistemleri arasında seçim yapmak, enerji verimliliği, maliyet ve sistem güvenilirliği açısından farklı sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, son yıllarda ortaya çıkan inovatif teknolojiler, güneş panelleri, hidrojen yakıt hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji iletim sistemleri, demiryolu tasarımında da önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu nedenle, demiryolu tasarım aşamasında enerji iletim yöntemi seçimi önemlidir ve tasarımcıların tasarım aşamasında dikkatli bir şekilde değerlendirme yapması gerekmektedir. Enerji iletim sistemi seçiminde, sistem verimliliği, maliyet, çevresel sürdürülebilirlik, güvenilirlik, bakım kolaylığı ve işletme maliyetleri gibi faktörlerin yanı sıra, gelecekteki teknolojik gelişmeler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada bulanık karar destek yönteminin elektrikli demiryolu taşımacılığı sistemlerinin tasarım değerlendirilmesinde, enerji iletim yönteminin karar verilmesine yardımcı bir rol oynaması hedeflenmiştir. Bunun için çoklu özellikleri olan bir veri kümesinde en iyi enerji iletim yöntemini belirlemek için bu çalışmada kullanılacak bulanık karar destek yöntemidir. Bu yöntemde, karar verme sürecinde belirsizliği azaltmak ve hesaplamaları kolaylaştırmak için bulanık dilimleme teknikleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrifikasyon Sistemi, Elektrikli Demiryolu Hatları, Bulanık Karar Destek Yöntemleri, Katener Sistem

ABSTRACT

RAILWAY ENERGY TRANSMISSION SELECTION WITH FUZZY DECISION SUPPORT METHODS

The selection of an energy transmission method during railway design impacts many factors such as energy efficiency, environmental sustainability, operating costs, system reliability, and passenger comfort. The term 'tractive effort' pertains to the pulling capability of a train in railway transportation. The energy transmission system used to supply electric energy to trains utilizes different technologies, and the selection of these technologies by this factor the efficiency and cost of designing a railway system are markedly influenced.

For example, choosing between traditional energy transmission methods such as DC (Direct Current) and AC (Alternating Current) systems can result in different outcomes in terms of energy efficiency, cost, and system reliability. Furthermore, innovative technologies such as energy transmission systems based on renewable energy sources such as solar panels, and hydrogen fuel cells have also started to play an important role in railway design in recent years.

Therefore, the selection of an energy transmission method during railway design is crucial, and designers must carefully evaluate this decision during the design phase. In addition to factors such as system efficiency, cost, environmental sustainability, reliability, maintenance ease, and operating costs, future technological developments should also be taken into consideration.

In this study, the fuzzy decision-making method is aimed to help decision-makers to evaluate the energy transmission method in the design of electric railway transportation systems. The fuzzy decision-making method is used to determine the best energy transmission method in a data set with multiple features. Fuzzy slicing techniques are used to reduce uncertainty and facilitate calculations in the decision-making process.

Keywords: Electrification System, Electric Railway Lines, Fuzzy Decision Support Methods, Catenary System

SEMBOLLER

%	**:** Yüzde
$\sum$	**:** Toplam Sembolü
$\otimes$	**:** Bulanık Çarpım Sembolü
$\oplus$	**:** Bulanık Toplama Sembolü
$\mu(x)$	**:** Üyelik Fonksiyonu
X	**:** Ölçüt kümesi
U	**:** Amaç Kümesi
S	**:** Sentetik Mertebe Analiz Değeri
V	**:** Olabilirlik Derecesi
E	**:** Karar Verici Kümesi
A	**:** Alternatif Kümesi
K	**:** Kriter Kümesi
$\tilde{R}$	**:** Normalize Bulanık Karar Matrisi
A^*	**:**Bulanık Pozitif
İdeal Çözüm A^-	**:**Bulanık Negatif
İdeal Çözüm CC_i	**:**Yakınlık Katsayısı
W	**:** Ağırlık Vektörü

KISALTMALAR

A **:** Alternatifler

AAS : Analitik Ağ Süreci

AC **:** Alternatif Akım

AHP **:** Analitik Hiyerarşi Süreci

AK **:** Alt Kriterler

DC **:** Doğru Akım

Hz **:** Hertz

K **:** Kriterler

km **:** Kilometre

kV **:** Kilovolt

kW **:** kilovat

OEM **:** Doğu/Doğu-Akdeniz Koridoru

YHT **:** Yüksek Hızlı Tren

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. AC ve DC elektrifikasyon farkları [21] 13
Tablo 4.1. Enerji iletim yöntem seçimi için kullanılan ana ve alt kriterler diyagramı 28
Tablo 4.2: Demiryolu Enerji İletim Alternatifleri 35
Tablo 4.3. Bulanık topsis yönteminde sözel değişkenlerin bulanık sayılar ile ifade edilmesi 35
Tablo 4.4. Kriterlerin karar vericiler tarafından sözel değişkenler ile değerlendirilmesi 36
Tablo 4.5. Değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılarla ifadesi 37
Tablo 4.6. Kriterlerin önem ağırlıkları 38
Tablo 4.7. Alt kriterlerin değerlendirilmesi 39
Tablo 4.8. Alt kriterler değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılarla ifadesi 41
Tablo 4.9. Kriterlerin tek bir değere indirgenmesi 43
Tablo 4.10. Bulanık karar matrisi 45
Tablo 4.11. Normalize bulanık karar matrisi 46
Tablo 4.12. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi 47
Tablo 4.13. Pozitif ideal çözüm uzaklık 48
Tablo 4.14. Negatif ideal çözüm uzaklık 49
Tablo 4.15. Sonuç tablosu ve göreceli uzaklık değerleri 50
Tablo 4.16 Değerlendirmede kullanılan sözel değişkenlerin üçgen bulanık sayı cinsinden karşılıkları 51
Tablo 4.17. Karar vericiler tarafından ana kriterlerin ikili karşılaştırılması 51
Tablo 4.18. Karar vericiler tarafından ana kriterlerin üçgen bulanık sayıları 51
Tablo 4.19 Hat Özellikleri alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 54
Tablo 4.20. Tren Özellikleri alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 55
Tablo 4.21. Yolcu Talebi alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 56
Tablo 4.22. Emniyet alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 57
Tablo 4.23. Çevresel etkiler alt kriterinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 57
Tablo 4.24. Maliyet kriterinin alt kriterinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi 58
Tablo 4.25: Hat Uzunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 59
Tablo 4.26: Toplam Hat Uzunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 60
Tablo 4.27: Ray Tipi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 60
Tablo 4.28: Demiryolu Hattı Eğimi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 61
Tablo 4.29: Hat Topolojisi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 61
Tablo 4.30: Köprü ve Tünel Sayısı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 61
Tablo 4.31: Yol Şartları Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 62
Tablo 4.32: Malzeme Kalitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 62
Tablo 4.33: Trafik Yoğunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 63
Tablo 4.34: Tren Sayısı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 63
Tablo 4.35: Tren Tipi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 64
Tablo 4.36: Tren Hızı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 64
Tablo 4.37: Tren Kapasitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 65
Tablo 4.38: Tren Bakım ve Onarım Süresi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 65
Tablo 4.39: Tren Sıklığı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 66
Tablo 4.40: Güvenilirlik Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 66
Tablo 4.41: Durak Mesafeleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 67
Tablo 4.42: Entegrasyon Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 67
Tablo 4.43: Yolcu Kapasitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 68

Tablo 4.44: Headway Süresi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 68
Tablo 4.45: Sezonluk Talep Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 69
Tablo 4.46: Yolcu Yoğunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 69
Tablo 4.47: Emniyet Standartları Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 70
Tablo 4.48: Sinyalizasyon ve Emniyet Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 71
Tablo 4.49: Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 71
Tablo 4.50: Çevresel Faktörler Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 72
Tablo 4.51: Enerji Tüketimi ve Verimlilik Alt Kriteri İçin Alternatif Sonuçları 72
Tablo 4.52: Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 73
Tablo 4.53: Turistik Potansiyel Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 73
Tablo 4.54: Toplum ve Çevre Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 74
Tablo 4.55: Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti Alt Kriteri Alternatif Sonuçları 74
Tablo 4.56: İnşaat Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 75
Tablo 4.57: Bakım ve İşletme Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 75
Tablo 4.58: Bakım Kolaylığı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 76
Tablo 4.59: İşçilik Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları 76
Tablo 4.60. Hat Özellikleri Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 77
Tablo 4.61. Tren Özellikleri Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 77
Tablo 4.62. Yolcu Talebi Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 77
Tablo 4.63. Emniyet Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 78
Tablo 4.64. Çevresel Etkiler Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 78
Tablo 4.65. Maliyet Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu 78
Tablo 4.66. Ana Kriterlere Göre Önem Ağırlıklarının Özeti 78
Tablo 4.67. Bulanık AHP Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması 79
Tablo 4.68. Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS sonuçlarının karşılaştırılması 79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektrikli ve Dizel Lokomotif Kıyaslaması [4] 8
Şekil 2.2. DC Beslemeli Devre Yapısı [20]. 11
Şekil 2.3. Demiryolu Enerji İletim Yöntemleri 14
Şekil 2.4. Katener ile Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması [25] 15
Şekil 2.5. 3. Ray ile Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması [25] 16
Şekil 2.6. Yerden Besleme Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması[25] 17
Şekil 3.1. Bulanık Karar Verme Algoritması 18
Şekil 4.1. Tanzanya Demiryolu Projesi 27
Şekil 5.1. Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimine Yönelik Yazılımın Temel Yapısı 81
Şekil 5.2. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Form Ekranı 82
Şekil 5.3. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Kriterlerin Değerlendirilmesi 82
Şekil 5.4. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Alternatiflerin Değerlendirilmesi 83
Şekil 5.5. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Sonuç Ekranı 83

1. GİRİŞ

Osmanlı Devleti'nde demiryolu ulaşımı ilk olarak 1854'te Kahire-İskenderiye hattında yapılmıştır [1]. Osmanlı Devleti varlığında demiryolu yapımı İngiliz, Fransız ve Almanlara hat kilometresi başı verilen belirli kâr güvenceleri ve bazı madenlerin işletilmesi hakları ile yaptırılmıştır. Türkiye coğrafyasındaki ilk demiryolu hatları 1856 yılında İngilizlerin yapmış olduğu İzmir-Aydın arasındaki 130 km uzunluğundaki hatlardır. Cumhuriyetin ilanı sonrası ülkemiz demiryolu yapımını hızlandırmış, İkinci Dünya Savaşı'na kadar pozitif ivmeli bir hızla bu yapımı sürdürmüştür. 1923 yılından 1940 yılına kadar yapılan demiryolu uzunluğunun 3.208 km olduğu bilinmektedir ve 1950'lerde bu uzunluk 3.578 km olmuştur. 1927'de Kayseri, 1930'da Sivas, 1931'de Malatya, 1933'te Niğde, 1934'te Elâzığ, 1935'te Diyarbakır ve 1939'da Erzurum illerinde demiryolu hatları inşa edilmiştir [2].

Ülkemizdeki demiryollarının gelişmesi, 1950 yılından sonra dünyadaki teknolojik gelişmelere ve maddi avantajlara rağmen oldukça hız kesmiş, hatta durma noktasına gelmiştir. Bu, devletin ulaşım politikasını demiryollarından karayollarına doğru yönlendirmesi gerektiğine inanmasının bir sonucudur [3]. Bu yönelmeden sonra karayollarına yapılan yatırımlar demiryolunun konforlu, temiz ve çevreci avantajlarının arka planda kalmasına sebep olmuştur.

Türkiye'de uygulanan ilk elektrifikasyon sistemine bakıldığında 1955 yılında İstanbul'da mevcut olan Sirkeci-Halkalı hattıdır. Bu sistem, 25 kV AC gerilimle işletildi ve Gebze-Halkalı Marmaray projesi hizmete girene kadar etkinliğini sürdürdü. Sonrasında, Gebze-Haydarpaşa, Sincan-Kayaş ve Gebze-Haydarpaşa güzergahları elektrifikasyonla modernize edilmiştir [4].

Demiryollarına verilen önem 2003 yılında artmaya başlamış ve yeni hatlar yapılırken mevcut hatları yenilemekte demiryolu yatırımlarına hız kazandırmıştır. Teknolojik gelişimler etkisi ile mevcut hatlar da yenilenirken sinyalizasyon ve elektrifikasyon eklenmeye başlamıştır. Ülkemizde 2004 yılında yapılmış olan, Asya ve Avrupa kıtasının demiryolu ile bağlanmasını sağlayan Marmaray projesi ortaya konulmuştur. Yine ülkemizde ilk hızlı tren yapımına 2002 yılında başlanmış, Ankara-İstanbul arası planlanan 2 etaplı bu projenin ilk etabı 2009 yılında tamamlanıp (Ankara-Eskişehir), 2015 yılında ise diğer etabı (Eskişehir-İstanbul) hizmete açılmıştır [5]. Birçok proje,

özellikle Ankara-Sivas, Ankara-İzmir ve Ankara-Bursa hızlı tren projeleri, şu anda yapım veya planlama aşamasında ilerlemeye devam etmektedir [2].

Demiryolu elektrifikasyon tasarımı, projenin tasarım aşaması ve işletme yönetimini tamamen etkilediğinden dolayı şirketlerin demiryolu projelerinde kritik konularından biridir. Demiryolu proje tasarımı elektrifikasyonun yanı sıra, elektrik iletim sistemleri, güç dağıtımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi kritik faktörleri de içermektedir. Demiryolu tasarımcılarının enerji verimliliği, maliyet, çevresel sürdürülebilirlik, güvenilirlik, bakım kolaylığı ve işletme maliyetleri gibi faktörlerin yanı sıra, gelecekteki teknolojik gelişmeleri de dikkate alarak çok kapsamlı tasarımlar yapması gerekmektedir.

Demiryolu enerji iletim yönteminin seçimi, projenin boyutu, bütçesi, projenin uygulanacağı çevresel koşullar gibi birçok maddeye göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışma içeriğinde demiryolu tasarım aşamasında enerji iletim yöntemi seçiminde çok kriterli karar verme yönteminin kullanımı gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, çoklu faktörleri dikkate alarak en uygun enerji iletim yöntemini belirlemeye yardımcı olmayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu çalışma, bulanık karar destek yönteminin demiryolu tasarımı alanında kullanımının yaygınlaştırılması için bir model sunmayı hedeflemiştir. Çalışma içeriğinin şirketlerin elektrifikasyon tasarımına ilişkin stratejik kararlarını bilimsel temellere dayandırmasına yardımcı olacağı ve projelerinin başarısını arttıracağı amaçlanmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Demiryolu sistemlerinde enerji tasarrufu yöntemlerine odaklanmak önemlidir. Artırılmış güç seviyesi, yenilenebilir enerji kullanımı, enerji depolama sistemleri, hız profili optimizasyonu ve verimli sürüş yöntemleri gibi demiryolu sistemlerinde enerji tüketimini azaltmaya yönelik çeşitli yöntemleri belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemleri değerlendirmek için Y. Arıkan ve E. Çam enerji tüketimi, emisyon azaltımı, seyahat süresi ve sistem maliyeti gibi kriterleri kullanılmaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemi olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanılarak enerji azaltmada en önemli faktörün yenilenebilir enerji kullanımı olduğu belirlenmiştir. Makale ayrıca demiryolu sistemlerinde elektrifikasyonu ve transformatör merkezleri, enerji iletim hatları ve araçlar gibi elektrifikasyonun bileşenlerini tartışmaktadır [6].

Rahman ve Dig. (2020), makalesinde, AC havai hatları, DC 3. ray ve DC dördüncü raylı transit hatlarının incelenmesine odaklanmaktadır. Gerilim kaynakları ve çekiş tipleri arasındaki farklar, avantajlar ve dezavantajlar incelenmektedir. İlk olarak, metro, hafif raylı transit ve hafif metro arasındaki farklar ele alınmıştır. Ayrıca, DC ve AC havai hatlarının tarihçesi, metro transit için diğer çekiş tercihleri ve 3. ray ve dördüncü ray çekişleri arasındaki farklar vurgulanmaktadır [7].

Türkiye'de son yıllarda önemli yatırımların yapıldığı demiryolu sektöründe özellikle yüksek hızlı tren (YHT) yatırımlarının önemi vurgulanmaktadır. YHT hatlarının Ankara-İstanbul, Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya ve Eskişehir-Konya güzergahlarında faaliyet gösterdiği belirtilmektedir. Ancak YHT yatırımlarının büyük bütçe gerektirdiği ve tünel, köprü viyadük ve enerji gibi yapıların inşasıyla maliyetlerinin arttığı ifade edilmektedir. YHT' nin avantajları arasında seyahat süresinde zaman tasarrufu, bölgesel kalkınmaya katkı, havayolu taşımacılığına göre daha ekonomik ve kara taşımacılığına göre daha güvenli olması gösterilmektedir. Gelişmiş ülkelerin hızlı, uygun maliyetli, güvenli ve çevre dostu ulaşım sistemlerine odaklandığı ve en iyi çözümü bulmaya çalıştığı belirtilmektedir. Bu doğrultuda, M. Hamurcu ve T. Eren çok kriterli karar verme yöntemleri (AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, vb.) kullanarak projelerin önceliklendirilmesi veya seçilmesi gerektiğini ifade edilmektedir. Çeşitli örneklerle literatürde bu alanda yapılan çalışmalar özetlenmektedir [8].

Planlamacıların, mevcut ve gelecekteki ulaşım talebini karşılamak için kaynakları yönlendirdiği sürece raylı sistemlere yapılan yatırımların artması beklenmektedir. Şehrin hedefleri, toplu taşımacılığı önceliklendirmek ve bireysel ulaşımdan konforlu, hızlı ve güvenli bir toplu taşıma aracına geçmektedir. M. Hamurcu ve T. Eren tarafından belirlenen kriterler temelinde 6 raylı sistem hattı için farklı bütçe senaryoları altında hedef programlama modeli kullanılarak bir seçim gerçekleştirilmiştir. Proje seçim problemi, AHP ve AAS yöntemleri kısaca anlatılmış, hedef programlama ve sisteme alınması yapılmıştır. Son bölümde sonuçlar ve değerlendirmeler sunulmuş, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur[9].

Gerçek, H., Karpak, B. & Kılınçaslan, T. A, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanarak üç alternatif raylı transit ağı önerisini değerlendirir ve karar vericilerin en yakın iki alternatif raylı transit ağının kombinasyonunu yeni bir alternatif olarak geliştirdiği üzerinde çalışmışlardır. Makale, ulaşım altyapısındaki değişikliklerin büyük

miktarda sermaye yatırımı gerektirdiğinden yerel yetkililer için doğru kararların önemini vurgulamaktadır. AHP, karar vericilere hem niteliksel hem de niceliksel yönleri göz önünde bulundurulması gereken bir kararda, öncelikleri belirlemelerine ve en iyi kararı vermelerine yardımcı olan bir karar verme süreci olarak sunulmaktadır [10].

Nihan Y., Semra E. T. yaptıkları çalışmada, İstanbul'da kullanılacak alternatif raylı sistem projeleri arasında önceliklendirme yapmak için çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Kapsamlı bir literatür araştırması sonrası, dünya çapındaki ulaşım yatırımlarını değerlendirmek için kullanılan kriterler saptanmış ve İstanbul için uygun olanları uzmanlar tarafından seçilmiştir. AHP yöntemi kullanılarak alternatif ağırlıkları bulunmuştur. Analiz sonucunda en uygun proje belirlenerek öneriler sunulmuştur [11].

Trans-Avrupa Ulaştırma Ağı boyunca demiryolu ağı performansını değerlendirmek ve sınıflandırmak için bir metodoloji sunmaktadır. Orient–East Med koridoru (OEM) incelenmiştir. İnşaat, ekonomi ve teknoloji ile ilgili 22 kriter önerilmiştir. Ülkeler, çoklu karar verme yöntemi kullanılarak sıralanmış ve sınıflara ayrılmıştır. Hassasiyet analizi yapılmış ve kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçlar, OEM koridorundaki demiryolu taşımacılığının Orta Avrupa'da daha iyi gelişmiş olduğunu göstermektedir. Bu metodoloji, ulaşım planlaması ve demiryolu taşımacılığının sürdürülebilirliğinin geliştirilmesi için kararlar almak için kullanılabilir [12].

Ankara'da planlanan yeni bir monoray ulaşım sistemi için yol seçimini içermekte olup, şehirlerarası ulaşımın geliştirilmesi açısından önemlidir. M. Hamurcu ve T. Eren belirlenen sekiz alternatif monoray rotası arasından en uygun monoray rotası seçilmeyi amaçlamıştır. Bu karar sürecinde, çok kriterli karar verme yöntemlerinden Analitik Ağ Süreci (ANP) ve Benzerlik İdeal Çözüme Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS) yöntemleri kullanılmıştır. Son olarak, şehirlerarası ulaşımın geliştirilmesi için seçim süreciyle en uygun sıralama ve planlama sağlanmıştır [13].

Genişleyen şehirlerin sınırlarının artmasıyla birlikte kentsel yolculuk mesafeleri ve süreleri artmaktadır. Bu durum alışveriş merkezlerinin, otogarların, havaalanlarının şehir dışında kalmasına neden olmakta ve hastane gibi alanlara erişimde zorluklar yaratmaktadır. Bu nedenle kentsel ulaşımın sürdürülebilirliği için taleplerin yoğun olduğu noktaları birleştiren güzergahların belirlenmesi önemlidir.

Güvenli ve kısa yollar seçilmeli veya yapılmadır. Önemli merkezler, kurumlar, istasyonlar ve aktarma alanları belirli kriterlere göre planlanmalıdır. Hamurcu M. ve Eren T., güzergâh planlama aşamasında karar almak için kullanılan kriterleri açıklayarak, planlamacılara güzergâh seçimiyle ilgili rehberlik eden bilgiler sunmaktadır [14].

Kahire-Aleksandria demiryolu hattı için önerilen bir elektrifikasyon planının ekonomik ve finansal yapıda ele alıyor. F. El-Sayed Al-Tony ve A. Lashine yaptıkları değerlendirmede, planın potansiyel doğrudan ve dolaylı faydalarını ve maliyetlerini belirlemiş. Tüm fayda kaynaklarını içeren daha geniş bir maliyet-fayda analizi uygulandığında, mevcut dizel lokomotiflerin elektrifikasyona dönüştürülmesi ekonomik açıdan oldukça tatmin edici olduğunu ortaya koyuyor. Gerekli veri ve bilgilerin elde edilmesinin son derece zor olmasına rağmen, makul ve tutarlı sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçların Avrupa'daki elektrifikasyon planları ile uyumlu olduğu görülmüştür [15].

Çalışmada demiryolu planlama ve tasarımında en önemli sorunlardan biri olan optimal demiryolu rotasının belirlenmesi konusuna odaklanmaktadır. Demiryolu rota varyantları belirlendikten sonra, ana zorluk, çözümlerin analizi ve değerlendirmesi için kullanılacak kriterleri belirlemektir. Bu makale, Akdeniz Koridorunun bir parçası olarak Rijeka ile Zagreb arasında optimal bir demiryolu rotasının seçimi ve değerlendirilmesini ele almıştır.

Analiz yapmak için, V. Siniša, P. Ines, T. Frane, Rijeka ile Zagreb arasındaki bir demiryolu rotasının değerlendirilmesi ve seçimi için tanımlanan modeli, alternatiflerin çok kriterli sıralamasını yapmıştır. Tanımlanan modelin değeri, demiryolu planlama ve tasarımında kullanılan çok kriterli optimizasyon metodolojisinin sunulmasıyla ifade edilmektedir [16].

Gdynia Główna- Hel demiryolu hattında bağımsız güç kaynağıyla çalışan elektrikli çoklu birimlerin kullanımının çevresel, ekonomik ve operasyonel yatırım kriterleri açısından değerlendirildiği birçok kriterli çalışma yapılmıştır. Karkosińska-Brzozowska N, Stromski P, Karkosiński D. A. Çalışmalarında depolama birimlerinin en çevre dostu ve en düşük işletme maliyetlerine sahip seçenek olduğu bulmuştur.

Yatırım maliyeti açısından ise yanma birimleri en düşük yatırım maliyetlerine sahiptir. Klasik elektrikli birimlerle güzergâh işletmesi ise en yüksek yatırım maliyetlerine sahiptir [17].

Balkan bölgesinin Avrupa ve Asya arasındaki yolcu ve yük taşımacılığı açısından önemli bir konumda olduğunu incelenmiş ve on iki farklı demiryolu taşımacılığı pazarının gelişimini araştırılmıştır. Çok kriterli bir değerlendirme yöntemi kullanılarak ülkelerin sıralaması yapılmıştır.

Stoilova SD. En gelişmiş demiryolu taşımacılığına sahip ülkelerin Türkiye, Hırvatistan, Slovenya ve Romanya olduğunu belirlemiştir. Kriterler arasında maksimum tren hızı, ERTMS Seviyesi, yılda kat edilen tren kilometre sayısı bulunmaktadır [12].

Yukarıdaki literatürde bahsedilen çalışmalar demiryolu sistemlerinin planlaması, rota seçimi, alternatif projelerin değerlendirilmesi ve performans analizi gibi konulara odaklanmaktadır. Ancak enerji iletim yöntemi seçimi, demiryolu sistemlerinin enerji tüketimi ve çevresel etkileri açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada yukarıdaki çalışmalara ek olarak AHP ve TOPSIS yöntemleri ile enerji iletim yöntemi seçimi gerçekleştirilmiştir.

AHP yöntemi, çok kriterli karar verme sürecinde farklı faktörleri önceliklendirmenize ve ağırlıklandırmanıza yardımcı olan güçlü bir araçtır. Bu yöntemi enerji iletim yöntemi seçimi kararında kullanarak, farklı enerji iletim seçeneklerini analiz edip en uygun olanının belirlenmesini sağlayacaktır. Aynı şekilde, TOPSIS yöntemi de farklı enerji iletim seçeneklerini sıralamak ve karşılaştırmak için etkili bir yaklaşım olacaktır.

Bu çalışmada; Demiryolu tasarım aşamasında enerji iletim yöntemi seçiminde AHP ve TOPSİS çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Enerji verimliliği, maliyet, çevresel sürdürülebilirlik, güvenilirlik, bakım kolaylığı ve işletme maliyetleri gibi faktörlerin yanı sıra, gelecekteki teknolojik gelişmeleri de dikkate alarak, demiryolu tasarımcıları için çok kriterli bulanık karar destek yöntemine ilişkin bir model sunulmuştur.

Bu test kapsamında yapılan çalışmalar kısaca aşağıda belirtilmiştir;

Bu tez, demiryolu enerji iletim yöntemlerinin değerlendirilmesi ve seçiminde bulanık karar destek yöntemlerinin kullanımını incelemektedir. Bölüm 2 de, demiryolu elektrifikasyon sistemlerini ayrıntılı bir şekilde ele alarak elektrikli ve dizel hatları karşılaştırmıştır. Elektrifikasyon sistemlerindeki besleme türleri ve akım taşıma şekilleri de kapsamlı olarak incelenmiştir.

Bölüm 3 de, Bulanık karar destek yöntemleri kapsamında, Topsis, bulanık Topsis, ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemleri tanıtılmıştır. Bu yöntemlerin demiryolu enerji iletim yöntemi seçimindeki uygulanabilirliği analiz edilmiştir.

Bölüm 4 de, hedeflenen tasarımın değerlendirilmesinde kullanılacak ana ve alt kriterler belirlenmiş, ardından bulanık Topsis ve bulanık AHP yöntemleri kullanılarak en uygun enerji iletim yöntemleri seçilmiştir.

Çalışmanın uygulamasının yapıldığı bölüm 5 de, yöntemlerin kullanımını kolaylaştıracak bir yazılım geliştirilmiş ve yazılımın yapısı, alt kriter ve alternatiflerin değerlendirilmesi ile sonuçlar sunulmuştur.

Son olarak, çalışmanın genel bulguları sonuç kısmında değerlendirilmiş; demiryolu elektrifikasyon projelerinde karar destek süreçlerinde bulanık yöntemlerin sağlayabileceği katkılar tartışılmıştır.

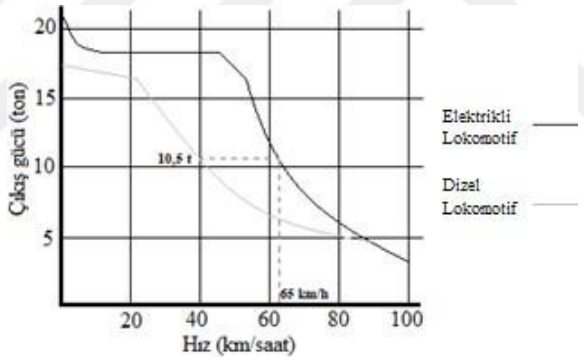
2. DEMİRYOLU ELEKTRİFİKASYONU

2.1. Giriş

Demiryolu elektrifikasyon sistemi, demiryolu trenlerine ve tramvaylara yani raylı sistemlere elektrik gücü sağlayan sistemlerin genel bir tanımdır. Enerji iletiminde 3. Raylı sistem, katener, yerden beslemeli sistemler gibi yöntemleri vardır. Bu bölümde demiryollarında kullanılan enerji ve enerji iletim yöntemleri ayrıntılı biçimde verilmiştir.

2.2. Elektrikli ve Dizel Demiryolu Hatlarının Karşılaştırılması

Dizel sistemlerin dışa bağımlı petrol gereksinimine karşılık, elektrikli sistemler ülke içerisinde elektrik santrallerinde üretilen enerjinin trafo merkezlerine aktarılması ile karşılandığından avantajlı durumdadır. Elektrikle çalışan sistemlerde, dizel ve kömür gibi yakıtların taşıma ve depolama gereksinimleri bulunmadığı için bu bir artıdır.



Şekil 2.1. Elektrikli ve Dizel Lokomotif Kıyaslaması [4]

Şekil 2.1'deki grafik Japonya da kullanılmış olan aynı beygir gücünde elektrikli ve dizel olan lokomotifleri kıyaslamaktadır. Düz çizgi, 67,2 tonluk bir AC elektrikli lokomotifin ve kesikli çizgi ise 1900 kW şaft düzenlemeli bir makinenin performans eğrisini sunmaktadır. Düşey eksende çekiş gücü ve yatay eksende hız belirtilmektedir. Grafiği incelediğinizde, elektrikli lokomotifin 40 km/s hızla hareket ettiğinde, dizel lokomotife kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla çekiş gücüne sahip olduğunu gözlemleyebilirsiniz [4].

Eğimli bir yolda aynı güçlere sahip elektrikli ve dizel lokomotifi karşılaştırdığımızda aynı düzeyde yükle elektrikli lokomotife göre dizel lokomotifteki güç kaybının çok daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Buna istinaden, 1'den fazla dizel

lokomotif ancak 1 adet elektrikli lokomotifin yaptığı iş yapabilmektedir. Dizel lokomotif kullanımı, mevcut hat üzerinde daha az tren işletilmesine ve hat kapasitesinin azalmasına neden olarak dizel demiryolunun dezavantajlarından birini ortaya çıkarır. Bu da yanında aynı yükü belirli noktaya taşımak için yakıt harcamasında dizel lokomotifin fazla harcadığını göstermektedir.

Dizel lokomotifler tek yönlü iken elektrikli lokomotifler çift yönlüdür, bu sebeple dizi oluşumu daha basittir. Elektrikli lokomotifler yolculuğa hazırken dizeller için hazırlık süresi gerekmektedir. Aynı zamanda dizel lokomotiflerin bakımı mekanik aksam fazlalığından dolayı elektrikli lokomotiflere göre daha zordur. Frenleme sırasında, elektrikli trenler kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek, bu enerjiyi hatta ileten bir mekanizma kullanırlar. Bu yöntem, hat üzerindeki diğer trenlerin bu enerjiyi geri kazanarak enerji tasarrufu yapmalarına olanak tanır.

Elektrik, petrol ve kömür gibi enerji kaynaklarının aksine enerji kaynağı olarak temiz bir enerjidir ve bu sebeple elektrikli lokomotifler çevre kirliliğine sebep olmazlar. Ek olarak elektrikli lokomotifler dizel lokomotiflere göre daha sessiz çalışırlar ve bu sayede de gürültü kirliliği oluşturmazlar [18].

Elektrikli hatların dezavantajlarına bakacak en büyük dezavantajı elektrik hattındaki yüksek gerilim sistemin çevreye karşı korumasının çok iyi olması gerekliliğidir. Diğer büyük dezavantaj ise kurulum maliyetidir. Mevcut durumda bulunan sistemleri çevirecek olmakta ekstra tünel ve köprülerin revizesi demektir. Elektrikli demiryolu hatları, düzenli bakım gerektirmesi nedeniyle ek donanım ve personel ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Elektrikli sistemlerin katener hatlarında kullanılan bakır ve alüminyum iletkenler hırsızlık olaylarının görülmesine yol açabileceğinden yine maliyet dezavantajına dönüşebilmektedir.

2.3. Elektrifikasyon Sistemlerinde Besleme Türleri

Elektrifikasyon sisteminin en temel görevi uygulayıcıya ve ilgili donanımlara iletilen gerilimin şeklinin sinüzoidal olmasıdır. Mevcut ekipmanların sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi, bu gerilimin belirli sınırlar içinde kalmasına bağlıdır. Demiryolu işletmelerinde kesintisiz işleyişin sağlanması ve herhangi bir arıza ya da kesinti durumuyla karşılaşmamak için gerilim kararlılığı son derece kritik bir faktördür. Enerji Alternatif Akım (AC) ve Doğru Akım(DC) olarak iki türde kullanılmaktadır ve

demiryolu hatları elektrifikasyonunda hangisinin kullanılacağı hattın uzunluğu ve ulaşım şeklinin nasıl olacağı gibi etkenlere göre belirlenmektedir. Şehir içi kullanılan hatlarda besleme DC olarak yapılmaktadır. Demiryolu sistemlerinde gereken gerilim seviyeleri, EN 50163 standardında belirtilmiştir. DC beslemeli demiryollarında, aracın ihtiyaç duyduğu gerilim, cer merkezlerinde şebekeden alınan AC gerilim ile DC gerilim olarak elde edilmektedir.

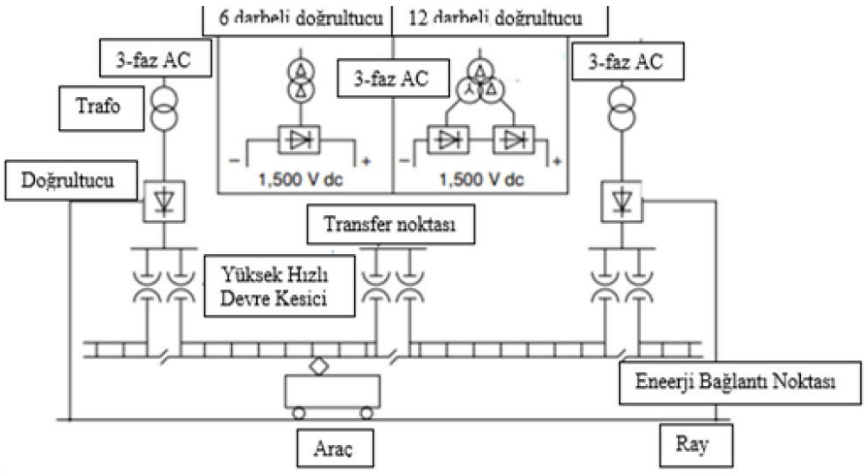
Bu nedenle AC kısımda oluşabilecek herhangi olumsuz bir durum DC sistemle beslenen tüm donanımı etkilemektedir [2].

2.3.1. DC beslemeli sistemler

DC (Doğru Akım) beslemeli demiryolu sistemleri, trenlerin hareketi ve enerji ihtiyaçlarının sağlanması için kullanılan bir elektrifikasyon yöntemidir. Bu sistemlerde, demiryolu hatları boyunca iletim ve dağıtım işlemleri için doğru akım (DC) kullanılır. Bir doğru akım besleme sistemi, alternatif akımdan doğru akıma dönüşüm için üç fazlı köprülü bir silikon doğrultucuya sahiptir. Üç faz doğrultucu, 6 darbeli sistem kullandığından alternatif akım tarafında daha düşük seviyede harmoniklere ve gerilim dalga biçiminde bozulmaya neden olarak güç kalitesini düşürür. Harmonikleri azaltmak için, AC giriş gerilimi fazları 30° ayrı, seri veya paralel bağlı iki set 6 darbeli doğrultma devresi içeren 12 darbeli bir sistem kullanan daha çağdaş bir doğrultucu tasarımı tercih edilir [19]. Şekil 2.2, alt istasyonlardan en yakın olana bağlı bir DC besleme devresinin yapısını gösteren bir örnektir. Kısım ve bağlantı direkleri bazen trafo merkezlerinin birbirinden uzakta bulunduğu çift hatlarda voltaj düşüşlerini önlemek için kullanılır. Bu durumda, yukarı ve aşağı hatlar yüksek hızlı bir devre kesici ile bağlanır.

Trafo merkezleri arası mesafe büyükşehir ana hatlarında yaklaşık 5 km, diğer hatlarda ise 10 km'dir. Ağırlığı azaltmak ve enerji tasarrufu sağlamak için DC elektrikli demiryollarında rejeneratif arabaların kullanılmaya başlanması için çaba gösteriliyor. Yavaşlama sırasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek ve havai hatlara geri döndürmek için tasarlanmıştır. Ancak, bölümde kullanılacak araba yoksa, yeniden üretilen güç boşa gidecektir. Bu kayıp tristörlü doğrultucular, tristörlü inverterler, tristörlü kıyıcı dirençler veya eş zamanlı yukarı ve aşağı beslemeli sistemler ile önlenebilir.

Bu tür cihazlar bazı bölümlerde kullanılır; Şekil 2.2, bir tristör invertörünün bir örneğini göstermektedir.



Şekil 2.2. DC Beslemeli Devre Yapısı [20].

Bu sistemde, hareket gücü bir redresörden sağlanır ve rejeneratif güç, hareket gücü gereksinimini aştığında, invertör otomatik olarak devreye girerek istasyonlara vb. güç sağlar [20].

2.3.2. DC beslemeli demiryolu sistem işleyişi

DC beslemeli demiryolu sistemleri, alternatif akım (AC) beslemeli sistemlere alternatif olarak tercih edilebilir. DC beslemeli demiryolu sistemlerinin temel özellikleri şunlardır;

1. Enerji Aktarımı: DC beslemeli sistemlerde, merkezi istasyonlardan veya alt istasyonlardan gelen alternatif akım (AC) elektrik enerjisi, doğru akıma (DC) dönüştürülerek trenlere iletilir. Trenler, bu DC gücünü kullanarak hareket eder ve iç sistemlerini besler.

2. Üst Yapı Basitliği: DC beslemeli sistemlerin altyapısı, AC beslemeli sistemlere kıyasla genellikle daha basit ve maliyet açısından daha düşüktür. Bu nedenle, daha küçük ve düşük trafik yoğunluğuna sahip demiryolu hatları veya bölgeler için tercih edilebilir [21].

3. Gerilim Kararlılığı: DC sistemlerinde gerilim dalgalanmaları daha kolay kontrol edilebilir ve düşük tutulabilir. Bu, demiryolu işletmeleri için daha kararlı bir enerji teminini sağlayabilir.

4. Rejeneratif Frenleme: DC beslemeli sistemlerde rejeneratif frenleme (enerji geri kazanımı) daha doğrudan ve etkili bir şekilde uygulanabilir. Bu, frenleme sırasında oluşan enerjinin geri kazanılarak sisteme yeniden beslenmesini sağlar ve enerji verimliliğini artırır [18].

5. Yüksüz İletim Mesafesi: DC akımın AC akıma kıyasla daha uzun mesafelere iletilmesi daha zordur. Bu nedenle DC beslemeli sistemler genellikle daha kısa hat mesafeleri ve yoğunluğu olan hatlarda tercih edilir [18].

6. Bakım ve İşletme: DC beslemeli sistemler, bazı durumlarda daha az bakım gerektirebilir ve işletme maliyetleri daha düşük olabilir.

DC beslemeli demiryolu sistemleri, demiryolu operatörlerinin ihtiyaçlarına, coğrafi ve teknik koşullara bağlı olarak tercih edilebilir [21]. Ancak, AC beslemeli sistemlerin de avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır ve her bir sistem seçiminde farklı faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3.3. AC beslemeli sistemler

AC (Alternatif Akım) beslemeli demiryolu sistemleri, trenlerin enerji ihtiyacını karşılamak ve hareket etmelerini sağlamak için kullanılan bir elektrifikasyon yöntemidir. Bu sistemlerde, demiryolu hatları boyunca iletim ve dağıtım işlemleri için alternatif akım (AC) elektrik kullanılır. AC beslemeli demiryolu sistemlerinin temel özellikleri şunlardır;

1. Enerji Aktarımı: AC beslemeli sistemlerde, merkezi istasyonlardan veya alt istasyonlardan gelen alternatif akım (AC) elektrik enerjisi, demiryolu hatları üzerinden trenlere iletilir. Trenler, bu enerjiyi kullanarak hareket eder ve iç sistemlerini besler.

2. Gerilim Değişimi: AC beslemeli sistemlerde gerilim dalgalanmaları daha esnek bir şekilde kontrol edilebilir ve değiştirilebilir. Bu, farklı hatlarda ve trafik yoğunluklarında daha kolay adaptasyon sağlar.

3. Uzun İletim Mesafesi: Alternatif akım, yüksek gerilimlerde daha uzun mesafelere iletilme yeteneğine sahiptir. Bu, geniş alanlara yayılan ve uzun hat mesafelerine sahip demiryolu ağlarında tercih edilme nedenidir [4].

4. Enerji Verimliliği: AC beslemeli sistemlerde rejeneratif frenleme (enerji geri kazanımı) daha etkili bir şekilde uygulanabilir, böylece frenleme sırasında oluşan enerji geri kazanılır ve sistem daha verimli hale gelir.

5. Üst Yapı Karmaşıklığı: AC beslemeli sistemlerin üst yapısı, DC beslemeli sistemlere kıyasla daha karmaşık olabilir. Bu, daha büyük maliyetler ve daha fazla bakım gerektirebilir [4].

6. Kullanım Alanları: AC beslemeli sistemler, genellikle büyük trafik yoğunluğuna sahip ana hatlar veya uzun mesafe hatları için tercih edilir. Yüksek hızlı tren hatları gibi yüksek performanslı hatlarda da kullanımı yaygındır.

AC beslemeli demiryolu sistemleri, demiryolu ağındaki trafik yoğunluğuna, coğrafi koşullara, enerji verimliliği hedeflerine ve diğer teknik faktörlere bağlı olarak tercih edilir. Hem AC hem de DC beslemeli sistemlerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır, bu nedenle seçim yaparken çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır.

Tablo 2.1'de AC cer gücü ve DC cer gücü elektrifikasyonları arasındaki bazı farklılıklar verilmiştir [21].

Tablo 2.1. AC ve DC elektrifikasyon farkları [21]

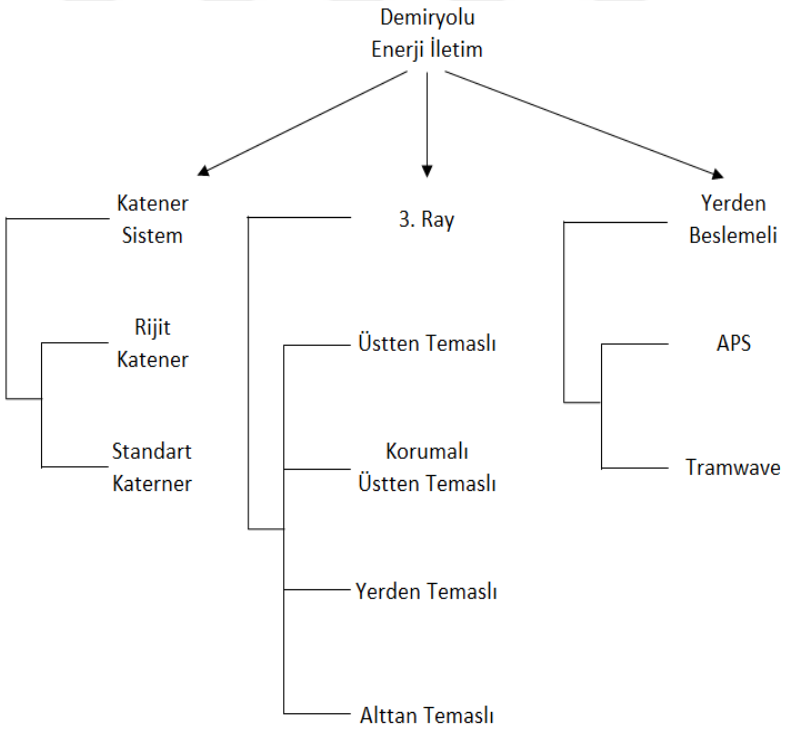
Karşılaştırılan Madde	DC SİSTEM	AC SİSTEM
Artarda olan iki cer trafo merkezi arası mesafe	2-5 km arası	15-50 km arası
Akım Toplama Sisteminin iletkenliği	Daha ağır	Hafif
Kullanılan İzolatör yapısı	Küçük	Büyük
Kaçak Akım Durumu	Korozyon gibi ciddi etkiler	Metal donanıma etkisi yok
EMI (Elektromanyetik Girişim)	Sorun teşkil etmez	Haberleşme ve Sinyalizasyon donanımlarına kritik düzeyde etkisi var

2.4. Elektrifikasyon Sistemlerinde Akım Taşıma Şekilleri

Elektrikli trenler, trafo merkezlerinden alınan hat üzerindeki bütün noktalarda paralel olarak uzanan iletken tellerden ihtiyacı olan enerjiyi almaktadır. Akım taşıma çeşitli yollar ile sağlanmaktadır. Sistemin yerde veya havada olmasına göre farklılık göstermektedir.

Havada bulunan sistemlere havai hat olarak tanımlanmaktadır. Havada bulunan iletkenlerden enerji, pantograf aracılığıyla trenlere iletilerek bu hatlarda taşınmaktadır. Havai hatlar üzerinde rijit katener ile standart katener olarak adlandırılan iki farklı sistemle akım taşınması sağlanmaktadır. Demiryolu enerji iletim yöntemleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Rijit katener sistemi ve 3. Ray sistemi, şehir içerisinde ulaşım ve metro hatlarında DC sistem olarak kullanılırken, standart katener sistemi hem şehir içerisindeki ulaşımda hem de şehirlerarası işletmecilikte tercih edilmektedir. Şehirlerarası ulaşım yollarında sadece standart AC katener sistemi tercih edilmekte iken, tünel ve gabarinin kapsamadığı kısa mesafeli bölgelerde, rijit katener sistemi kullanarak problemlere çözüm yolu bulunabilir. Türkiye'de, Marmaray Banliyö hattında Ayrılıkçeşmesi-Kazlıçeşme arasındaki tünel bölgesinde rijit katener sistemine geçilirken, yüzeysel hatlarda ise standart katener sistemini kullanılmaktadır. Sistemdeki enerji AC olup 25 kV 50 Hz'dir [19]. Yeraltı sistemlerinde, iki demiryolu hattına ek enerji sağlayan 3. ray ile gerçekleştirilen bir akım taşıma sistemidir.



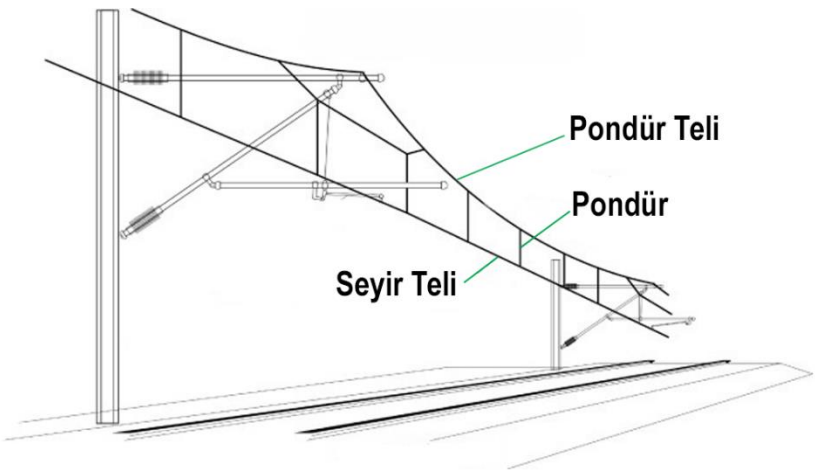
Şekil 2.3. Demiryolu Enerji İletim Yöntemleri

2.4.1. Havai hat (katener) sistemi

Havai hat ile akım toplama demiryolu taşıtlarının enerji ihtiyacını karşılamak ve hareket etmelerini sağlamak amacıyla kullanılan bir elektrifikasyon yöntemidir. Bu sistemde, demiryolu hattı boyunca yükseltilmiş bir hat yapısı kullanılarak trenlere elektrik enerjisi sağlanır. Bu hat yapısı genellikle direkler ve tellerden oluşur.

Havai hat ile akım toplama sisteminin çalışma prensibine bakıldığında demiryolu hattı boyunca yerleştirilen direkler, yükseltilmiş hat yapısını oluşturur. Bu direkler, genellikle sabit veya katlanabilir bir yapıya sahiptir ve hatların yüksekliğini korumak için kullanılır [19]. Direkler arasına gerilen teller, elektrik enerjisinin iletimini sağlar. Teller, genellikle üstten asılır ve trenlerin üzerinde bulunan bir temas sistemi (pantograf veya akım toplama ünitesi) ile temas ederek enerji aktarımını gerçekleştirir. Trenlerin çatılarına monte edilmiş bir akım toplama ünitesi veya pantograf, tellerle temas eder ve bu sayede elektrik enerjisini ileterek trenin elektrik motorlarını çalıştırır. Trenler, bu enerjiyi kullanarak hareket eder ve iç sistemlerini besler.

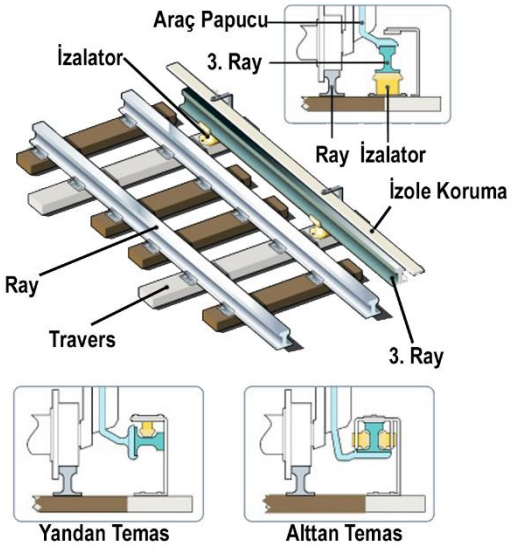
Katener sistemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Akım toplama sisteminin çalışma prensibine bakıldığında standart katener sisteminde, demiryolu hattı boyunca yerleştirilen direkler ve bu direklere asılı tellerden oluşan bir hat yapısı kullanılır. Teller, demiryolu hattının üzerine sabitlenmiş direklere asılır ve trenlerin üzerinden geçer. Trenlerin çatılarına monte edilmiş olan akım toplama üniteleri, tellerle temas ederek elektrik enerjisinin alınmasını sağlar. Bu üniteler, trenlerin hızına ve konumuna bağlı olarak otomatik olarak yüksekliği ayarlayabilir [23].



Şekil 2.4. Katener ile Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması [25]

2.4.2. 3.Ray sistemi

3.ray sistemi, demiryolu taşıtlarının enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan bir elektrifikasyon yöntemidir. Bu sistemde, demiryolu hattı boyunca döşenen 3. bir ray veya teller aracılığıyla elektrik enerjisi taşıtın üzerine iletilir. 3. ray sistemi, genellikle metrolar, tramvaylar ve banliyö trenleri gibi kentsel taşıtların kullanıldığı hatlarda tercih edilir. 3. Ray sistemi ile akım toplama sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Rayların veya tel hatlarının üzerinden taşıtların üzerine doğrudan enerji aktarımı yapılır. Rayların veya tellerin üzerinde taşıtların temas ettiği temasçılar veya akım toplama üniteleri bulunur. Raylar veya teller boyunca taşıtların üzerinden geçerken temasçılar veya akım toplama üniteleri, elektrik enerjisini alarak taşıtın iç sistemlerini ve motorlarını besler.



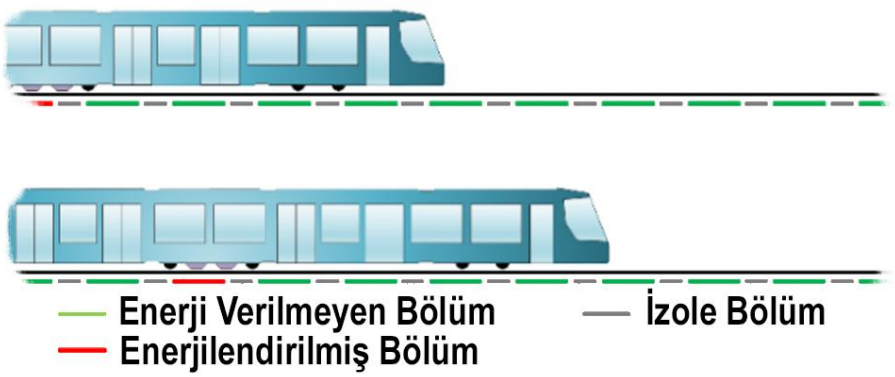
Şekil 2.5. 3. Ray ile Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması [25]

3. ray sistemi, genellikle yoğun kentsel alanlarda kullanılan taşıtlar için tercih edilir. Metrolar, tramvaylar ve banliyö trenleri gibi hatlarda yaygın olarak kullanılır. 3.ray sistemi, taşıtların kolayca enerji alabilmesini sağlar. Taşıtlar, ray veya tel üzerinden geçerken enerji alımı otomatik olarak gerçekleşir. 3. ray sisteminin diğer avantajları arasında, çevresel etkilere karşı daha az hassas olması yer alır. Hava koşulları, özellikle yağmur ve kar gibi durumlar, 3. ray sisteminin performansını genellikle etkilemez, bu da kesintisiz bir enerji aktarımı sağlar. Ayrıca, 3. ray sistemi, katener sistemine göre daha az yer kapladığı için şehir içi alanlarda daha az görsel kirlilik yaratır. Bu sistem,

daha düşük montaj yüksekliği gerektirdiğinden, özellikle düşük tavanlı tünellerde ve altgeçitlerde kullanımı kolaylaştırır.

2.4.3. Yerden beslemeli sistemler

Katenersiz sürekli cer gücü iletim sistemi olarak da geçen yerden beslemeli sistemler, geleneksel elektrikli demiryolu sistemlerinden farklı bir yaklaşım sunar. Geleneksel sistemlerde, elektrik telleri veya üçüncü ray gibi yüksek gerilimli elektrik kaynakları kullanılırken, yerden beslemeli sistem, trenin alt kısmına gömülü kablosuz şarj teknolojilerini kullanarak trenleri elektriklendirmektedir. Yerden beslemeli sistemler çalışma prensibi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Ulaşım aracına enerji, bölümlere ayrılmış ve zemin seviyesinde bulunan güç besleme rayları ile sağlanır. İletken bölümler, yayaların ve diğer karayolu kullanıcılarının emniyetini koruyarak, sadece aracın üzerini tamamen sarabildiğinde etkinleşir. Bu sistem, trenlerin enerjiyi doğrudan raylar üzerinden almasına gerek kalmadan, alt yapıyı minimumda tutarak daha esnek ve çevre dostu bir demiryolu taşımacılığı sağlar.



Şekil 2.6. Yerden Besleme Enerji İletim Yöntemi Prensip Şeması[25]

İlk olarak Alstom tarafından 2000 yılında inşa edilen ve 2003 yılında açılan Bordeaux tramvayı için tasarlanan yerden beslemeli sistem olan APS, ülkemizde de uygulanmaya devam etmektedir [24].

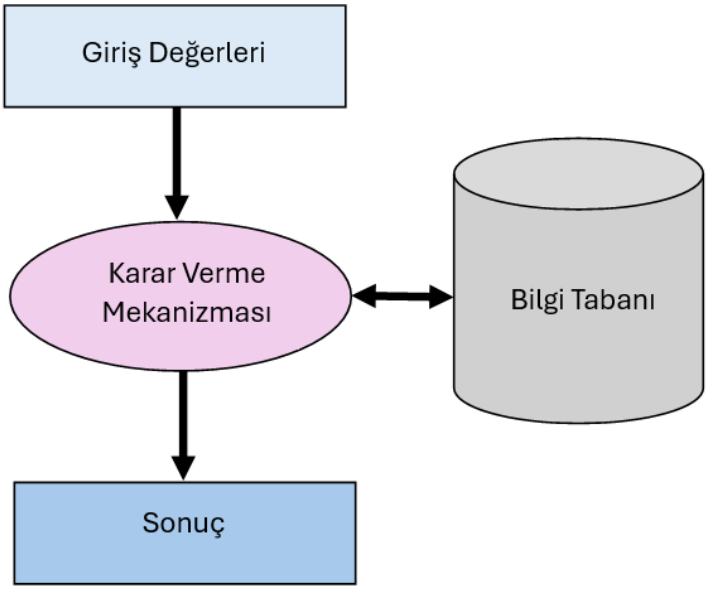
Yerden beslemeli sistemler, estetik açıdan şehir manzarasını bozmayan bir çözüm sunarak tarihi ve turistik alanlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, bu sistemler, enerji iletiminde kesintisiz bir performans sunarak şehir içi ulaşımın güvenilirliğini arttırmaktadır.

3. BULANIK KARAR DESTEK YÖNTEMLERİ

3.1. Giriş

Bu bölümde de çok kriterli bulanık karar destek yöntemleri hakkında bilgiler verilecek Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP - Analytic Hierarcy Process) ve İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bulanık Karar Destek Yöntemleri, karmaşık ve belirsiz karar verme süreçlerinde kullanılan bir dizi teknik ve yöntemi ifade eder. Bu yöntemler, bulanık mantık prensiplerine dayalı olarak, belirsizlik, kesinlik olmayan veya karmaşık durumlarla başa çıkmak amacıyla kullanılır. Şekil 3.1 de Bulanık Karar Verme Algoritması verilmiştir



Şekil 3.1. Bulanık Karar Verme Algoritması

Sistemden alınan değerler giriş bloğunda bulanık forma dönüştürülür. Bilgi tabanı sistemin karar modelini içermektedir. Bu model karar verici uzman kişilerce oluşturulmuştur. Karar verme mekanizması düşünme işleminin karşılığı olarak giriş değerleri ile bilgi tabanında buluna model arasında bir döngü içinde sonuca ulaşılmasını sağlar.

Bulanık karar verme sistemlerinde farklı karar verme yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; Bulanık TOPSIS, Bulanık AHP, Bulanık Mantık, Bulanık DEMATEL, Bulanık SWOT Analizi, Bulanık Regresyon Analizi yöntemleridir.

Bulanık TOPSIS: Klasik Topsis yöntemi, Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilmiştir ve temel amacı, karar verme süreçlerinde bulanık veya kesin bir sayısal ifadenin olmadığı durumlarda, yani belirsizlik hâkim olduğunda kullanılabilmektir. Bu yöntem, karar noktalarının ideal çözüme yakınlığını değerlendirmek için ana ilkeye dayanır [26].

Bulanık AHP: AHP' nin açılımı Analitik Hiyerarşi Sürecidir. Analitik hiyerarşi süreci (AHP), yaygın olarak kullanılan bir ölçme teorisidir ve genellikle çok kriterli karar verme, planlama, kaynak tahsisi ve anlaşmazlık çözme gibi alanlarda en geniş uygulamaya sahiptir [27].

Bulanık Mantık: Bulanık mantık, kesin olmayan veya belirsiz verileri işleme yeteneğine sahip bir mantık türüdür. Bu yöntem, bulanık kümeler ve kümeler arası ilişkileri kullanarak karmaşık kararlar vermeye yardımcı olur. İnsan düşüncesini temel alır ve bu düşünceleri matematiksel fonksiyonlara dönüştürerek işler, yani insan zekasını matematiksel bir yaklaşımla taklit eder [28].

Bulanık DEMATEL: Bu kapsamlı yöntem, karmaşık kriterler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini içeren bir yapısal model oluşturmak ve bu modeli incelemek için kullanılır [29].

Bulanık SWOT Analizi: Bulanık SWOT analizi, bir organizasyonun veya proje için iç ve dış faktörlerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılır. Bu yöntem, belirsizlikleri ve kesinlik olmayan bilgileri dikkate alarak analiz yapmayı sağlar. SWOT analizi ile sektörün güçlü- zayıf- fırsat- tehditlerini ortaya koymaktadır.

Bulanık Regresyon Analizi: Bu yöntem, bulanık verilerle regresyon analizi yapmaya yönelik bir yaklaşımdır. Verilerin kesinlik olmayan veya belirsiz olduğu durumlarda kullanılır. Bulanık Kümelenme: Bu yöntem, benzer özelliklere sahip verileri gruplandırmak amacıyla kullanılır. Veriler arasındaki belirsizlik ve kesinlik olmayan ilişkileri dikkate alarak gruplamalar yapmayı sağlar.

3.2. Topsis Yöntemi

TOPSIS Yöntemi, ilk olarak Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş olup, diğer yöntemlere kıyasla daha basit bir uygulamaya sahip olan bir yaklaşımdır [30]. Bu tekniğe istinaden, en iyi seçenek, ideal pozitif çözüme en yakın ve ideal negatif çözüme

en uzak seçenektir [31]. TOPSIS Yöntemi, iki temel referans noktası olan pozitif ideal çözüm ile negatif ideal çözümü kullanır. Pozitif ideal çözüm, tüm kriterleri en iyi şekilde karşılayan bir alternatifken, negatif ideal çözüm ise tüm kriterleri en kötü şekilde karşılayan bir alternatiftir. Amacımız, bu iki referans noktasına göre alternatifleri Öklid uzaklığı kullanarak değerlendirmektir. Yani, alternatiflerden pozitif ideal çözüme en benzeyen alternatifin belirlenmesi hedeflenir. Bununla birlikte bu alternatifin, ideal çözümlerden negatif olana en uzak olan alternatif olması istenir [32].

TOPSIS algoritmasının uygulama aşamaları aşağıda verilmektedir [33]:

1. Karar verme sürecinde, m adet alternatifin n adet kriter altında gösterdiği performans verileri toplanır. Bu veriler, her bir alternatifin her kriter altında ne kadar başarılı olduğunu ifade eden sayısal değerlerdir. Ardından, bu verileri aynı ölçekte karşılaştırılabilir hale getirmek için normalize edilir ve böylece bir normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

2. Her bir kriterin etkisi veya önemi, karar verme sürecinde belirlenir ve bu önem ağırlıkları her kritere özgü olarak hesaplanır.

3. Karar verme sürecinde, pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm, ölçülen kriterlere dayalı olarak belirlenir. Pozitif ideal çözüm, tüm kriterlerde maksimum başarıyı temsil eden bir alternatifken, negatif ideal çözüm, tüm kriterlerde minimum başarıyı temsil eden bir alternatiftir.

4. Alternatiflerden her biri için pozitif ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları, karar verme sürecinde hesap edilir. Bu uzaklıklar, alternatiflerin bu iki ideal çözüme olan yakınlığını gösterir.

5. Her bir alternatif için, ideal çözüme olan yakınlık değeri hesaplanır. Bu değer, bir alternatifin pozitif ideal çözüme olan yakınlığını ölçer, yani ne kadar iyi bir seçenek olduğunu gösterir.

6. Yakınlık değerleri, alternatiflerin sıralanmasında kullanılır. Bu değerler, her bir alternatifin pozitif ideal çözüme olan yakınlığını gösterir ve bu değerlere göre alternatifler sıralanır. Sonuç olarak, ideal çözüme en yakın olan alternatif, tercih edilen seçenek olarak belirlenir[34].

TOPSIS algoritmasının kullanılacağı birçok kriterli karar verme problemi için, m sayıda alternatif $A_1, A_2, \dots A_m$ ve n sayıda karar kriteri $C_1, C_2, \dots C_m$. Bu problemde, Mevcut kriterlere göre, her seçeneğin değerlendirmesi yapılır. Alternatiflerin her bir kritere göre değerlendirilmesi, bir karar matrisi aracılığıyla $D = (x_{ij})mxn$ gösterilmektedir.

$W = w_1, w_2, \dots w_n$TOPSIS algoritmasının uygulanması adımları, kriterlere atanmış göreli $\sum_{J=1}^{n} w_j$ ağırlık vektörünü ortaya koymak ve şartı karşılamak için aşağıdaki gibi özetlenebilir [35].

1. $D = (x_{ij})mxn$ Karar matrisi Aşağıda verilen formülü işleme alınarak normalize edilir. r_{ij} Kriterlerin normalize edilmiş değerlerini göstermektedir. Her bir değer, karar matrisinde bulunan xij değerlerinin karelerinin toplamının karekökü bölünerek normalize edilir [32].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2}} \qquad i = 1,2, \dots m \qquad j = 1,2, \dots, n$$

(3.2.1)

2. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi $V = (v_{ij})_{mxn}$ aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır. Kriterlerin göreli ağırlıkları $w_{j.}$ile gösterilmektedir [36].

$$v_{ij} = w_{j.} r_{ij} \quad i=1,2,\dots m \quad j=1,2,\dots,n$$

(3.2.2)

3. Pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm olarak iki çözüm şekli belirlenir. Denklem A^+ ideal çözümlerden pozitif ideal çözümün belirlenmesinde kullanılırken, Denklem A^- negatif ideal çözümün belirlenmesi gösterilmektedir [35].

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \cdots v_n^+\} = \{(max\, v_{ij} | j \varepsilon K'), (min\, v_{ij} | j \varepsilon K')\}$$

(3.2.3)

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \cdots v_n^-\} = \{(min\, v_{ij} | j \varepsilon K'), (max\, v_{ij} | j \varepsilon K')\}$$

(3.2.4)

K fayda kriteri indeksleri ve K' maliyet kriteri indeksleri kümesini göstermektedir

4. Her bir kriter için pozitif ideal çözüme olan uzaklıklar aşağıda verilen formül ile hesaplanırken, negatif ideal çözüme olan uzaklıklar ise 2. formül kullanılarak hesaplanmaktadır [37].

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_{\dot{y}}^+\right)^2} \qquad i = 1,2, \ldots . m \qquad j = 1,2, \ldots n$$

(3.2.5)

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_{\dot{y}}^-\right)^2} \qquad i = 1,2, \ldots . m \qquad j = 1,2, \ldots n$$

(3.2.6)

5. Alternatifler için hesaplanacak olan ideal çözüme yakınlık değerleri, aşağıdaki açıklanmıştır [38].

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^+} \qquad i = 1,2, \ldots ., m \qquad 0 \leq C_i \leq 1$$

(3.2.7)

3.3. Bulanık Topsis Yöntemi

Çok sayıda ölçüte göre birden fazla karar vericiden oluşan grubun seçime özgü kararı yanlışsız alabilmesi için müphemiyet altında seçenekleri değerlendirerek sıralamasına yardımcı olmak amacıyla geliştirilen yöntem "Bulanık TOPSIS" yöntemidir [39].

Klasik Topsis yönteminde, genellikle öznellik ve ağırlıklar, çoğunlukla sözel ifadelerle belirtildiği için bu yöntem, belirsizlikleri göz önüne alamaz [40]. Kriterler için belirlenen ağırlıklar ve alternatiflerin değerlendirmeleri, bir grup değerlendirme olarak dönüştürülmek üzere Bulanık TOPSIS algoritması tarafından işlenir [41]. Bulanık

TOPSIS, belirsizlik içeren çok kriterli karar verme problemlerinde alternatiflerin sıralanmasına ve seçilmesine yardımcı olan etkili bir yöntemdir. Bu adımlar, karmaşık problemleri ele alırken daha kapsamlı ve kararlı sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Uygulamada, bulanık TOPSIS algoritmasının adımları şu şekilde özetlenebilir:

1) Kriter ve Alternatiflerin Belirlenmesi: İlk adımda, karar verme probleminde kullanılacak kriterler ve değerlendirilecek alternatifler belirlenir. Kriterler, kararın alınmasında önemli olan ölçütleri temsil ederken, alternatifler de değerlendirilen seçenekleri ifade eder [41].

2) Normalize Edilmiş Karar Matrisinin Oluşturulması: Belirlenen kriterler ve alternatifler kullanılarak, normalize edilmiş bir karar matrisi oluşturulur. Kriterlerin ayrı ayrı hepsi için her alternatifin performansı ölçülür ve bu değerler normalize edilir.

3) Ağırlık Belirleme: Kriterlerin önem düzeyleri, karar vericilerin subjektif görüşleri veya analitik yöntemler (örneğin, Bulanık AHP) kullanılarak belirlenir. Bu ağırlıklar, kriterlerin ve alternatiflerin göreceli önemini yansıtır.

4) Bulanık İdeal ve Anti-ideal Çözümlerin Hesaplanması: Bulanık TOPSIS, ideal ve anti-ideal çözümleri hesaplar. Bu çözümler, sırasıyla performanslardan en iyisini ve en kötüsünü temsil eder. Her kriter için ideal ve anti-ideal değerler bulanık kümeler şeklinde hesaplanır [40].

5) Bulanık Yakınlık Skorlarının Hesaplanması: Her alternatif için ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklık bulanık yakınlık skorlarıyla hesaplanır. Alternatifler, ideal çözüme ne kadar yakınsa ve anti-ideal çözümden ne kadar uzaksa daha iyi olarak değerlendirilir [40].

6) Performans Sıralaması: Bulanık yakınlık skorlarına göre alternatifler sıralanır. En yüksek skora sahip alternatifler en iyi, en düşük skora sahip alternatifler ise en kötü olarak kabul edilir [41].

7) Sonuçların İncelemesi ve Karar: Sıralanan alternatifler gözden geçirilir ve karar vericiler, elde edilen sonuçlara dayanarak en uygun alternatifleri seçerler.

3.4. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

1970'lerin başında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yaklaşımı, belirli bir hiyerarşi çerçevesinde düzenlenen kriterlerin ağırlıklarını değerlendiren, alternatifleri bu kriterlere göre karşılaştıran ve sıralama yapılmasına imkân tanıyan bir yöntemdir [42]. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), bir problemdeki çok kriterli unsurların öncelik sıralamasını belirleyen ve bu unsurları hiyerarşik bir yapıda temsil eden sistematik bir yöntemdir. AHP, karmaşıklığın hiyerarşik düzenlenmesi, ikili karşılaştırmaların kullanımı, ağırlıkların hesaplanmasında özvektör (eigenvector) ve tutarlılığın ölçümü gibi önceden bilinen farklı kavram ve tekniklerden oluşmaktadır.

AHP, uzmanların değerlendirmelerine dayalı olarak öncelikleri belirleyerek, problemin karmaşıklığını azaltır, karar verme sürecini basitleştirir [43], ve planlama, en uygun alternatifin seçimi, kaynak tahsisi ve anlaşmazlıkların çözümü gibi alanlarda yaygın olarak uygulanır [44]. İkili karşılaştırma matrislerinde, her iki kriter ve her bir ikili alternatif, karar vericiye "hangisi daha önemli ve bu önem derecesi nedir?" sorusu sorularak birbiriyle karşılaştırılır [45]. AHP'nin uygulanmasında ilk aşama, karar vericinin hedeflerine yönelik bir karar problemi belirlemektir. Her bir eleman arasında yapılan ikili karşılaştırmalarla karşılaştırma matrisleri oluşturulur; bu matrisler, iki unsuru karşılaştırmayı içerir ve karar vericinin kişisel tercihlerine dayalıdır. Sonraki adımda her bir kriterin önem derecesi saptanır. Uygulamanın son aşamasında yani final kısmında ise tüm bu kriterler göz önünde bulundurularak en optimal karar alternatifi belirlenmiş olur [27].

Tez çalışması olan demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde Chang (1996) tarafından öne atılan genişletilmiş bulanık analitik hiyerarşi prosesi ele alınmıştır. Genişletilmiş bulanık AHP yönteminin kullanımı detaylı ve karışık matematiksel formüllerin kullanımından oluşmaz.

Nesneler kümesini $\{X = x_1, x_2, \dots x_n\}$ ve amaçlar kümesini $\{U = u_1, u_2, \dots u_n\}$ şeklinde ifade edersek, genişletilmiş analiz yönteminde, bir amacı gerçekleştirmek için her bir nesne ele alınır. Bu nesnenin amacının ne kadar gerçekleştirildiği, genişletilmiş bir ifadeyle ifade edilmektedir. Bu şekilde, m adet genişletilmiş analiz değeri elde edilerek aşağıdaki biçimde gösterilir:

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \cdots M_{gi}^m \quad i = 1,2, \ldots, n$$

(3.4.1)

Formülasyondaki tüm değerler üçgen bulanık sayılar olup, genişletilmiş analiz adım adım Chang'ın verilerine göre aşağıdaki gibi özetlenebilir [29]:

İlk işlem i. nesnenin bulanık büyüklüğünü bulmaktır, aşağıdaki formül kullanılır.

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j \right]^{-1}$$

(3.4.2)

Formülde kaçıncı amacın değeri bulunacağını S_i değeri ifade etmektedir. Bu denklem bulanık sayılarla yapılmakta olan normalizasyon denklemi olarak algılanabilmektedir. Denklemde bulunan $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j$ değerini bulmak için m adette genişletilmiş analiz değeri bulanık toplama işlemi yardımıyla bir matris elde edilir. Aşağıdaki formül yardımı ile bu matrisin elemanları bulunur:

$$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^{m} l_j , \sum_{j=1}^{m} m_j , \sum_{j=1}^{m} u_j \right)$$

(3.4.3)

$M_{gi}^j \; j = 1,2,3,4, \ldots . m)$ Değerlerini bulanık toplamı işlemi ile uygulayarak eşitlik sonucu bulunur.

$$\left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^{m} u_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} m_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} l_j} \right)$$

(3.4.4)

İkinci işlem ise, ağırlık değerinin elde edilmesi için elde edilmiş olan sentezin değerlerini karşılaştırmak ve karşılaştırma değerlerini kullanmaktır.

İki bulanık sayının karşılaştırılması: $\widetilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ve $\widetilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ bulanık iki sayı $\widetilde{M}_1 \geq \widetilde{M}_2$eşitlik derece değeri aşağıdaki biçimde tanımlanabilir:

$$V(\widetilde{M}_1 \geq \widetilde{M}_2) =_{y \geq x} sup\left[min\left(\mu_{\widetilde{m}_1}(x), \mu_{\widetilde{m}_2}(y)\right)\right]$$

(3.4.5)

$\mu_{\widetilde{m}_1}(x) = \mu_{\widetilde{m}_2}(y)$ ve $y \geq x$ gibi ilişkiler bulunan (x,) sayıları aralarındaki $\widetilde{M}_2 > \widetilde{M}_1$ olma olasılığını gösteren $V(\widetilde{M}_2 \geq \widetilde{M}_1) = 1$ olduğunu belirtmektedir. Bu eşitlik içerisinde $\widetilde{M}_2 orta\ değerin > \widetilde{M}_1$ olasılığı 1 değerini getirmektedir. Diğer durumlarda yani $\widetilde{M}_1 \geq \widetilde{M}_2$ durumunda kullanılacak formül:

$$V(\widetilde{M}_2 \geq \widetilde{M}_1) = yükseklik(\widetilde{M}_1 \cap \widetilde{M}_2) = \mu_{M_2}(d)$$

(3.4.6)

Bu formülasyonlarda tek bilinmesi gereken eşitlik sonucu olan $V(\widetilde{M}_2 \geq \widetilde{M}_1)$değil tersi değer olan $V(\widetilde{M}_1 \geq \widetilde{M}_2)$değerinin de hesaplanması gerekmektedir.

$$\begin{cases} 1, & m_2 > m_1 \\ 0, & l_1 > u_2 \\ diğer, & \dfrac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} \end{cases}$$

(3.4.7)

Üçüncü adımda k adet bulanık sayıdan muhaddep bir bulanık sayının M_{i} $(\mathrm{i} = 1,2, \dots, k)$ daha büyük olma olasılığı derecesi şu şekilde tanımlanır:

$V(M \geq M_1, M_2, \dots . M_{\mathrm{k}}) = V[(M \geq M_1)\ ve\ M \geq M_2\ ve \dots . M \geq M_{\mathrm{k}})] =$
$\min V\ (M \geq M_{\mathrm{i}})$ Bu durumda aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

$$(k = 1,2, \dots, n)\ ;\ k \neq j\ için\ d'(A_{\mathrm{i}} = minV(S_{\mathrm{i}} \geq S_{\mathrm{k}})$$

3.4.8

Ağırlık vektörü ise: $A_{\mathrm{i}}(\mathrm{i} = 1,2, \dots, n)'nin\ elemandan\ oluştuğu\ W' = ((d'(A_1), d'(A_2), \dots \dots d'(A_{\mathrm{n}}))^T$ şeklinde ifade edilir [29]. Ağırlık vektörünün normalize edilmiş değeri olan W bulunur [29].

$$W' = ((d'(A_1), d'(A_2), \dots \dots d'(A_{\mathrm{n}}))^T \qquad W = ((d(A_1), d(A_2), \dots \dots d(A_{\mathrm{n}}))^T$$

3.4.9

4. BULANIK AHP VE BULANIK TOPSIS YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ UYGULANMASI

4.1. Giriş

Bu bölümde; Demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi ne ilişkin oluşturulan karar verme modeli açıklanarak, Modelin Bulanık AHP ve Bulanık TOPSİS yöntemlerine uygulanılması anlatılacaktır. Yapı Merkezi – Yapı Merkezi İDİS Mühendisliğin Tanzanya'daki ana hat projesi gibi büyük ölçekli projelerde, bu kararın titizlikle değerlendirilmesi ve doğru bir şekilde yapılması kritiktir.

Bulanık TOPSIS ve bulanık AHP yöntemleri, bu karmaşık karar sürecinde kullanılarak, farklı kriterlerin önem derecelerinin ve alternatiflerin performanslarının değerlendirilmesine yardımcı olur. Bu iki yöntem, karar verme sürecinde hem nicel hem de nitel faktörlerin dikkate alınmasını mümkün kılar.

Bu çalışma, demiryolu tasarım sürecinde enerji iletim yöntemi seçiminde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılmasını incelemiş ve Yapı Merkezi'nin Tanzanya'daki Şekil 4.1 görülen ana hat projesi gibi önemli bir projede TOPSIS ve AHP yöntemleri uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Tanzanya Demiryolu Projesi

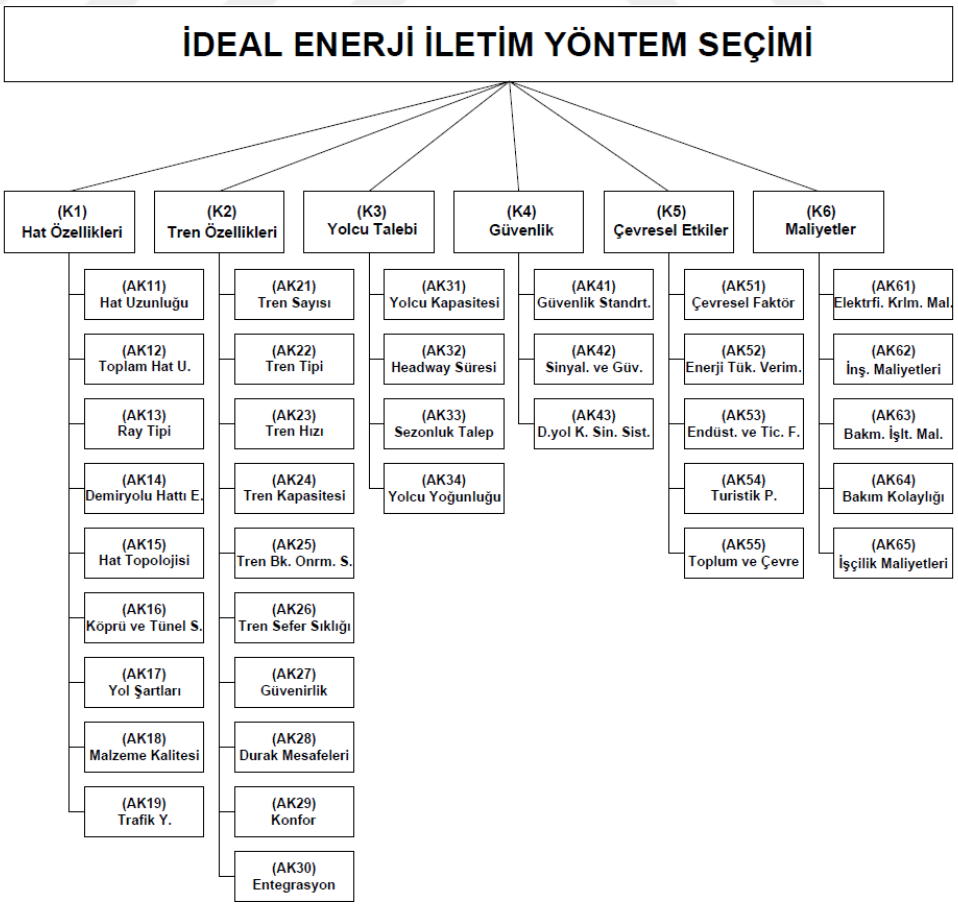
4.2. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçim Modeli

Hedeflenen tasarım değerlendirilmesi için öncelikle karar sürecine etkisi olan tüm nitel ve nicel faktörler belirlenmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda ise elde edilen bilgiler ile amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik bir yapı oluşturulmaktadır.

Yapılan çalışmada ideal enerji iletim yöntem seçimi için belirlenen ana ve alt kriterler Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Bu kriterler karar vericiler tarafından bulanık TOPSIS ve AHP yöntemleri içerisinde değerlendirilerek en avantajlı ve ideal alternatif belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Belirlenen ana kriterler ve alt kriterler farklı demiryolu sistemlerinde bulunan özelliklerden yola çıkılarak belirlenmiş ve demiryolları için ortak ve önemli olan değerler dikkate alınmıştır.

Karar vericiler için ana kriter ve alt kriterlerin birbirinden farklı demiryolu hatlarında öne çıkan özelliklerin hepsi düşünülerek incelenmesi, alternatiflerin daha sağlıklı değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Tablo 4.1. Enerji iletim yöntem seçimi için kullanılan ana ve alt kriterler diyagramı



4.2.1. K1: Hat özellikleri

Enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir etkiye sahiptir ve birçok alt kriterlerin bütünüdür. Bu seçimde dikkate alınan bazı alt kriterler aşağıdaki gibidir.

AK 1.1: Hat Uzunluğu, demiryolunda enerji iletim yöntemi seçiminde kritik bir faktördür. Uzun hatlarda iletim kayıpları daha fazla olabileceğinden, enerji iletim yöntemi seçiminde bu faktör göz önünde bulundurulmalıdır.

AK 1.2: Toplam Hat Uzunluğu, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde maliyet, verimlilik, güvenilirlik ve bakım gibi faktörlerin dikkate alınmasını gerektirir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

AK 1.3: Ray Tipi, demiryolu enerji iletim yöntemi seçimindeki etkisi, uyumluluk, verimlilik, maliyet, bakım ve işletme kolaylığı gibi faktörleri içerir. Farklı ray tipleri farklı iletim sistemleri ve teknolojileriyle uyumlu olabilir. Ayrıca, ray tipi, demiryolu altyapısının ve hatların özelliklerini de etkileyebilir

AK 1.4: Demiryolu Hattı Eğimi, trenlerin enerji tüketimini, hızını ve performansını etkiler. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının verimliliği, sürdürülebilirliği ve işletme maliyetleri açısından kritik öneme sahiptir.

AK 1.5: Hat Topolojisi, enerji iletim yöntemi seçiminde belirleyici bir faktördür. Hat topolojisi, hat düzenlemesi ve yapısıyla ilgili faktörler içerir ve enerji iletimi için uygun olan sistemlerin seçimine yol açar.

AK 1.6: Köprü ve Tünel Sayısı, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir etkiye sahiptir. Coğrafi engelleri aşma, proje maliyetleri, operasyonel etkiler, çevresel etkiler ve zaman çizelgesi gibi faktörleri içerir.

AK 1.7: Yol Şartları, demiryolu altyapısının sağlamlığı, güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir rol oynar. İyi bakımlı ve uygun şartlarda olan demiryolu yolları, demiryolu taşımacılığı sistemlerinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlar.

AK 1.8: Malzeme Kalitesi, demiryolu altyapısının dayanıklılığı, güvenliği ve uzun vadeli performansı için malzeme kalitesi son derece önemlidir. Kaliteli malzemeler,

demiryolu hatlarının dayanıklılığını artırır, bakım maliyetlerini azaltır ve güvenli ve konforlu bir seyahat deneyimi sunar.

AK 1.9: Trafik Yoğunluğu, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde verimlilik, enerji tüketimi, maliyetler, Emniyet ve bakım, çevresel etkiler gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının etkinliği, güvenliği ve çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynar. Bu faktörlerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi, demiryolu altyapısının optimize edilmesine ve uzun vadeli işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlar.

4.2.2. K2: Tren özellikleri

Farklı tren tipleri ve özellikleri, enerji tüketimi, hız, kapasite ve diğer işletme parametreleri üzerinde farklı etkilere sahip olabilir. Bu nedenle, tren seçimi, hem işletme verimliliğini hem de karar verilecek enerji iletim yöntemi açısından büyük bir öneme sahiptir.

AK 2.1: Tren Sayısı, demiryolu ağının yoğunluğuna, işletme koşullarına ve trafiğine bağlı olarak farklı enerji iletim yöntemlerinin tercih edilmesinde değerlendirilen en önemli kriterlerden biridir.

AK 2.2: Tren Tipi, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde kritik bir faktördür. Farklı tren tipleri farklı enerji gereksinimlerine, hızlara ve kapasitelere sahip olabilir. Bu nedenle, uygun enerji iletim sistemlerinin seçilmesi için tren tipinin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

AK 2.3: Tren Hızı, koşulları belirleyen önemli faktörlerden biridir. Farklı hızlarda çalışan trenler, farklı enerji gereksinimlerine, altyapıya ve işletme koşullarına ihtiyaç duyabilir. Bu nedenle, tren hızı, enerji iletim sisteminin tasarımı ve seçimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

AK 2.4: Tren Kapasitesi, enerji iletim sisteminin tasarımı ve seçimi üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Farklı kapasitelerdeki trenlerin farklı enerji gereksinimleri ve altyapı ihtiyaçlarına sahip olabilir.

AK 2.5: Tren Bakım ve Onarım Süreleri, yapılan işlemin sıklığı ve uzunluğuna bağlı olarak demiryolu ağının verimliliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği üzerinde doğrudan etkili olabilir.

AK 2.6: Tren Sefer Sıklığı, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde belirleyici bir faktördür. Bu faktör, demiryolu ağının yoğunluğunu, altyapı gereksinimlerini ve enerji kullanımını etkiler.

AK 2.7: Güvenilirlik, bir demiryolu sisteminin kesintisiz işleyiş, kazaların önlenmesi ve yolcu/yük güvenliğinin sağlanması açısından son derece önemlidir. Sistem kesintileri ve arızalar, Emniyet standartları, trafik akışı ve işletme sürekliliği, bakım ve onarım süreleri, operasyonel verimlilik gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının sağlıklı ve güvenli bir şekilde işlemesini sağlamak için önemlidir.

AK 2.8: Durak Mesafeleri, demiryolu ağının işleyişinde, hızında ve enerji kullanımında farklılıklara neden olabilir. Durak arası mesafelerin demiryolu enerji iletim yöntemi seçimine etkisi, enerji tüketimi, altyapı planlaması, tren hızları ve sefer sıklığı, bakım ve onarım süreleri, yolcu ve yük talebi gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının verimliliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynar.

AK 2.9: Konfor, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde giderek daha önemli bir faktör haline gelmektedir. Yolcuların ve personelin konforlu bir seyahat veya işletme deneyimi yaşaması, demiryolu taşımacılığındaki kaliteyi artırmak ve tercih edilebilirliği sağlamak açısından kritik önem taşır.

AK 2.10: Entegrasyon, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir faktördür ve demiryolu sistemlerinin etkin bir şekilde işlemesi için kritik öneme sahiptir. Farklı bileşenlerin ve sistemlerin birbiriyle uyumlu olması, demiryolu ağının verimliliğini, güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırabilir.

4.2.3. K3: Yolcu talebi

Demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir etken olarak karşımıza çıkar. Demiryolu taşımacılığının temel amacı olan yolcu memnuniyeti ve taleplerinin

karşılanması, enerji iletim sistemi seçiminde dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur.

AK 3.1: Yolcu Kapasitesi, demiryolu taşımacılığında, yolcu kapasitesi doğrudan yolcu talebi ve taşıma ihtiyaçlarına bağlı olarak belirlenir. Enerji iletim sistemi seçimi, yolcu kapasitesini en üst düzeye çıkarmak ve etkin bir şekilde yönetmek için çeşitli unsurları dikkate alır.

AK 3.2: Headway Süresi, iki trenin bir istasyondan kalkma aralığını düzenleyen sistemi ifade eder. Bu süre, trenlerin birbirini takip etme süresini ve trenler arasındaki minimum güvenli mesafeyi belirler. Demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde, Headway süresi önemli bir faktördür.

AK 3.3: Sezonluk Talep, demiryolu taşımacılığında belli dönemlerde değişen yolcu talebi anlamına gelir. Bu tür değişken talep modelleri, demiryolu enerji iletim sistemi seçiminde dikkate alınması gereken önemli unsurlardır.

AK 3.4: Yolcu Yoğunluğu, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde, kapasite yönetimi, tren organizasyonu ve planlaması, istasyon ve platform yönetimi, Emniyet ve acil durum yönetimi, yolcu deneyimi ve memnuniyeti gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının yoğunluklu dönemlerde dahi etkin bir şekilde işlemesini ve yolcu memnuniyetini sağlamasını destekler.

4.2.4. K4: Emniyet

Emniyetin demiryolu enerji iletim yöntemi seçimine etkisi, sistem güvenilirliği ve dayanıklılığı, kaza önleme ve Emniyet standartları, acil durum yönetimi ve kurtarma operasyonları, trafik kontrolü ve sinyalizasyon, yolcu ve personel eğitimi gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının güvenli ve sorunsuz bir şekilde işlemesini sağlamak ve yolcuların güvenliğini temin etmek için kritik bir rol oynar [46].

AK 4.1 : Emniyet Standartları, Enerji iletim sistemi, kaza önleme ve Emniyet standartlarına uygun olarak tasarlanmalıdır. Bu, demiryolu taşımacılığında güvenliği sağlamak ve kaza risklerini minimize etmek için kritiktir.

AK 4.2: Sinyalizasyon ve Emniyet, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde trafik kontrolü ve yönetimi, hız kontrolü ve yol emniyeti, kaza önleme ve acil durum

müdahalesi, yolcu bilgilendirme ve güvenliği, trafik akışı ve istasyon yönetimi gibi faktörlerini kapsar.

AK 4.3: Demiryolunda Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir faktördür. Sinyalizasyon sistemi, demiryolu trafiğinin düzenlenmesi, güvenliğin sağlanması ve kaza risklerinin azaltılması için hayati bir rol oynar.

4.2.5. K5: Çevresel etkiler

Çevresel etkiler, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde giderek daha önemli bir faktör haline gelmektedir. Bu etkiler, demiryolu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirliği ve karbon ayak izi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

AK 5.1: Çevresel Faktörler, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde giderek daha önemli hale gelmektedir. Demiryolu taşımacılığı, çevreye duyarlı bir ulaşım alternatifi olarak görülmektedir ve bu nedenle çevresel faktörlerin göz önünde bulundurulması kritik öneme sahiptir. Çevresel etkilerin minimize edilmesi, demiryolu projelerinin başarısı için temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

AK 5.2: Enerji Tüketimi ve Verimlilik, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir rol oynar. Demiryolu taşımacılığında enerji tüketimi, işletme maliyetlerini, çevresel etkileri ve operasyonel verimliliği etkileyen kritik bir faktördür.

AK 5.3: Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler, taşıma kapasitesi ve hızı, lojistik ağların entegrasyonu, maliyet etkinliği, ulaşılabilirlik ve erişilebilirlik, zamanında teslimat ve güvenilirlik gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, endüstriyel ve ticari faaliyetlerin verimli bir şekilde yönetilmesini ve işletme maliyetlerinin azaltılmasını sağlamak için önemlidir.

AK 5.4: Turistik Potansiyel, demiryolu enerji iletim yöntemi seçimine olan etkisi, turistik bölgelere erişim, konfor ve hizmet kalitesi, manzara ve doğal güzellikler, kültürel ve tarihi miras alanlarına erişim, turizm odaklı altyapı gelişimi gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, turistik bölgelerin demiryolu taşımacılığı aracılığıyla gelişimini, şehrin doğal yapıyı bozmadan destekleyerek turizm endüstrisinin büyümesine katkıda bulunur.

AK 5.5: Toplum ve Çevre, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde büyük bir etkiye sahiptir. Demiryolu taşımacılığı, toplumun ulaşım ihtiyaçlarını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal fayda sağlamak için de önemli bir rol oynar.

4.2.6. K6: Maliyetler

Yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri, enerji verimliliği ve maliyeti, operasyonel verimlilik, rekabetçilik ve piyasa faktörleri gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının maliyet etkinliğini artırmak ve sürdürülebilir bir mali yapı oluşturmak için dikkate alınmalıdır.

AK 6.1: Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti, demiryolu enerji iletim yöntemi seçimine olan etkisi, yatırım maliyetleri, enerji verimliliği ve maliyeti, operasyonel verimlilik, çevresel sürdürülebilirlik, teknolojik gelişim ve inovasyon gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu taşımacılığının modernizasyonu ve sürdürülebilirliği için elektrifikasyonun önemini vurgular.

AK 6.2: İnşaat Maliyetleri, demiryolu enerji iletim yöntemi seçimine olan etkisi, altyapı gelişimi ve genişletme, malzeme ve inşaat ekipmanları, işgücü ve işçilik maliyetleri, teknolojik yenilikler ve modernizasyon, zemin ve coğrafi koşullar gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu altyapısının etkili bir şekilde geliştirilmesi ve inşa edilmesi için dikkate alınmalıdır.

AK 6.3: Bakım ve İşletme Maliyetleri, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde kritik bir faktördür ve demiryolu altyapısının sürdürülebilirliği, verimliliği ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkisi vardır.

AK 6.4: Bakım Kolaylığı, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde önemli bir faktördür ve demiryolu altyapısının sürdürülebilirliği, verimliliği ve maliyet etkinliği üzerinde doğrudan etkili olabilir.

AK 6.5: İşçilik Maliyetleri, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde, inşaat ve montaj süreçleri, bakım ve onarım, enerji iletim hatları ve altyapı işçiliği, operasyonel personel, teknolojik yenilikler ve otomasyon gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, demiryolu altyapısının etkin bir şekilde yönetilmesi ve işletilmesi için işçilik maliyetlerinin etkin bir şekilde kontrol altında tutulmasını gerektirir.

4.3. Hedeflenen Tasarım Değerlendirilmesindeki Alternatif Enerji İletim Yöntemi Seçenekleri

Demiryolu sisteminin enerji iletim sistemi tasarımının TOPSIS ve AHP yöntemleri ile değerlendirilmesi sonrası Tablo 4.2 de gösterildiği gibi 3. Ray, Yerden besleme ve Katener ile enerji iletim alternatiflerinden biri seçilecektir.

Tablo 4.2: Demiryolu Enerji İletim Alternatifleri

Alternatif 1 (A1)	Alternatif 2 (A2)	Alternatif 3 (A3)
Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli

4.4. Bulanık Topsis ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi

Demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde TOPSIS uygulaması için öncelikle tasarım departmanında görevlendirilmiş kişilerden oluşan üç kişilik bir komite oluşturulmuştur. Mevcut durumda kullanılan üç alternatif ve bu alternatifleri değerlemede kullanılacak altı ana kriter ve otuz altı alt kriter belirlenmiştir. Ardından alternatiflerin değerlendirilmesinde ve kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılacak sözel değişkenler seçilmiştir. Komitede bulunan üç karar verici sözel değişkenler yardımı ile alternatif ve kriterleri değerlendirmiştir. Çalışma sonunda yapılan bu değerlendirmeler bulanık sayılar ile ifade edilmiştir.

Tablo 4.3. Bulanık topsis yönteminde sözel değişkenlerin bulanık sayılar ile ifade edilmesi

Sözel Değişkenler		**Üçgen Bulanık Sayılar**
Çok Düşük	(ÇD)	(0,0 . 0,0 . 0,1)
Düşük	(D)	(0,0 . 0,1 . 0,3)
Orta Düşük	(OD)	(0,1 . 0,3 . 0,5)
Orta	(O)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
Orta Yüksek	(OY)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
Yüksek	(Y)	(0,7 . 0,9 . 1,0)
Çok Yüksek	(ÇY)	(0,9 . 1,0 . 1,0)

4.4.1. Kriterlerin karar vericiler tarafından değerlendirilmesi

Komitede bulunan üç karar verici tarafından kriterler sözel değişkenler ile değerlendirilmiştir. Demiryolu enerji iletim seçimi probleminin Bulanık TOPSIS yöntemi ile çözümünde öncelikle karar vericinin, demiryolu enerji iletim probleminde

dikkate alınacak ana ve alt kriterleri ve alternatifleri değerlendirmede kullanacağı sözel değişkenler belirlenmiştir. Bu değerlendirme aşağıda bulunan 4.4 tabloda detaylı verilmiştir.

Tablo 4.4. Kriterlerin karar vericiler tarafından sözel değişkenler ile değerlendirilmesi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Karar vericiler		
				KV1	KV2	KV3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(ÇY)	(OY)	(OY)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	(OY)	(ÇY)	(Y)
		AK13	Ray Tipi	(Y)	(Y)	(ÇY)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	(Y)	(OY)	(Y)
		AK15	Hat Topolojisi	(ÇY)	(OY)	(ÇY)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(ÇY)	(OY)	(ÇY)
		AK17	Yol Şartları	(OY)	(Y)	(ÇY)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(ÇY)	(ÇY)	(Y)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(Y)	(Y)	(OY)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(O)	(Y)	(Y)
		AK22	Tren Tipi	(OY)	(Y)	(Y)
		AK23	Tren Hızı	(OY)	(OY)	(OY)
		AK24	Tren Kapasitesi	(O)	(O)	(OY)
		AK25	Tren Bkm. & Onarım S.	(Y)	(OY)	(OY)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(O)	(OY)	(O)
		AK27	Güvenilirlik	(Y)	(Y)	(Y)
		AK28	Durak Mesafeleri	(Y)	(O)	(Y)
		AK29	Konfor	(OY)	(O)	(O)
		AK210	Entegrasyon	(OY)	(Y)	(OY)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	(O)	(OD)	(D)
		AK32	Headway Süresi	(O)	(O)	(O)
		AK33	Sezonluk Talep	(O)	(OD)	(O)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	(OD)	(O)	(D)
K4	Emniyet	AK41	Emniyet Standartları	(OY)	(ÇD)	(D)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	(OD)	(O)	(OY)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(ÇD)	(O)	(OD)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(OD)	(D)	(O)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(ÇD)	(OD)	(ÇD)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(O)	(D)	(ÇD)
		AK54	Turistik Potansiyel	(D)	(OD)	(ÇD)
		AK55	Toplum ve Çevre	(O)	(O)	(O)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(OY)	(OY)	(OY)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(OD)	(OY)	(O)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	(OD)	(O)	(O)
		AK64	Bakım Kolaylığı	(OD)	(OY)	(OY)
		AK65	İşçilik Maliyetleri	(OD)	(OY)	(O)

Ana ve alt kriterler değerlendirildikten sonra alternatiflerin değerlendirilmesi işlemine geçilir. Ancak öncelikle bu değerlendirmede kullanılacak olan sözel değişkenler ve bu değişkenlerin bulanık karşılıkları belirlenmelidir. Uygulamada alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak olan sözel değişkenler ve bu değişkenlerin bulanık karşılıkları bulunmaktadır. Karar verici tarafından sözel değişkenler yardımıyla değerlendirilen ana ve alt kriterler ile alternatiflerin önem

ağırlıklarının bulanık TOPSIS yöntemi ile çözümü için , bu sözel değişkenlerin üçgen bulanık karşılıkları kullanılır. Bu değişkenlerin üçgen sayılara dönüştürülerek oluşturulan bulanık karşılıkları Tablo 4.5 yer almaktadır.

Tablo 4.5. Değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılarla ifadesi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Karar vericiler		
				KV1	KV2	KV3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(0,9 . 1 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,9 . 1 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK13	Ray Tipi	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,9 . 1 . 1)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK15	Hat Topolojisi	(0,9 . 1 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,9 . 1 . 1)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(0,9 . 1 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,9 . 1 . 1)
		AK17	Yol Şartları	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,9 . 1 . 1)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(0,9 . 1 . 1)	(0,9 . 1 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK22	Tren Tipi	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK23	Tren Hızı	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK24	Tren Kapasitesi	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK27	Güvenilirlik	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK28	Durak Mesafeleri	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK29	Konfor	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK30	Entegrasyon	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,7 . 0,9 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
K3	Yolcu Talebi	AK32	Yolcu Kapasitesi	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0 . 0,1 . 0,3)
		AK35	Headway Süresi	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK36	Sezonluk Talep	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK37	Yolcu Yoğunluğu	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0 . 0,1 . 0,3)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0 . 0 . 0,1)	(0 . 0,1 . 0,3)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(0 . 0 . 0,1)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,1 . 0,3 . 0,5)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0 . 0,1 . 0,3)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(0 . 0 . 0,1)	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0 . 0 . 0,1)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0 . 0,1 . 0,3)	(0 . 0 . 0,1)
		AK54	Turistik Potansiyel	(0 . 0,1 . 0,3)	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0 . 0 . 0,1)
		AK55	Toplum ve Çevre	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,3 . 0,5 . 0,7)	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK65	Bakım Kolaylığı	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	(0,1 . 0,3 . 0,5)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,3 . 0,5 . 0,7)

Karar vericiler tarafından sözel olarak değerlendirilen kriterlerin üçgen bulanık sayılarla ifade edilmesinin ardından kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmektedir, kriterler tek bir değere indirgenir. İlk olarak üçgen bulanık sayıların bileşenleri toplanır: $AK11 = \left(\frac{0.9}{3} + \frac{0.5}{3} + \frac{0.5}{3}\right)\left(\frac{1}{3} + \frac{0.7}{3} + \frac{0.7}{3}\right)\left(\frac{1}{3} + \frac{0.9}{3} + \frac{0.9}{3}\right)$ Ardından, her bir bileşen için ortalama alınır: $AK11 = \left(\frac{1.9}{3} + \frac{2.4}{3} + \frac{2.8}{3}\right)$ Sonuç olarak, kriterin tek bir değere

indirgenmiş hali elde edilir: $AK11 = (0.634, 0.8, 0.934)$. Bu yöntemde elde edilen değer, kriterin nihai ağırlığını temsil ederek karar sürecinde dikkate alınmaktadır.

Tablo 4.6. Kriterlerin önem ağırlıkları

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Karar vericiler KV
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(0,634 . 0,8 . 0,934)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	(0,7 . 0,867 . 0,967)
		AK13	Ray Tipi	(0,767 . 0,934 . 1)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	(0,634 . 0,834 . 0,967)
		AK15	Hat Topolojisi	(0,767 . 0,9 . 0,967)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(0,767 . 0,9 . 0,967)
		AK17	Yol Şartları	(0,7 . 0,867 . 0,967)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(0,834 . 0,967 . 1)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(0,634 . 0,834 . 0,967)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(0,567 . 0,767 . 0,9)
		AK22	Tren Tipi	(0,634 . 0,834 . 0,967)
		AK23	Tren Hızı	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK24	Tren Kapasitesi	(0,367 . 0,567 . 0,767)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	(0,567 . 0,767 . 0,934)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(0,367 . 0,567 . 0,767)
		AK27	Güvenilirlik	(0,7 . 0,9 . 1)
		AK28	Durak Mesafeleri	(0,567 . 0,767 . 0,9)
		AK29	Konfor	(0,367 . 0,567 . 0,767)
		AK30	Entegrasyon	(0,567 . 0,767 . 0,934)
K3	Yolcu Talebi	AK32	Yolcu Kapasitesi	(0,134 . 0,3 . 0,5)
		AK35	Headway Süresi	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK36	Sezonluk Talep	(0,234 . 0,434 . 0,634)
		AK37	Yolcu Yoğunluğu	(0,134 . 0,3 . 0,5)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	(0,167 . 0,267 . 0,434)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(0,134 . 0,267 . 0,434)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(0,134 . 0,3 . 0,5)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(0,034 . 0,1 . 0,234)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(0,1 . 0,2 . 0,367)
		AK54	Turistik Potansiyel	(0,034 . 0,134 . 0,3)
		AK55	Toplum ve Çevre	(0,3 . 0,5 . 0,7)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(0,3 . 0,5 . 0,7)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	(0,234 . 0,434 . 0,634)
		AK65	Bakım Kolaylığı	(0,367 . 0,567 . 0,767)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	(0,3 . 0,5 . 0,7)

Alternatifler ve kriterler arasındaki ilişkiyi gösteren bir karar matrisi oluşturulur. Bu matris, her bir alternatifin her bir kriter altında aldığı puanları içerir. Her karar verici, alternatifleri kriterler altında değerlendirir ve bu değerlendirmeler birleştirilerek nihai bir karar oluşturulur. TOPSIS yönteminde, bu karar matrisi üzerinde normalizasyon işlemi uygulanarak kriterler arasındaki farklılıklar ortadan kaldırılır. Ardından, ağırlıklandırma işlemi ile her kriterin karar sürecine olan etkisi belirlenir ve karar vericilerin ağırlıkları dikkate alınarak en uygun alternatif seçilir.

Tablo 4.7. Alt kriterlerin değerlendirilmesi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Alternatif	Karar vericiler		
					KV1	KV2	KV3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	A1	(O)	(Z)	(Z)
				A2	(İ)	(Oİ)	(O)
				A3	(İ)	(Oİ)	(O)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	A1	(Çİ)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(Z)
				A3	(O)	(OZ)	(O)
		AK13	Ray Tipi	A1	(O)	(Oİ)	(O)
				A2	(O)	(OZ)	(O)
				A3	(Çİ)	(OZ)	(Z)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	A1	(İ)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(İ)	(Oİ)	(O)
				A3	(O)	(Z)	(ÇZ)
		AK15	Hat Topolojisi	A1	(İ)	(Oİ)	(O)
				A2	(Çİ)	(Z)	(ÇZ)
				A3	(İ)	(Oİ)	(Z)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	A1	(İ)	(OZ)	(O)
				A2	(İ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A3	(Çİ)	(Oİ)	(O)
		AK17	Yol Şartları	A1	(İ)	(Z)	(O)
				A2	(İ)	(Oİ)	(O)
				A3	(İ)	(OZ)	(Z)
		AK18	Malzeme Kalitesi	A1	(O)	(Z)	(Z)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A3	(Çİ)	(OZ)	(Z)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	A1	(İ)	(Z)	(O)
				A2	(O)	(Z)	(O)
				A3	(O)	(Z)	(O)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	A1	(O)	(Oİ)	(O)
				A2	(İ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A3	(İ)	(OZ)	(ÇZ)
		AK22	Tren Tipi	A1	(İ)	(OZ)	(O)
				A2	(Çİ)	(Z)	(O)
				A3	(Çİ)	(Z)	(ÇZ)
		AK23	Tren Hızı	A1	(Çİ)	(Z)	(O)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(ÇZ)
				A3	(Çİ)	(Oİ)	(O)
		AK24	Tren Kapasitesi	A1	(O)	(OZ)	(O)
				A2	(O)	(Oİ)	(Z)
				A3	(Çİ)	(Z)	(Z)
		AK25	Tren Bakım ve Onarım Süreleri	A1	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A2	(O)	(Z)	(O)
				A3	(İ)	(OZ)	(O)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	A1	(İ)	(Z)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A3	(O)	(OZ)	(O)
		AK27	Güvenilirlik	A1	(Çİ)	(Oİ)	(O)
				A2	(İ)	(OZ)	(ÇZ)
				A3	(O)	(Z)	(O)
		AK28	Durak Mesafeleri	A1	(O)	(OZ)	(Z)
				A2	(O)	(OZ)	(ÇZ)
				A3	(İ)	(Z)	(ÇZ)

Tablo 4.7 (Devam)

K2	Tren Özellikleri	AK29	Konfor	A1	(O)	(Oİ)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A3	(Çİ)	(Z)	(Z)
		AK30	Entegrasyon	A1	(İ)	(Z)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(Z)
				A3	(O)	(OZ)	(ÇZ)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	A1	(O)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(İ)	(Z)	(O)
				A3	(İ)	(Oİ)	(Z)
		AK32	Headway Süresi	A1	(Çİ)	(Oİ)	(O)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(O)
				A3	(O)	(OZ)	(O)
		AK33	Sezonluk Talep	A1	(O)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(O)	(Z)	(Z)
				A3	(İ)	(OZ)	(ÇZ)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	A1	(İ)	(Oİ)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(O)
				A3	(İ)	(Oİ)	(O)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	A1	(O)	(Z)	(Z)
				A2	(O)	(Oİ)	(O)
				A3	(O)	(OZ)	(O)
		AK42	Sinyalizasyon ve Güvenlik	A1	(İ)	(Z)	(Z)
				A2	(İ)	(OZ)	(Z)
				A3	(Çİ)	(OZ)	(O)
		AK43	Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi	A1	(İ)	(Oİ)	(Z)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(Z)
				A3	(İ)	(OZ)	(O)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	A1	(İ)	(OZ)	(O)
				A2	(O)	(Oİ)	(O)
				A3	(İ)	(Oİ)	(ÇZ)
		AK52	Enerji Tüketimi ve Verimlilik	A1	(O)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(Z)
				A3	(Çİ)	(Z)	(O)
		AK53	Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler	A1	(O)	(OZ)	(O)
				A2	(İ)	(Oİ)	(O)
				A3	(Çİ)	(Z)	(Z)
		AK54	Turistik Potansiyel	A1	(Çİ)	(Z)	(O)
				A2	(Çİ)	(Z)	(O)
				A3	(O)	(Z)	(O)
		AK55	Toplum ve Çevre	A1	(Çİ)	(Oİ)	(O)
				A2	(Çİ)	(OZ)	(Z)
				A3	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
K6	Maliyetler	AK61	Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti	A1	(Çİ)	(OZ)	(Z)
				A2	(İ)	(Z)	(O)
				A3	(O)	(OZ)	(ÇZ)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	A1	(Çİ)	(Oİ)	(O)
				A2	(İ)	(Oİ)	(Z)
				A3	(O)	(Z)	(ÇZ)
		AK63	Bakım ve İşletme Maliyetleri	A1	(Çİ)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(İ)	(OZ)	(O)
				A3	(Çİ)	(Oİ)	(ÇZ)
		AK64	Bakım Kolaylığı	A1	(Çİ)	(OZ)	(ÇZ)
				A2	(Çİ)	(Oİ)	(Z)
				A3	(Çİ)	(Z)	(Z)
		AK65	İşçilik Maliyetleri	A1	(İ)	(OZ)	(O)
				A2	(O)	(Oİ)	(O)
				A3	(İ)	(OZ)	(O)

Her karar verici, karar vericiler tarafından sözel olarak değerlendirilen kriterler, üçgen bulanık sayılarla aşağıda gösterilir.

Tablo 4.8. Alt kriterler değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılarla ifadesi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Alternatif	Karar vericiler		
					KV1	KV2	KV3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	A1	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	A1	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK13	Ray Tipi	A1	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A3	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	A1	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
		AK15	Hat Topolojisi	A1	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
				A3	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	A1	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A3	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
		AK17	Yol Şartları	A1	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
		AK18	Malzeme Kalitesi	A1	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A3	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	A1	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A2	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	A1	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
		AK22	Tren Tipi	A1	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
		AK23	Tren Hızı	A1	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A3	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
		AK24	Tren Kapasitesi	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	A1	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A2	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	A1	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK27	Güvenilirlik	A1	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A3	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
		AK28	Durak Mesafeleri	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A2	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A3	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)

Tablo 4.8 (Devam)

K2	Tren Özellikleri	AK29	Konfor	A1	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
		AK30	Entegrasyon	A1	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
		AK32	Headway Süresi	A1	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK33	Sezonluk Talep	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	A1	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	A1	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
				A2	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	A1	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
				A2	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A3	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	A1	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	A1	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	A1	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
		AK54	Turistik Potansiyel	A1	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
		AK55	Toplum ve Çevre	A1	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A3	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	A1	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 1 . 3)
				A2	(7 . 9 . 10)	(0 . 1 . 3)	(3 . 5 . 7)
				A3	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	A1	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A2	(7 . 9 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
				A3	(3 . 5 . 7)	(0 . 1 . 3)	(0 . 0 . 1)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	A1	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A3	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 0 . 1)
		AK65	Bakım Kolaylığı	A1	(9 . 10 . 10)	(1 . 3 . 5)	(0 . 0 . 1)
				A2	(9 . 10 . 10)	(5 . 7 . 9)	(0 . 1 . 3)
				A3	(9 . 10 . 10)	(0 . 1 . 3)	(0 . 1 . 3)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	A1	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
				A2	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
				A3	(7 . 9 . 10)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)

AK11 A1 için $AK11 = \left(\frac{1}{3}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{3}+\frac{3}{3}+\frac{3}{3}\right)\left(\frac{3}{3}+\frac{5}{3}+\frac{5}{3}\right)$, her bileşenin ortalaması alınır. Alternatifler tek bir değere indirgenir $AK11 = (0.67, 2.33, 4.33)$.

Tablo 4.9. Kriterlerin tek bir değere indirgenmesi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	Alternatif	İndirgenmiş Değer
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	A1	(1 . 2,33 . 4,33)
				A2	(5 . 7 . 8,67)
				A3	(5 . 7 . 8,67)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	A1	(3,33 . 4,33 . 5,33)
				A2	(3,33 . 4,67 . 6)
				A3	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK13	Ray Tipi	A1	(3,67 . 5,67 . 7,67)
				A2	(2,33 . 4,33 . 6,33)
				A3	(3,33 . 4,67 . 6)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	A1	(2,67 . 4 . 5,33)
				A2	(5 . 7 . 8,67)
				A3	(1 . 2 . 3,67)
		AK15	Hat Topolojisi	A1	(5 . 7 . 8,67)
				A2	(3 . 3,67 . 4,67)
				A3	(4 . 5,67 . 7,33)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	A1	(3,67 . 5,67 . 7,33)
				A2	(4 . 5,33 . 6,67)
				A3	(5,67 . 7,33 . 8,67)
		AK17	Yol Şartları	A1	(3,33 . 5 . 6,67)
				A2	(5 . 7 . 8,67)
				A3	(2,67 . 4,33 . 6)
		AK18	Malzeme Kalitesi	A1	(1 . 2,33 . 4,33)
				A2	(4,67 . 5,67 . 6,67)
				A3	(3,33 . 4,67 . 6)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	A1	(3,33 . 5 . 6,67)
				A2	(2 . 3,67 . 5,67)
				A3	(2 . 3,67 . 5,67)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	A1	(3,67 . 5,67 . 7,67)
				A2	(4 . 5,33 . 6,67)
				A3	(2,67 . 4 . 5,33)
		AK22	Tren Tipi	A1	(3,67 . 5,67 . 7,33)
				A2	(4 . 5,33 . 6,67)
				A3	(3 . 3,67 . 4,67)
		AK23	Tren Hızı	A1	(4 . 5,33 . 6,67)
				A2	(3,33 . 4,33 . 5,33)
				A3	(5,67 . 7,33 . 8,67)
		AK24	Tren Kapasitesi	A1	(2,33 . 4,33 . 6,33)
				A2	(2,67 . 4,33 . 6,33)
				A3	(3 . 4 . 5,33)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	A1	(4,67 . 5,67 . 6,67)
				A2	(2 . 3,67 . 5,67)
				A3	(3,67 . 5,67 . 7,33)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	A1	(2,33 . 3,33 . 4,67)
				A2	(4,67 . 5,67 . 6,67)
				A3	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK27	Güvenilirlik	A1	(5,67 . 7,33 . 8,67)
				A2	(2,67 . 4 . 5,33)
				A3	(2 . 3,67 . 5,67)
		AK28	Durak Mesafeleri	A1	(1,33 . 3 . 5)
				A2	(1,33 . 2,67 . 4,33)
				A3	(2,33 . 3,33 . 4,67)

Tablo 4.9 (Devam)

		AK29	Konfor	A1	(2,67 . 4 . 5,67)
				A2	(4,67 . 5,67 . 6,67)
				A3	(3 . 4 . 5,33)
		AK30	Entegrasyon	A1	(2,33 . 3,33 . 4,67)
				A2	(4,67 . 6 . 7,33)
				A3	(1,33 . 2,67 . 4,33)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	A1	(1,33 . 2,67 . 4,33)
				A2	(3,33 . 5 . 6,67)
				A3	(4 . 5,67 . 7,33)
		AK32	Headway Süresi	A1	(5,67 . 7,33 . 8,67)
				A2	(4,33 . 6 . 7,33)
				A3	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK33	Sezonluk Talep	A1	(1,33 . 2,67 . 4,33)
				A2	(1 . 2,33 . 4,33)
				A3	(2,67 . 4 . 5,33)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	A1	(4 . 5,33 . 6,67)
				A2	(5,67 . 7,33 . 8,67)
				A3	(5 . 7 . 8,67)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	A1	(1 . 2,33 . 4,33)
				A2	(3,67 . 5,67 . 7,67)
				A3	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	A1	(2,33 . 3,67 . 5,33)
				A2	(2,67 . 4,33 . 6)
				A3	(4,33 . 6 . 7,33)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	A1	(4 . 5,67 . 7,33)
				A2	(3,33 . 4,67 . 6)
				A3	(3,67 . 5,67 . 7,33)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	A1	(3,67 . 5,67 . 7,33)
				A2	(3,67 . 5,67 . 7,67)
				A3	(4 . 5,33 . 6,67)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	A1	(1,33 . 2,67 . 4,33)
				A2	(3,33 . 4,67 . 6)
				A3	(4 . 5,33 . 6,67)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	A1	(2,33 . 4,33 . 6,33)
				A2	(5 . 7 . 8,67)
				A3	(3 . 4 . 5,33)
		AK54	Turistik Potansiyel	A1	(4 . 5,33 . 6,67)
				A2	(4 . 5,33 . 6,67)
				A3	(2 . 3,67 . 5,67)
		AK55	Toplum ve Çevre	A1	(5,67 . 7,33 . 8,67)
				A2	(3,33 . 4,67 . 6)
				A3	(4,67 . 5,67 . 6,67)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	A1	(3,33 . 4,67 . 6)
				A2	(3,33 . 5 . 6,67)
				A3	(1,33 . 2,67 . 4,33)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	A1	(5,67 . 7,33 . 8,67)
				A2	(4 . 5,67 . 7,33)
				A3	(1 . 2 . 3,67)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	A1	(3,33 . 4,33 . 5,33)
				A2	(3,67 . 5,67 . 7,33)
				A3	(4,67 . 5,67 . 6,67)
		AK65	Bakım Kolaylığı	A1	(3,33 . 4,33 . 5,33)
				A2	(4,67 . 6 . 7,33)
				A3	(3 . 4 . 5,33)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	A1	(3,67 . 5,67 . 7,33)
				A2	(3,67 . 5,67 . 7,67)
				A3	(3,67 . 5,67 . 7,33)

Alternatiflerin tek bir değere indirgenmesi sonrası bulanık karar matrisi oluşturulur. Bu matris, alternatiflerin belirlenen kriterlere göre karşılaştırılmasını ve en uygun seçeneğin belirlenmesini kolaylaştırır.

Tablo 4.10. Bulanık karar matrisi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	A1	A2	A3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(1 . 2,33 . 4,33)	(5 . 7 . 8,67)	(5 . 7 . 8,67)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	(3,33 . 4,33 . 5,33)	(3,33 . 4,67 . 6)	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK13	Ray Tipi	(3,67 . 5,67 . 7,67)	(2,33 . 4,33 . 6,33)	(3,33 . 4,67 . 6)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	(2,67 . 4 . 5,33)	(5 . 7 . 8,67)	(1 . 2 . 3,67)
		AK15	Hat Topolojisi	(5 . 7 . 8,67)	(3 . 3,67 . 4,67)	(4 . 5,67 . 7,33)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(3,67 . 5,67 . 7,33)	(4 . 5,33 . 6,67)	(5,67 . 7,33 . 8,67)
		AK17	Yol Şartları	(3,33 . 5 . 6,67)	(5 . 7 . 8,67)	(2,67 . 4,33 . 6)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(1 . 2,33 . 4,33)	(4,67 . 5,67 . 6,67)	(3,33 . 4,67 . 6)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(3,33 . 5 . 6,67)	(2 . 3,67 . 5,67)	(2 . 3,67 . 5,67)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(3,67 . 5,67 . 7,67)	(4 . 5,33 . 6,67)	(2,67 . 4 . 5,33)
		AK22	Tren Tipi	(3,67 . 5,67 . 7,33)	(4 . 5,33 . 6,67)	(3 . 3,67 . 4,67)
		AK23	Tren Hızı	(4 . 5,33 . 6,67)	(3,33 . 4,33 . 5,33)	(5,67 . 7,33 . 8,67)
		AK24	Tren Kapasitesi	(2,33 . 4,33 . 6,33)	(2,67 . 4,33 . 6,33)	(3 . 4 . 5,33)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	(4,67 . 5,67 . 6,67)	(2 . 3,67 . 5,67)	(3,67 . 5,67 . 7,33)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(2,33 . 3,33 . 4,67)	(4,67 . 5,67 . 6,67)	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK27	Güvenilirlik	(5,67 . 7,33 . 8,67)	(2,67 . 4 . 5,33)	(2 . 3,67 . 5,67)
		AK28	Durak Mesafeleri	(1,33 . 3 . 5)	(1,33 . 2,67 . 4,33)	(2,33 . 3,33 . 4,67)
		AK29	Konfor	(2,67 . 4 . 5,67)	(4,67 . 5,67 . 6,67)	(3 . 4 . 5,33)
		AK30	Entegrasyon	(2,33 . 3,33 . 4,67)	(4,67 . 6 . 7,33)	(1,33 . 2,67 . 4,33)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	(1,33 . 2,67 . 4,33)	(3,33 . 5 . 6,67)	(4 . 5,67 . 7,33)
		AK32	Headway Süresi	(5,67 . 7,33 . 8,67)	(4,33 . 6 . 7,33)	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK33	Sezonluk Talep	(1,33 . 2,67 . 4,33)	(1 . 2,33 . 4,33)	(2,67 . 4 . 5,33)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	(4 . 5,33 . 6,67)	(5,67 . 7,33 . 8,67)	(5 . 7 . 8,67)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	(1 . 2,33 . 4,33)	(3,67 . 5,67 . 7,67)	(2,33 . 4,33 . 6,33)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	(2,33 . 3,67 . 5,33)	(2,67 . 4,33 . 6)	(4,33 . 6 . 7,33)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(4 . 5,67 . 7,33)	(3,33 . 4,67 . 6)	(3,67 . 5,67 . 7,33)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(3,67 . 5,67 . 7,33)	(3,67 . 5,67 . 7,67)	(4 . 5,33 . 6,67)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(1,33 . 2,67 . 4,33)	(3,33 . 4,67 . 6)	(4 . 5,33 . 6,67)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(2,33 . 4,33 . 6,33)	(5 . 7 . 8,67)	(3 . 4 . 5,33)
		AK54	Turistik Potansiyel	(4 . 5,33 . 6,67)	(4 . 5,33 . 6,67)	(2 . 3,67 . 5,67)
		AK55	Toplum ve Çevre	(5,67 . 7,33 . 8,67)	(3,33 . 4,67 . 6)	(4,67 . 5,67 . 6,67)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(3,33 . 4,67 . 6)	(3,33 . 5 . 6,67)	(1,33 . 2,67 . 4,33)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(5,67 . 7,33 . 8,67)	(4 . 5,67 . 7,33)	(1 . 2 . 3,67)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	(3,33 . 4,33 . 5,33)	(3,67 . 5,67 . 7,33)	(4,67 . 5,67 . 6,67)
		AK65	Bakım Kolaylığı	(3,33 . 4,33 . 5,33)	(4,67 . 6 . 7,33)	(3 . 4 . 5,33)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	(3,67 . 5,67 . 7,33)	(3,67 . 5,67 . 7,67)	(3,67 . 5,67 . 7,33)

Karar matrisindeki değerler normalleştirilir. Bu, her bir kriterin etkisini standartlaştırır ve farklı ölçeklerdeki kriterlerin karşılaştırılmasını sağlar. Her satırın elemanı bulunduğu satırdaki maksimum değere bölünür ve bu şekilde normalize edilmiş bulanık matris oluşturulmuş olunur. Ayrıca, normalizasyon işlemi, karar verme sürecinde elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırarak daha bilinçli seçimler yapılmasına katkı sağlar.

Bu normalizasyon süreci, tüm kriterlerin eşit ağırlıkta değerlendirilmesine olanak tanır, böylece herhangi bir kriterin diğerlerinden daha fazla etkili olmasını önler. Ayrıca, normalleştirilmiş değerler, karar sürecinde daha objektif ve adil bir değerlendirme yapılmasını sağlar. Sonuç olarak, bu yöntem, karar verme sürecinde tutarlılığı artırarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunur.

Tablo 4.11. Normalize bulanık karar matrisi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	A1	A2	A3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(0,12 . 0,27 . 0,5)	(0,58 . 0,81 . 1)	(0,58 . 0,81 . 1)
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	(0,53 . 0,68 . 0,84)	(0,53 . 0,74 . 0,95)	(0,37 . 0,68 . 1)
		AK13	Ray Tipi	(0,48 . 0,74 . 1)	(0,3 . 0,57 . 0,83)	(0,43 . 0,61 . 0,78)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğimi	(0,31 . 0,46 . 0,62)	(0,58 . 0,81 . 1)	(0,12 . 0,23 . 0,42)
		AK15	Hat Topolojisi	(0,58 . 0,81 . 1)	(0,35 . 0,42 . 0,54)	(0,46 . 0,65 . 0,85)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(0,42 . 0,65 . 0,85)	(0,46 . 0,62 . 0,77)	(0,65 . 0,85 . 1)
		AK17	Yol Şartları	(0,38 . 0,58 . 0,77)	(0,58 . 0,81 . 1)	(0,31 . 0,5 . 0,69)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(0,15 . 0,35 . 0,65)	(0,7 . 0,85 . 1)	(0,5 . 0,7 . 0,9)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(0,5 . 0,75 . 1)	(0,3 . 0,55 . 0,85)	(0,3 . 0,55 . 0,85)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(0,48 . 0,74 . 1)	(0,52 . 0,7 . 0,87)	(0,35 . 0,52 . 0,7)
		AK22	Tren Tipi	(0,5 . 0,77 . 1)	(0,55 . 0,73 . 0,91)	(0,41 . 0,5 . 0,64)
		AK23	Tren Hızı	(0,46 . 0,62 . 0,77)	(0,38 . 0,5 . 0,62)	(0,65 . 0,85 . 1)
		AK24	Tren Kapasitesi	(0,37 . 0,68 . 1)	(0,42 . 0,68 . 1)	(0,47 . 0,63 . 0,84)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	(0,64 . 0,77 . 0,91)	(0,27 . 0,5 . 0,77)	(0,5 . 0,77 . 1)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(0,35 . 0,5 . 0,7)	(0,7 . 0,85 . 1)	(0,35 . 0,65 . 0,95)
		AK27	Güvenilirlik	(0,65 . 0,85 . 1)	(0,31 . 0,46 . 0,62)	(0,23 . 0,42 . 0,65)
		AK28	Durak Mesafeleri	(0,27 . 0,6 . 1)	(0,27 . 0,53 . 0,87)	(0,47 . 0,67 . 0,93)
		AK29	Konfor	(0,4 . 0,6 . 0,85)	(0,7 . 0,85 . 1)	(0,45 . 0,6 . 0,8)
		AK30	Entegrasyon	(0,32 . 0,45 . 0,64)	(0,64 . 0,82 . 1)	(0,18 . 0,36 . 0,59)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	(0,18 . 0,36 . 0,59)	(0,45 . 0,68 . 0,91)	(0,55 . 0,77 . 1)
		AK32	Headway Süresi	(0,65 . 0,85 . 1)	(0,5 . 0,69 . 0,85)	(0,27 . 0,5 . 0,73)
		AK33	Sezonluk Talep	(0,25 . 0,5 . 0,81)	(0,19 . 0,44 . 0,81)	(0,5 . 0,75 . 1)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	(0,46 . 0,62 . 0,77)	(0,65 . 0,85 . 1)	(0,58 . 0,81 . 1)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	(0,13 . 0,3 . 0,57)	(0,48 . 0,74 . 1)	(0,3 . 0,57 . 0,83)
		AK42	Sinyalizasyon ve Emn.	(0,32 . 0,5 . 0,73)	(0,36 . 0,59 . 0,82)	(0,59 . 0,82 . 1)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(0,55 . 0,77 . 1)	(0,45 . 0,64 . 0,82)	(0,5 . 0,77 . 1)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(0,48 . 0,74 . 0,96)	(0,48 . 0,74 . 1)	(0,52 . 0,7 . 0,87)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(0,2 . 0,4 . 0,65)	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,6 . 0,8 . 1)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(0,27 . 0,5 . 0,73)	(0,58 . 0,81 . 1)	(0,35 . 0,46 . 0,62)
		AK54	Turistik Potansiyel	(0,6 . 0,8 . 1)	(0,6 . 0,8 . 1)	(0,3 . 0,55 . 0,85)
		AK55	Toplum ve Çevre	(0,65 . 0,85 . 1)	(0,38 . 0,54 . 0,69)	(0,54 . 0,65 . 0,77)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(0,5 . 0,7 . 0,9)	(0,5 . 0,75 . 1)	(0,2 . 0,4 . 0,65)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(0,65 . 0,85 . 1)	(0,46 . 0,65 . 0,85)	(0,12 . 0,23 . 0,42)
		AK63	Bakım ve İşletme Mal.	(0,45 . 0,59 . 0,73)	(0,5 . 0,77 . 1)	(0,64 . 0,77 . 0,91)
		AK65	Bakım Kolaylığı	(0,45 . 0,59 . 0,73)	(0,64 . 0,82 . 1)	(0,41 . 0,55 . 0,73)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	(0,48 . 0,74 . 0,96)	(0,48 . 0,74 . 1)	(0,48 . 0,74 . 0,96)

Kriterlerin önem ağırlıkları ve alternatifin ağırlığının çarpımı ile ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi elde edilir, böylece alternatifler arasındaki en iyi seçimi yapabilmek için karşılaştırma yapılabilir. Bu yöntem, belirsizlik ve subjektif değerlendirmelerin olduğu durumlarda karar sürecini daha objektif hale getirir.

Bu matris, her alternatifin her bir kritere göre ne kadar iyi performans gösterdiğini yansıtır. Kriterlerin önem ağırlıkları, karar verme sürecinde hangi kriterlerin daha öncelikli olduğunu belirler ve bu ağırlıklar, alternatiflerin genel değerlendirilmesine doğrudan etki eder. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi, tüm kriterler arasındaki dengeyi sağlayarak daha dengeli ve objektif bir değerlendirme sunar. Sonuç olarak, bu matrisin analizi, en uygun alternatifin belirlenmesinde kritik bir rol oynar.

Tablo 4.12. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter N.	Alt Kriterler	A1	A2	A3
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	(0,18 . 0,34 . 0,54)	(0,91 . 1,01 . 1,07)	(0,91 . 1,01 . 1,07)
		AK12	Toplam Hat U.	(0,75 . 0,79 . 0,87)	(0,75 . 0,85 . 0,98)	(0,53 . 0,79 . 1,03)
		AK13	Ray Tipi	(0,62 . 0,79 . 1)	(0,4 . 0,61 . 0,83)	(0,57 . 0,65 . 0,78)
		AK14	Demiryolu Hattı Eğm.	(0,49 . 0,55 . 0,64)	(0,91 . 0,97 . 1,03)	(0,18 . 0,28 . 0,44)
		AK15	Hat Topolojisi	(0,75 . 0,9 . 1,03)	(0,45 . 0,47 . 0,56)	(0,6 . 0,73 . 0,88)
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	(0,55 . 0,73 . 0,88)	(0,6 . 0,68 . 0,8)	(0,85 . 0,94 . 1,03)
		AK17	Yol Şartları	(0,55 . 0,67 . 0,8)	(0,82 . 0,93 . 1,03)	(0,44 . 0,58 . 0,72)
		AK18	Malzeme Kalitesi	(0,18 . 0,36 . 0,65)	(0,84 . 0,88 . 1)	(0,6 . 0,72 . 0,9)
		AK19	Trafik Yoğunluğu	(0,79 . 0,9 . 1,03)	(0,47 . 0,66 . 0,88)	(0,47 . 0,66 . 0,88)
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	(0,84 . 0,96 . 1,11)	(0,92 . 0,91 . 0,97)	(0,61 . 0,68 . 0,77)
		AK22	Tren Tipi	(0,79 . 0,93 . 1,03)	(0,86 . 0,87 . 0,94)	(0,65 . 0,6 . 0,66)
		AK23	Tren Hızı	(0,92 . 0,88 . 0,85)	(0,77 . 0,71 . 0,68)	(1,31 . 1,21 . 1,11)
		AK24	Tren Kapasitesi	(1 . 1,21 . 1,3)	(1,15 . 1,21 . 1,3)	(1,29 . 1,11 . 1,1)
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	(1,12 . 1,01 . 0,97)	(0,48 . 0,65 . 0,83)	(0,88 . 1,01 . 1,07)
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	(0,95 . 0,88 . 0,91)	(1,91 . 1,5 . 1,3)	(0,95 . 1,15 . 1,24)
		AK27	Güvenilirlik	(0,93 . 0,94 . 1)	(0,44 . 0,51 . 0,62)	(0,33 . 0,47 . 0,65)
		AK28	Durak Mesafeleri	(0,47 . 0,78 . 1,11)	(0,47 . 0,7 . 0,96)	(0,82 . 0,87 . 1,04)
		AK29	Konfor	(1,09 . 1,06 . 1,11)	(1,91 . 1,5 . 1,3)	(1,23 . 1,06 . 1,04)
		AK30	Entegrasyon	(0,56 . 0,59 . 0,68)	(1,12 . 1,07 . 1,07)	(0,32 . 0,47 . 0,63)
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	(1,36 . 1,21 . 1,18)	(3,41 . 2,27 . 1,82)	(4,09 . 2,58 . 2)
		AK32	Headway Süresi	(2,18 . 1,69 . 1,43)	(1,67 . 1,38 . 1,21)	(0,9 . 1 . 1,04)
		AK33	Sezonluk Talep	(1,07 . 1,15 . 1,28)	(0,8 . 1,01 . 1,28)	(2,14 . 1,73 . 1,58)
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	(3,46 . 2,05 . 1,54)	(4,9 . 2,82 . 2)	(4,33 . 2,69 . 2)
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	(0,78 . 1,14 . 1,3)	(2,87 . 2,77 . 2,31)	(1,83 . 2,12 . 1,91)
		AK42	Sinyalizasyon ve Em.	(1,06 . 1 . 1,04)	(1,21 . 1,18 . 1,17)	(1,97 . 1,64 . 1,43)
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	(4,09 . 2,9 . 2,31)	(3,41 . 2,39 . 1,89)	(3,75 . 2,9 . 2,31)
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	(3,59 . 2,46 . 1,91)	(3,59 . 2,46 . 2)	(3,91 . 2,32 . 1,74)
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	(6 . 4 . 2,79)	(15 . 7 . 3,86)	(18 . 8 . 4,29)
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	(2,69 . 2,5 . 1,99)	(5,77 . 4,04 . 2,73)	(3,46 . 2,31 . 1,68)
		AK54	Turistik Potansiyel	(18 . 6 . 3,33)	(18 . 6 . 3,33)	(9 . 4,13 . 2,83)
		AK55	Toplum ve Çevre	(2,18 . 1,69 . 1,43)	(1,28 . 1,08 . 0,99)	(1,79 . 1,31 . 1,1)
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	(1 . 1 . 1)	(1 . 1,07 . 1,11)	(0,4 . 0,57 . 0,72)
		AK62	İnşaat Maliyetleri	(2,18 . 1,69 . 1,43)	(1,54 . 1,31 . 1,21)	(0,38 . 0,46 . 0,6)
		AK63	Bakım ve İşletme M.	(1,95 . 1,36 . 1,15)	(2,14 . 1,78 . 1,58)	(2,73 . 1,78 . 1,44)
		AK65	Bakım Kolaylığı	(1,24 . 1,04 . 0,95)	(1,74 . 1,44 . 1,3)	(1,12 . 0,96 . 0,95)
		AK66	İşçilik Maliyetleri	(1,59 . 1,48 . 1,37)	(1,59 . 1,48 . 1,43)	(1,59 . 1,48 . 1,37)

İdeal çözüme göre her alternatifin ne kadar yakın veya uzak olduğunu belirlemek için normalleştirilmiş değerler kullanılarak ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıklar hesaplanır. Her kritere göre alternatiflerin (Ai(i=1,2,3,4,5)) bulanık pozitif ideal çözüm

(A*) arasındaki uzaklık değeri bulunur. Bu uzaklık değerleri, alternatiflerin en iyi ve en kötü senaryolarla ne kadar uyumlu olduğunu gösterir. İdeal çözüme en yakın olan alternatif, en uygun çözüm olarak değerlendirilir. Böylece, alternatiflerin sıralanması ve en iyi seçeneğin belirlenmesi daha kesin bir şekilde yapılabilir.

Tablo 4.13. Pozitif ideal çözüm uzaklık

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	d(A1, A*)	d(A2, A*)	d(A3, A*)
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	0,664	0,066	0,066
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	0,202	0,168	0,300
		AK13	Ray Tipi	0,248	0,428	0,344
		AK14	Demiryolu Hattı Eğm.	0,446	0,058	0,709
		AK15	Hat Topolojisi	0,156	0,509	0,288
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	0,312	0,316	0,094
		AK17	Yol Şartları	0,345	0,111	0,437
		AK18	Malzeme Kalitesi	0,633	0,116	0,286
		AK19	Trafik Yoğunluğu	0,136	0,368	0,368
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	0,113	0,073	0,318
		AK22	Tren Tipi	0,130	0,114	0,366
		AK23	Tren Hızı	0,118	0,280	0,224
		AK24	Tren Kapasitesi	0,213	0,229	0,190
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	0,073	0,374	0,080
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	0,088	0,624	0,164
		AK27	Güvenilirlik	0,051	0,483	0,532
		AK28	Durak Mesafeleri	0,337	0,353	0,128
		AK29	Konfor	0,089	0,624	0,138
		AK30	Entegrasyon	0,391	0,091	0,539
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	0,265	1,642	2,085
		AK32	Headway Süresi	0,827	0,460	0,064
		AK33	Sezonluk Talep	0,190	0,199	0,852
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	1,576	2,553	2,231
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	0,231	1,668	0,959
		AK42	Sinyalizasyon ve Em.	0,042	0,188	0,714
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	2,226	1,685	2,072
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	1,795	1,811	1,895
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	3,521	8,947	10,783
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	1,426	3,414	1,656
		AK54	Turistik Potansiyel	10,319	10,319	5,070
		AK55	Toplum ve Çevre	0,827	0,169	0,495
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	0,000	0,076	0,455
		AK62	İnşaat Maliyetleri	0,827	0,378	0,524
		AK63	Bakım ve İşletme M.	0,592	0,867	1,123
		AK65	Bakım Kolaylığı	0,144	0,526	0,076
		AK66	İşçilik Maliyetleri	0,489	0,505	0,489

Her kritere göre alternatiflerin (Ai(i=1,2,3,4,5)) bulanık negatif ideal çözüm (A^{-}) arasındaki uzaklık değeri bulunur. Bu uzaklık değerleri, alternatiflerin ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu belirleyerek karar verme sürecinde önemli bir gösterge sağlar.

Negatif ideal çözüm, her kriterde en kötü performansı temsil eder ve alternatiflerin bu çözüme olan uzaklıkları, her bir alternatifin ne kadar olumsuz senaryolardan uzak olduğunu gösterir. Negatif ideal çözüme uzaklıklar, alternatiflerin potansiyel zayıflıklarını ve eksikliklerini değerlendirirken önemli bir rol oynar. Bu uzaklıklar, ideal ve negatif ideal çözümler arasındaki farkı anlamada kullanılır ve alternatiflerin genel performansını daha kapsamlı bir şekilde analiz etmeye yardımcı olur. Sonuç olarak, bu analiz, karar vericilerin daha bilinçli ve etkili seçimler yapmalarını sağlayarak, karar verme sürecinin kalitesini artırır.

Tablo 4.14. Negatif ideal çözüm uzaklık

Kriter No	Ana Kriterler	Alt Kriter No	Alt Kriterler	d(A1, A^-)	d(A2, A^-)	d(A3, A^-)
K1	Hat Özellikleri	AK11	Hat Uzunluğu	0,380	1,000	1,000
		AK12	Toplam Hat Uzunluğu	0,806	0,866	0,810
		AK13	Ray Tipi	0,820	0,634	0,673
		AK14	Demiryolu Hattı Eğm.	0,562	0,973	0,317
		AK15	Hat Topolojisi	0,902	0,495	0,743
		AK16	Köprü ve Tünel Sayısı	0,730	0,698	0,945
		AK17	Yol Şartları	0,678	0,934	0,588
		AK18	Malzeme Kalitesi	0,442	0,909	0,752
		AK19	Trafik Yoğunluğu	0,913	0,691	0,691
K2	Tren Özellikleri	AK21	Tren Sayısı	0,979	0,932	0,692
		AK22	Tren Tipi	0,923	0,892	0,635
		AK23	Tren Hızı	0,886	0,723	1,212
		AK24	Tren Kapasitesi	1,179	1,222	1,172
		AK25	Tren Bkm. & Onar. S.	1,037	0,669	0,990
		AK26	Tren Sefer Sıklığı	0,917	1,591	1,120
		AK27	Güvenilirlik	0,959	0,528	0,502
		AK28	Durak Mesafeleri	0,830	0,738	0,915
		AK29	Konfor	1,086	1,591	1,113
		AK30	Entegrasyon	0,614	1,088	0,493
K3	Yolcu Talebi	AK31	Yolcu Kapasitesi	1,255	2,588	3,020
		AK32	Headway Süresi	1,794	1,432	0,982
		AK33	Sezonluk Talep	1,173	1,051	1,833
		AK34	Yolcu Yoğunluğu	2,487	3,464	3,161
K4	Güvenlik	AK41	Güvenlik Standartları	1,098	2,661	1,955
		AK42	Sinyalizasyon ve Em.	1,033	1,188	1,693
		AK43	Demiryolu K. Sin. Sis.	3,186	2,638	3,043
K5	Çevresel Etkiler	AK51	Çevresel Faktörler	2,744	2,765	2,811
		AK52	Enerji Tüketimi ve V.	4,463	9,813	11,639
		AK53	Endüstriyel & Tic. F.	2,413	4,360	2,590
		AK54	Turistik Potansiyel	11,122	11,122	5,945
		AK55	Toplum ve Çevre	1,794	1,123	1,431
K6	Maliyetler	AK61	Elek. Kurulum Mal.	1,000	1,062	0,580
		AK62	İnşaat Maliyetleri	1,794	1,359	0,492
		AK63	Bakım ve İşletme M.	1,525	1,850	2,056
		AK65	Bakım Kolaylığı	1,084	1,505	1,012
		AK66	İşçilik Maliyetleri	1,483	1,502	1,483

4.4.2. Bulanık Topsis sonucu

Alternatiflerin ideal çözüme olan benzerlikleri hesaplanır. Bu, her alternatifin ideal çözüme olan uzaklığı ve anti-ideal çözüme olan uzaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Her kritere göre alternatiflerin (Ai(i=1,2,3,4,5)) bulanık negatif ideal çözüm (A^{-}) arasındaki uzaklık değeri (di^{-}) ve bulanık pozitif ideal çözüm (A*) arasındaki uzaklık değer (di*) bulunduktan sonra her alternatif için göreceli uzaklık değeri CCi, $di^{-}/(di^{-} + di^{*})$ formülü ile hesaplanır.

Tablo 4.15. Sonuç tablosu ve göreceli uzaklık değerleri

	A1	A2	A3
di*	30,042	40,793	37,115
di^{-}	57,092	68,656	61,089
$di^{*}+di^{-}$	87,133	109,449	98,204
CCi	0,655	0,627	0,622

$$CC1 = \frac{57,092}{30,042 + 57,092} = 0,655$$

$$CC2 = \frac{68,656}{40,793 + 68,656} = 0,627$$

$$CC3 = \frac{61,089}{37,115 + 61,089} = 0,622$$

Bu yakınlık katsayıları Tablo 4.15'te bulunan kabul koşullarına göre değerlendirecek olursa; göreceli uzaklık değeri 0,655 olan arasında olan Katener sistem en yüksek alternatif çıkmıştır. Diğer alternatifler ise 0,627 ve 0,622 değerleri ile sırasıyla .3. Ray ve Yerden Beslemeleri sistemlerdir.

4.5. Bulanık AHP ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi

Klasik AHP yönteminin karar vericilerin ihtiyaçlarını tam olarak karşılamaması ve karar vericilerin alternatifleri değerlendirirken subjektif olmaları, kesin yargılar vermeme eğiliminde olmaları nedeniyle, bu çalışmada demiryolu elektrik iletim yöntemi seçimi problemine yönelik olarak ilk aşamada bulanık AHP yönteminde karar kılınmıştır. İlk olarak, kriterler ve alternatifler, karar vericiler tarafından ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendirildi. Bu değerlendirmeler, firmadaki üç karar vericinin cevaplandırdığı sorular üzerinden anketler aracılığıyla gerçekleştirildi. Ankete katılan üç kişinin görüşleri doğrultusunda bulanık karar matrisi oluşturularak sübjektiflik önlenmeye çalışılmıştır. Karar vericilerin belirsiz ve bulanık tercihlerinin daha doğru modellenmesi için bulanık sayılar kullanılmıştır. Böylece, kesin yargılarda bulunulmayan durumlar dikkate alınarak güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık AHP, belirsizlik ortamında dahi objektif kriterlerle optimal tercihler yapılmasını sağlar. Sonuçta alternatifler arasındaki farklar net bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 4.16 Değerlendirmede kullanılan sözel değişkenlerin üçgen bulanık sayı cinsinden karşılıkları

Sözel Değişken	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
Eşit Derecede Önem (EDÖ)	(1 . 1 . 1)	(1/1 . 1/1 . 1/1)
Orta Derecede Önem (ODÖ)	(1 . 3 . 5)	(1/5 . 1/3 . 1/1)
Kuvvetli Derece Önem (KDÖ)	(3 . 5 . 7)	(1/7 . 1/5 . 1/3)
Çok Kuvvetli Derece Önem (ÇKDÖ)	(5 . 7 . 9)	(1/9 . 1/7 . 1/5)
Mutlak Derece Önem (MDÖ)	(7 . 9 . 9)	(1/9 . 1/9 . 1/7)

Sözel Değişken	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
Eşit Derecede Önem (EDÖ)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Orta Derecede Önem (ODÖ)	(1 . 3 . 5)	(0,2. 0,33 . 1)
Kuvvetli Derece Önem (KDÖ)	(3 . 5 . 7)	(0,14. 0,2 . 0,33)
Çok Kuvvetli Derece Önem (ÇKDÖ)	(5 . 7 . 9)	(0,11. 0,14 . 0,2)
Mutlak Derece Önem (MDÖ)	(7 . 9 . 9)	(0,11. 0,11 . 0,14)

4.5.1. Bulanık AHP yönetiminde ana kriterlerin değerlendirilmesi

Tablo 5.14'te ifade edilen şekilde sözel değişkenler ile ifade edilen ana kriterler katılımcıların yanıtları sonrası bu sözel değişkenlerin karşılığı olan bulanık sayılarla ifade edilmek üzere Tablo 4.17 oluşturulmuştur.

Tablo 4.17. Karar vericiler tarafından ana kriterlerin ikili karşılaştırılması

	Hat Özellikleri	Tren Özellikleri	Yolcu Talebi	Emniyet	Çevresel Etkiler	Maliyetler
Hat Özellikleri	(EDÖ)	(KDÖ)	(KDÖ)	(KDÖ)	(EDÖ)	(MDÖ)
Tren Özellikleri	$(KDÖ)^{-1}$	(EDÖ)	(ODÖ)	(MDÖ)	(ODÖ)	(EDÖ)
Yolcu Talebi	$(KDÖ)^{-1}$	$(ODÖ)^{-1}$	(EDÖ)	(MDÖ)	(ÇKDÖ)	$(KDÖ)^{-1}$
Güvenlik	$(KDÖ)^{-1}$	$(MDÖ)^{-1}$	$(MDÖ)^{-1}$	(EDÖ)	(EDÖ)	$(ODÖ)^{-1}$
Çevresel Etkiler	(EDÖ)	$(ODÖ)^{-1}$	$(MDÖ)^{-1}$	(EDÖ)	(EDÖ)	(MDÖ)
Maliyetler	$(MDÖ)^{-1}$	(EDÖ)	(KDÖ)	(ODÖ)	$(MDÖ)^{-1}$	(EDÖ)

Tablo 4.18. Karar vericiler tarafından ana kriterlerin üçgen bulanık sayıları

	Hat Özellikleri	Tren Özellikleri	Yolcu Talebi	Emniyet	Çevresel Etkiler	Maliyetler
Hat Özellikleri	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(3. 5 . 7)	(3. 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)
Tren Özellikleri	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(7 . 9 . 9)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)
Yolcu Talebi	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(5 . 7. 9)	(0,1 . 0,2 . 0,3)
Güvenlik	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(0,11 . 0,1 . 0,14)	(0,11 . 0,1 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Çevresel Etkiler	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,11 . 0,1 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)
Maliyetler	(0,11 . 0,11 . 0,1)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0,11 . 0,1 . 0,14)	(1 . 1 . 1)

En ideal demiryolu enerji iletim sisteminin belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada, öncelikle ana kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi gereklidir. Seçimde etkili olacak ana kriterlerin ağırlıkları, uzmanlar tarafından yapılan sözel değerlendirmeler doğrultusunda sunulmuştur.

İlk olarak, her bir ana kriter için bulanık sentetik mertebe değeri, Denklem 3.3.2 kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

S_{K1}= (18 . 26 . 32) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73) = (0,17 . 0,3 . 0,52)
S_{K2}= (11.14 . 17,2 . 21,33) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73) = (0,11 . 0,2 . 0,35)
S_{K3}=(13,49 . 17,73 . 20,67) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73)=(0,13 . 0,21 . 0,33)
S_{K4}= (2,57 . 2,76 . 3,62) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73) = (0,02 . 0,03 . 0,06)
S_{K5}= (10,31 . 12,48 . 13,2) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73) = (0,1 . 0,14 . 0,21)
S_{K6}= (6,22 . 10,22 . 14,29) ⊗ (1/105,1 . 1/86,39 . 1/61,73)=(0,06 . 0,12 . 0,23)

Bu hesaplamanın ardından her bir ana kriter için elde edilen S değerleri kullanılarak olabilirlik dereceleri belirlenmektedir. Bu dereceler, Denklem 3.3.7'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$V(S_{K1} \geq S_{K2}) = 1{,}00$ $V(S_{K2} \geq S_{K1}) = 0{,}63$ $V(S_{K3} \geq S_{K1}) = 0{,}63$
$V(S_{K1} \geq S_{K3}) = 1{,}00$ $V(S_{K2} \geq S_{K3}) = 0{,}97$ $V(S_{K3} \geq S_{K2}) = 1{,}00$
$V(S_{K1} \geq S_{K4}) = 1{,}00$ $V(S_{K2} \geq S_{K4}) = 1{,}00$ $V(S_{K3} \geq S_{K4}) = 1{,}00$
$V(S_{K1} \geq S_{K5}) = 1{,}00$ $V(S_{K2} \geq S_{K5}) = 1{,}00$ $V(S_{K3} \geq S_{K5}) = 1{,}00$
$V(S_{K1} \geq S_{K6}) = 1{,}00$ $V(S_{K2} \geq S_{K6}) = 1{,}00$ $V(S_{K3} \geq S_{K6}) = 1{,}00$

$V(S_{K4} \geq S_{K1}) = 0{,}00$ $V(S_{K5} \geq S_{K1}) = 0{,}21$ $V(S_{K6} \geq S_{K1}) = 0{,}25$
$V(S_{K4} \geq S_{K2}) = 0{,}00$ $V(S_{K5} \geq S_{K2}) = 0{,}66$ $V(S_{K6} \geq S_{K2}) = 0{,}61$
$V(S_{K4} \geq S_{K3}) = 0{,}00$ $V(S_{K5} \geq S_{K3}) = 0{,}58$ $V(S_{K6} \geq S_{K3}) = 0{,}54$
$V(S_{K4} \geq S_{K5}) = 0{,}00$ $V(S_{K5} \geq S_{K4}) = 1{,}00$ $V(S_{K6} \geq S_{K4}) = 1{,}00$
$V(S_{K4} \geq S_{K6}) = 0{,}00$ $V(S_{K5} \geq S_{K6}) = 1{,}00$ $V(S_{K6} \geq S_{K5}) = 0{,}84$

Ana kriterlerin öncelik değerleri, elde edilen değerler ve Eşitlik 3.3.8 kullanılarak hesaplanmış olup, aşağıdaki gibidir:

$d'(K_1)$ = min (1,00 . 1,00 . 1,00 . 1,00 . 1,00) = 1,00
$d'(K_2)$ = min (0,63 . 0,97 . 1,00 . 1,00 . 1,00) = 0,63
$d'(K_3)$ = min (0,63 . 1,00 . 1,00 . 1,00 . 1,00) = 0,63
$d'(K_4)$ = min (0,00 . 0,00 . 0,00 . 0,00 . 0,00) = 0,00
$d'(K_5)$ = min (0,21 . 0,66 . 0,58 . 1,00 . 1,00) = 0,21
$d'(K_6)$ = min (0,25 . 0,61 . 0,54 . 1,00 . 0,84) = 0,25

Elde edilen öncelik değerleri kullanılarak, Eşitlik 3.3.9 yardımıyla ağırlık vektörü hesaplanır.

$W' = (1 . 0{,}63 . 0{,}63 . 0 . 0{,}21 . 0{,}25)^T$

Ana kriterlerin önem ağırlıklarını belirlemek için yapılacak son işlem, normalize edilmiş ağırlık vektörlerinin Denklem 3.3.9 ile hesaplanmasıdır.

$W = (1 . 0{,}63 . 0{,}63 . 0 . 0{,}21 . 0{,}25))^T / 2{,}72 = (0{,}37 . 0{,}23 . 0{,}23 . 0 . 0{,}08 . 0{,}09)$

Elde edilen (0,37 . 0,23 . 0,23 . 0 . 0,08 . 0,09) değeri, ana kriterlerin seçim sürecinde ne derece önemli olduğunu göstermektedir. Bu değerlere bakıldığında, karar verme sürecinde en etkili ana kriterin K1, yani hat özellikleri olduğu görülmektedir. Bunu, önem sırasına göre K2, K2, K6, K5 ve K4 takip etmektedir.

4.5.2. Alt kriterlerin değerlendirilmesi

Bu yaklaşımda, alt kriterlerin ağırlıkları bulanık mantık kullanılarak belirlenir. Böylece, karmaşık ve belirsiz ortamlarda daha esnek ve gerçekçi kararlar alınabilir ve karar verme süreçlerinde belirsizliklerin etkisi minimize edilir.

4.5.2.1. Bulanık AHP yönteminde hat özellikleri alt kriterinin değerlendirilmesi

Hat özelliklerinin değerlendirilmesinde karar vericilerle birlikte tanımlanan alt kriterler değerlendirilir. Her bir alt kriter için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri 4.19 tablosu yardımıyla aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$S_{AK1.1}=(17{,}34 . 27{,}53 . 36{,}33)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}08 . 0{,}15 . 0{,}27)$
$S_{AK1.2}=(17{,}34 . 21{,}53 . 24{,}33)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}08 . 0{,}11 . 0{,}18)$
$S_{AK1.3}=(22{,}14 . 30{,}2 . 34{,}33)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}1 . 0{,}16 . 0{,}25)$
$S_{AK1.4}=(2{,}9 . 3{,}09 . 4{,}05)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}01 . 0{,}02 . 0{,}03)$
$S_{AK1.5}=(12{,}37 . 18{,}45 . 22{,}68)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}05 . 0{,}1 . 0{,}17)$
$S_{AK1.6}=(12{,}42 . 18{,}59 . 25{,}34)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}05 . 0{,}1 . 0{,}19)$
$S_{AK1.7}=(14{,}2 . 20{,}33 . 27)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}06 . 0{,}11 . 0{,}2)$
$S_{AK1.8}=(22{,}51 . 30{,}78 . 36{,}14)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}1 . 0{,}16 . 0{,}27)$
$S_{AK1.9}=(13{,}57 . 17{,}82 . 20{,}73)\otimes(1/230{,}94 . 1/188{,}33 . 1/134{,}79)=(0{,}06 . 0{,}09 . 0{,}15)$

Ağırlık vektörü:

$W' = (0{,}91 \,.\, 0{,}63 \,.\, 0{,}98 \,.\, 0 \,.\, 0{,}52 \,.\, 0{,}58 \,.\, 0{,}65 \,.\, 1 \,.\, 0{,}45)^T$

$W = (0{,}91 \,.\, 0{,}63 \,.\, 0{,}98 \,.\, 0 \,.\, 0{,}52 \,.\, 0{,}58 \,.\, 0{,}65 \,.\, 1 \,.\, 0{,}45)^T / 5{,}72$

$=(0{,}16 \,.\, 0{,}11 \,.\, 0{,}17 \,.\, 0 \,.\, 0{,}09 \,.\, 0{,}1 \,.\, 0{,}11 \,.\, 0{,}17 \,.\, 0{,}08)$

Şeklinde hesaplanmıştır. Elde edilen (0,16 . 0,11 . 0,17 . 0 . 0,09 . 0,1 . 0,11 . 0,17 . 0,08) değerlere bakıldığında en uygun alt kriter AK1.3 ray tipi ve AK1.8 malzeme kalitesi olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla AK1.1, AK1.7, AK1.2, AK1.6, AK1.5 ve AK1.4, alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.19 Hat Özellikleri alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Hat Uzunluğu	**Toplam Hat Uzunluğu**	**Ray Tipi**	**Demiryolu Hattı Eğimi**	**Hat Topolojisi**	**Köprü ve Tünel Sayısı**	**Yol Şartları**	**Malzeme Kalitesi**	**Trafik Yoğunluğu**
Hat Uzunluğu	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(7 . 9 . 9)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Toplam Hat Uzunluğu	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(5 . 7 . 9)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Ray Tipi	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
Demiryolu Hattı Eğimi	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,11 . 0,11 . 0,14)
Hat Topolojisi	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 3 . 5)
Köprü ve Tünel Sayısı	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(5 . 7 . 9)
Yol Şartları	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)
Malzeme Kalitesi	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(7 . 9 . 9)	(0,2 . 0,33 . 1)	(7 . 9 . 9)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)
Trafik Yoğunluğu	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(7 . 9 . 9)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 1 . 1)

4.5.2.2. Bulanık AHP yönteminde tren özellikleri kriterinin değerlendirilmesi

Tren özelliklerinin her bir alt kriter için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri aşağıdaki gibidir, sonuçlar 4.20 tablosunda gösterilmiştir.

$S_{AK2.1}=(15{,}49 \,.\, 21{,}73 \,.\, 26{,}67)\otimes(1/304{,}19 \,.\, 1/232{,}91 \,.\, 1/156{,}51)=(0{,}05 \,.\, 0{,}09 \,.\, 0{,}17)$

$S_{AK2.2}=(25{,}49 \,.\, 37{,}73 \,.\, 46{,}67)\otimes(1/304{,}19 \,.\, 1/232{,}91 \,.\, 1/156{,}51)=(0{,}08 \,.\, 0{,}16 \,.\, 0{,}3)$

$S_{AK2.3}=(9{,}89 \,.\, 16{,}4 \,.\, 24{,}67)\otimes(1/304{,}19 \,.\, 1/232{,}91 \,.\, 1/156{,}51)=(0{,}03 \,.\, 0{,}07 \,.\, 0{,}16)$

$S_{AK2.4}$=(16,51 . 22,62 . 26,95)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,05 . 0,1 . 0,17)

$S_{AK2.5}$=(19,4 . 27,51 . 33,81)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,06 . 0,12 . 0,22)

$S_{AK2.6}$=(9,62 . 11,83 . 14,27)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,03 . 0,05 . 0,09)

$S_{AK2.7}$=(19,54 . 27,87 . 37,33)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,06 . 0,12 . 0,24)

$S_{AK2.8}$=(13,45 . 23,64 . 34,48)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,04 . 0,1 . 0,22)

$S_{AK2.9}$=(10,57 . 16,76 . 23,62)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,03 . 0,07 . 0,15)

$S_{AK2.10}$=(16,57 . 26,82 . 35,73)⊗(1/304,19 . 1/232,91 . 1/156,51)=(0,05 .0,12 .0,23)

Ağırlık vektörü:

$W' = (0{,}56 . 1 . 0{,}45 . 0{,}58 . 0{,}75 . 0{,}06 . 0{,}79 . 0{,}69 . 0{,}43 . 0{,}76)^T$

$W = (0{,}56 . 1 . 0{,}45 . 0{,}58 . 0{,}75 . 0{,}06 . 0{,}79 . 0{,}69 . 0{,}43 . 0{,}76)^T / 6{,}05$

= (0,09 . 0,17 . 0,07 . 0,1 . 0,12 . 0,01 . 0,13 . 0,11 . 0,07 . 0,12)

olarak hesaplanmaktadır. Bu değerlere göre tren özellikleri için en uygun alt kriter AK2.2 Tren Tipi çıkmıştır. Bunu sırasıyla AK2.7, AK2.5, AK2.10, AK2.8, AK2.4, AK2.1, AK2.3, AK2.9 ve AK2.6 alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.20. Tren Özellikleri alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Tren Sayısı	Tren Tipi	Tren Hızı	Tren Kapasitesi	Tren Bakım ve Onarım Süreleri	Tren Sefer Sıklığı	Güvenilirlik	Durak Mesafeleri	Konfor	Entegrasyon
Tren Sayısı	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(7 . 9 . 9)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,14 .0,2 . 0,33)
Tren Tipi	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
Tren Hızı	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)
Tren Kapasitesi	(0,11.0,11 . 0,14)	(0,11.0,11 . 0,14)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)	(0,14 .0,2 . 0,33)
Tren Bakım ve Onarım Süreleri	(3 . 5 . 7)	(3 . 5 . 7)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)	(0,11.0,11 .0,14)
Tren Sefer Sıklığı	(1 . 1 . 1)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(0,11.0,14 . 0,2)	(0,11.0,14 . 0,2)	(0,11.0,14 . 0,2)	(5 . 7 . 9)
Güvenilirlik	(1 . 1 . 1)	(0,2 .0,33 . 1)	(3 . 5 . 7)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(3 . 5 . 7)	(5 . 7 . 9)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)
Durak Mesafeleri	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 3 . 5)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(5 . 7 . 9)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(0,2 . 0,33 . 1)
Konfor	(1 . 3 . 5)	(0,11.0,11 . 0,14)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,11.0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Entegrasyon	(3 . 5 . 7)	(0,14 .0,2 . 0,33)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

4.5.2.3. Bulanık AHP yönteminde yolcu talebi kriterinin değerlendirilmesi

Yolcu talebinde her bir alt kriter için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri aşağıdaki gibidir, sonuçlar 4.21 tablosunda gösterilmiştir.

$S_{AK3.1}$= (10 . 14 . 18) ⊗ (1/41,01 . 1/34,65 . 1/26,51) = (0,24 . 0,4 . 0,68)
$S_{AK3.2}$= (9,14 . 11,2 . 11,33) ⊗ (1/41,01 . 1/34,65 . 1/26,51) = (0,22 . 0,32 . 0,43)
$S_{AK3.3}$= (6 . 8 . 10) ⊗ (1/41,01 . 1/34,65 . 1/26,51) = (0,15 . 0,23 . 0,38)
$S_{AK3.4}$= (1,37 . 1,45 . 1,68) ⊗ (1/41,01 . 1/34,65 . 1/26,51) = (0,03 . 0,04 . 0,06)

Ağırlık vektörü:

$W' = (1 . 0,69 . 0,44 . 0)^T$
$W = (1 . 0,69 . 0,44 . 0)^T /2,13 = (0,47 . 0,33 . 0,2 . 0)$olarak hesaplanmaktadır. Bu değerlere göre yolcu talebi için en uygun alt kriter AK3.1 Yolcu kapasitesi çıkmıştır. Bunu sırasıyla AK3.2, AK3.3 ve AK3.4 alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.21. Yolcu Talebi alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Yolcu Kapasitesi	Yolcu Kapasitesi	Sezonluk Talep	Yolcu Yoğunluğu
Yolcu Kapasitesi	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)
Yolcu Kapasitesi	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)
Sezonluk Talep	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yolcu Yoğunluğu	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)

4.5.2.4. Bulanık AHP yönteminde emniyet kriterinin değerlendirilmesi

Emniyet kriterinin her bir alt kriteri için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri aşağıdaki gibidir, sonuçlar 4.22 tablosunda gösterilmiştir.

$S_{AK4.1}$= (5 . 9 . 13) ⊗ (1/18,33 . 1/13,53 . 1/9,34) = (0,27 . 0,67 . 1,39)
$S_{AK4.2}$= (2,2 . 2,33 . 3) ⊗ (1/18,33 . 1/13,53 . 1/9,34) = (0,12 . 0,17 . 0,32)
$S_{AK4.3}$= (2,14 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/18,33 . 1/13,53 . 1/9,34) = (0,12 . 0,16 . 0,25)

Ağırlık vektörü:

$W' = (1 . 0,09 . 0)^T$
$W = (1 . 0,09 . 0)^T /1,09 = (0,92 . 0,08 . 0)$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değerlere göre emniyet kriterleri için en uygun alt kriter AK4.1 emniyet standartları çıkmıştır. Bunu sırasıyla AK4.2 ve AK4.3 alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.22. Emniyet alt kriterlerinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Emniyet Standartları	Sinyalizasyon ve Emniyet	Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi
Emniyet Standartları	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)
Sinyalizasyon ve Emniyet	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

4.5.2.5. Bulanık AHP yönteminde çevresel etkiler kriterinin değerlendirilmesi

Çevresel etkiler her bir alt kriter için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri aşağıdaki gibidir, sonuçlar 4.23 tablosunda gösterilmiştir.

$S_{AK5.1}$= (12,14 . 18,2 . 22,33) ⊗ (1/68,68 . 1/52,72 . 1/36,19) = (0,18 . 0,35 . 0,62)

$S_{AK5.2}$= (10,14 . 14,2 . 18,33) ⊗ (1/68,68 . 1/52,72 . 1/36,19) = (0,15 . 0,27 . 0,51)

$S_{AK5.3}$= (3,34 . 3,53 . 4,33) ⊗ (1/68,68 . 1/52,72 . 1/36,19) = (0,05 . 0,07 . 0,12)

$S_{AK5.4}$ = (3,22 . 5,25 . 7,34) ⊗ (1/68,68 . 1/52,72 . 1/36,19) = (0,05 . 0,1 . 0,2)

$S_{AK5.5}$= (7,34 . 11,53 . 16,33) ⊗ (1/68,68 . 1/52,72 . 1/36,19) = (0,11 . 0,22 . 0,45)

Ağırlık vektörü:

$W' = (1 . 0{,}81 . 0 . 0{,}1 . 0)^T$

$W = (1 . 0{,}81 . 0 . 0{,}1 . 0)^T / 1{,}91 = (0{,}52 . 0{,}43 . 0 . 0{,}05 . 0)$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değerlere göre çevresel etkiler için en uygun alt kriter AK5.1 çevresel faktörler çıkmıştır. Bunu sırasıyla AK5.2 , AK5.4 , AK5.3 ve AK5.5 alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.23. Çevresel etkiler alt kriterinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Çevresel Faktörler	Enerji Tüketimi ve Verimlilik	Endüstriyel ve Tic. Faaliyetler	Turistik Potansiyel	Toplum ve Çevre
Çevresel Faktörler	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(7 . 9 . 9)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Enerji Tüketimi ve Verimlilik	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)	(3 . 5 . 7)
Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Turistik Potansiyel	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Toplum ve Çevre	(3 . 5 . 7)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(3 . 5 . 7)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

4.5.2.6. Bulanık AHP yönteminde maliyet kriterinin değerlendirilmesi

Maliyet her bir alt kriteri için Bulanık Sentetik Mertebe değerleri aşağıdaki gibidir, sonuçlar 4.24 tablosunda gösterilmiştir.

$S_{AK6.1}$= (12,14 . 18,2 . 22,33) ⊗ (1/65,15 . 1/53,43 . 1/39,02) = (0,19 . 0,34 . 0,57)
$S_{AK6.2}$= (3,4 . 3,67 . 5) ⊗ (1/65,15 . 1/53,43 . 1/39,02) = (0,05 . 0,07 . 0,13)
$S_{AK6.3}$= (8,14 . 10,2 . 12,33) ⊗ (1/65,15 . 1/53,43 . 1/39,02) = (0,12 . 0,19 . 0,32)
$S_{AK6.4}$= (3,22 . 3,22 . 3,29) ⊗ (1/65,15 . 1/53,43 . 1/39,02) = (0,05 . 0,06 . 0,08)
$S_{AK6.5}$= (12,11 . 18,14 . 22,2) ⊗ (1/65,15 . 1/53,43 . 1/39,02) = (0,19 . 0,34 . 0,57)

Ağırlık vektörü:

$W' = (1 . 0 . 0,46 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0,46 . 0 . 0)^T /1,46 = (0,68 . 0 . 0,32 . 0 . 0)$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değerlere göre maliyet için en uygun alt kriter AK6.1 çevresel faktörler çıkmıştır. Bunu sırasıyla AK6.3 , AK6.2 , AK6.4 ve AK6.5 alternatifleri izlemektedir.

Tablo 4.24. Maliyet kriterinin alt kriterinin karar vericiler tarafından üçgen bulanık sayılarla ifadesi

	Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti	İnşaat Maliyetleri	Bakım ve İşletme Maliyetleri	Bakım Kolaylığı	İşçilik Maliyetleri
Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
İnşaat Maliyetleri	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Bakım ve İşletme Maliyetleri	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(5 . 7 . 9)
Bakım Kolaylığı	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)
İşçilik Maliyetleri	(3 . 5 . 7)	(1 . 3 . 5)	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)

4.5.3. Alt kriterlere göre alternatiflerin değerlendirilmesi

Alt kriterine göre alternatiflerin bulanık ikili karşılaştırma matrisi Chang'in genişletilmiş analiz tekniği ve Liou ve Wang'ın toplam integral tekniği metodu ayrı ayrı uygulanmıştır. Karar vericilerin her kriter altında üç enerji iletim yöntemi alternatifini değerlendirmeleri ele alınmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, her iki yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, enerji iletim yöntemlerinin en uygun olanı belirlenmiştir.

4.5.3.1. Hat özellikleri ölçütü alt kriterlerinin alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

Hat Özellikleri ana kriterinin ilk alt kriteri olan Hat Uzunluğu alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.25'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)
S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)
S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0,6 . 0,01)^T$
$W = (1 . 0,6 . 0,01)^T / 1,61 = (0,62 . 0,37 . 0,01)$

Tablo 4.25: Hat Uzunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Hat Uzunluğu (AK11)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin ikinci alt kriteri olan Toplam hat uzunluğu alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.26'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)
S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0 \,.\, 1 \,.\, 0{,}6)^T$

$W = (0 \,.\, 1 \,.\, 0{,}6)^T / 1{,}6 = (0 \,.\, 0{,}63 \,.\, 0{,}38)$

Tablo 4.26: Toplam Hat Uzunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Toplam Hat Uzunluğu(AK12)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Ray tipi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.27'de gösterilmektedir.

$S_{A1}=(2{,}15 \,.\, 2{,}2 \,.\, 2{,}33) \otimes (1/11{,}29 \,.\, 1/15{,}4 \,.\, 1/19{,}67) = (0{,}19 \,.\, 0{,}14 \,.\, 0{,}12)$

$S_{A2}=(7 \,.\, 11 \,.\, 15) \otimes (1/11{,}29 \,.\, 1/15{,}4 \,.\, 1/19{,}67) = (0{,}62 \,.\, 0{,}71 \,.\, 0{,}76)$

$S_{A3}=(2{,}15 \,.\, 2{,}2 \,.\, 2{,}33) \otimes (1/11{,}29 \,.\, 1/15{,}4 \,.\, 1/19{,}67) = (0{,}19 \,.\, 0{,}14 \,.\, 0{,}12)$

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0 \,.\, 1 \,.\, 0)^T$

$W = (0 \,.\, 1 \,.\, 0)^T / 1{,}6 = (0 \,.\, 1 \,.\, 0)$

Tablo 4.27: Ray Tipi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Ray Tipi(AK13)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin dördüncü alt kriteri olan Demiryolu hattı eğimi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.28'da gösterilmektedir.

$S_{A1}=(11 \,.\, 15 \,.\, 17) \otimes (1/15{,}25 \,.\, 1/19{,}31 \,.\, 1/21{,}48) = (0{,}72 \,.\, 0{,}78 \,.\, 0{,}79)$

$S_{A2}=(2{,}12 \,.\, 2{,}11 \,.\, 2{,}14) \otimes (1/15{,}25 \,.\, 1/19{,}31 \,.\, 1/21{,}48) = (0{,}14 \,.\, 0{,}11 \,.\, 0{,}1)$

$S_{A3}=(2{,}15 \,.\, 2{,}2 \,.\, 2{,}33) \otimes (1/15{,}25 \,.\, 1/19{,}31 \,.\, 1/21{,}48) = (0{,}14 \,.\, 0{,}11 \,.\, 0{,}11)$

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 \,.\, 0 \,.\, 0)^T$

$W = (1 \,.\, 0 \,.\, 0)^T / 1 = (1 \,.\, 0 \,.\, 0)$

Tablo 4.28: Demiryolu Hattı Eğimi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Demiryolu Hattı Eğimi(AK14)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
3. Ray	(0,11 . 0,11. 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin beşinci alt kriteri Hat topolojisi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırma sonucu değerlendirme Tablo 4.29'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,67 . 0,67 . 0,63)

S_{A2}=(1,29 . 1,4 . 1,67) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,08 . 0,06 . 0,06)

S_{A3}=(4,12 . 6,11 . 8,14) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,25 . 0,27 . 0,3)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$

$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.29: Hat Topolojisi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Hat topolojisi (AK15)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)
3. Ray	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11. 0,14)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin altıncı alt kriteri Köprü ve tünel sayısı alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırma sonucu elde edilen değerler Tablo 4.30'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(13 . 17 . 19) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,75 . 0,8 . 0,81)

S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,12 . 0,1 . 0,09)

S_{A3}=(2,12 . 2,14 . 2,2) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,12 . 0,1 . 0,09)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$

$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.30: Köprü ve Tünel Sayısı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Köprü ve tünel sayısı (AK16)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(0,11 . 0,11. 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14. 0,2)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin yedinci alt kriteri olan Yol şartları alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.31'de gösterilmektedir.

S_{A1}=(3 . 5 . 7) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/87,97) = (0,41 . 0,43 . 0,08)
S_{A2}=(2,2 . 2,33 . 3) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/87,97) = (0,3 . 0,2 . 0,03)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/87,97) = (0,3 . 0,37 . 0,08)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0,86)^T$
$W = (1 . 0 . 0,86)^T / 1,8571 = (0,54 . 0 . 0,46)$

Tablo 4.31: Yol Şartları Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Yol şartları (AK17)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
3. Ray	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin sekizinci alt kriteri olan Malzeme kalitesi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.32'de gösterilmektedir.

S_{A1}=(9 . 11 . 11) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,68 . 0,63 . 0,55)
S_{A2}=(2,12 . 4,11 . 6,14) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,16 . 0,24 . 0,3)
S_{A3}=(2,2 . 2,33 . 3) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,17 . 0,13 . 0,15)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (0 . 0 . 0)$

Tablo 4.32: Malzeme Kalitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Malzeme kalitesi (AK18)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Hat Özellikleri ana kriterinin dokuzuncu alt kriteri olan Trafik yoğunluğu alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.33'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(8,12 . 10,11 . 10,14) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,44 . 0,41 . 0,37)

S_{A2}=(9 . 13 . 15) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,49 . 0,53 . 0,55)

S_{A3}=(1,32 . 1,44 . 2,14) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,07 . 0,06 . 0,08)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0{,}28 . 1 . 0)^T$

$W = (0{,}28 . 1 . 0)^T / 1{,}2834 = (0{,}22 . 0{,}78 . 0)$

Tablo 4.33: Trafik Yoğunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Trafik yoğunluğu (AK19)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(7 . 9 . 9)
3. Ray	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

4.5.3.2. Tren özellikleri ölçütü alt kriterlerinin alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

Tren Özellikleri ana kriterinin ilk alt kriteri olan Tren Sayısı alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.34'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)

S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)

S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0{,}6 . 0{,}01)^T$

$W = (1 . 0{,}6 . 0{,}01)^T / 1{,}61 = (0{,}62 . 0{,}37 . 0{,}01)$

Tablo 4.34: Tren Sayısı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Sayısı (AK21)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin ikinci alt kriteri olan Tren Tipi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.35'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)
S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (0 . 0,23 . 0,6) ^{T}
W = (0 . 0,23 . 0,6) ^{T} / 0,83 = (0 . 0,28 . 0,72)

Tablo 4.35: Tren Tipi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Tipi (AK22)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Tren Hızı alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.36'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)
S_{A2}=(7 . 11 . 15) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,62 . 0,71 . 0,76)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (0 . 1 . 0) ^{T}
W = (0 . 1 . 0) ^{T} / 1 = (0 . 1 . 0)

Tablo 4.36: Tren Hızı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Hızı (AK23)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin dördüncü alt kriteri olan Tren Kapasitesi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.37'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,72 . 0,78 . 0,79)
S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,1)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,11)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.37: Tren Kapasitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Kapasitesi (AK24)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin beşinci alt kriteri olan Tren Bakım ve Onarım Süresi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.38'de gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,67 . 0,67 . 0,63)
S_{A2}=(1,29 . 1,4 . 1,67) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,08 . 0,06 . 0,06)
S_{A3}=(4,12 . 6,11 . 8,14) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,25 . 0,27 . 0,3)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.38: Tren Bakım ve Onarım Süresi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Bakım ve Onarım Süresi (AK25)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)
3. Ray	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin altıncı alt kriteri olan Tren Sefer Sıklığı alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.39'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(13 . 17 . 19) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,75 . 0,8 . 0,81)
S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,12 . 0,1 . 0,09)
S_{A3}=(2,12 . 2,14 . 2,2) ⊗ (1/17,22 . 1/21,25 . 1/23,34) = (0,12 . 0,1 . 0,09)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.39: Tren Sıklığı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Tren Sefer Sıklığı (AK26)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin yedinci alt kriteri olan Güvenilirlik alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.40'ta gösterilmektedir.

S_{A1}=(3 . 5 . 7) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/17) = (0,41 . 0,43 . 0,41)
S_{A2}=(2,2 . 2,33 . 3) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/17) = (0,3 . 0,2 . 0,18)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/7,4 . 1/11,67 . 1/17) = (0,3 . 0,37 . 0,41)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0,86)^T$
$W = (1 . 0 . 0,86)^T / 1,857 = (0,54 . 0 . 0,46)$

Tablo 4.40: Güvenilirlik Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Güvenilirlik (AK27)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
3. Ray	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin sekizinci alt kriteri olan Durak Mesafeleri alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.41'de gösterilmektedir.

S_{A1}=(9 . 11 . 11) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,68 . 0,63 . 0,55)
S_{A2}=(2,12 . 4,11 . 6,14) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,16 . 0,24 . 0,3)
S_{A3}=(2,2 . 2,33 . 3) ⊗ (1/13,31 . 1/17,44 . 1/20,14) = (0,17 . 0,13 . 0,15)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1 . 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.41: Durak Mesafeleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Durak Mesafeleri (AK28)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Tren Özellikleri ana kriterinin onuncu alt kriteri olan Entegrasyon alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.42'da gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,12 . 4,11 . 6,14) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,11 . 0,17 . 0,23)
S_{A2}=(8,12 . 10,11 . 10,14) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,44 . 0,41 . 0,37)
S_{A3}=(8,2 . 10,33 . 11) ⊗ (1/18,42 . 1/24,56 . 1/27,29) = (0,45 . 0,42 . 0,4)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0 . 0 . 1)^T$
$W = (0 . 0 . 1)^T / 1 = (0 . 0 . 1)$

Tablo 4.42: Entegrasyon Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Entegrasyon (AK210)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 3 . 5)
3. Ray	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)	(0,11 . 0,11 . 0,14)
Yerden Beslemeli S.	(0,2 . 0,33 . 1)	(7 . 9 . 9)	(1 . 1 . 1)

4.5.3.3. Yolcu talebi ölçütü alt kriterlerinin alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

Yolcu Talebi Özellikleri ana kriterinin ilk alt kriteri Yolcu Kapasitesi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu değerlendirme Tablo 4.43'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)
S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)
S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (1. 0,6 . 0,01) ^{T}
W = (1 . 0,6 . 0,01) ^{T} / 1,618 = (0,62 . 0,37 . 0,01)

Tablo 4.43: Yolcu Kapasitesi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Yolcu Kapasitesi (AK31)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5. 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14 . 0,2)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Yolcu Talebi Özellikleri ana kriterinin ikinci alt kriteri Headway Süresi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu değerlendirme Tablo 4.44'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)
S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (0. 0,23 . 0,6) ^{T}
W = (0 . 0,23 . 0,6) ^{T} / 0,8307 = (0 . 0,28 . 0,72)

Tablo 4.44: Headway Süresi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Headway Süresi(AK32)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Yolcu Talebi Özellikleri ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Sezonluk Talep alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.45'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)
S_{A2}=(7 . 11 . 15) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,62 . 0,71 . 0,76)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0. 1 . 0)^T$
$W = (0 . 1 . 0)^T / 1 = (0 . 1 . 0)$

Tablo 4.45: Sezonluk Talep Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Sezonluk Talep(AK33)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,20 . 0,33)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,20 . 0,33)	(1 . 1 . 1)

Yolcu Talebi Özellikleri ana kriterinin dördüncü alt kriteri olan Yolcu Yoğunluğu alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.46'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,72 . 0,78 . 0,79)
S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,1)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,11)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0 . 0)^T$
$W = (1 . 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.46: Yolcu Yoğunluğu Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Yolcu Yoğunluğu(AK34)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,14 . 0,20 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

4.5.3.4. Emniyet ölçütü alt kriterlerinin alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

Emniyet ölçütü alt kriterleri için alternatiflerin değerlendirme sonuçlarının birleştirilmiş şekli aşağıdaki başlılarda görüldüğü gibidir. Bu tablodaki verilerden yararlanarak Emniyet ölçütü alt kriterleri altında üç alternatife ilişkin sentez değerleri eşitlik yardımıyla şu şekilde hesaplanır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen sentez değerleri, her bir alternatifin emniyet kriteri altında ne kadar uygun olduğunu ortaya koyar. Değerlendirilen alternatiflerin emniyet performansları karşılaştırılarak, karar vericiler en güvenli enerji iletim yöntemini seçebilirler. Sonuçlar, emniyetin enerji iletim yöntemlerinin seçimindeki önemini vurgular ve bu kriterin karar verme sürecine etkisini gösterir.

Emniyet ana kriterinin ilk alt kriteri olan Emniyet Standartları alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.47'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) $\otimes$ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)
S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) $\otimes$ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)
S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) $\otimes$ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0{,}62.\ 0{,}37\ .\ 0{,}01)^T$
$W = (0{,}62.\ 0{,}37\ .\ 0{,}01)^T / 1{,}6187 = (0{,}62\ .\ 0{,}37\ .\ 0{,}01)$

Tablo 4.47: Emniyet Standartları Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Emniyet Standartları (AK41)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Emniyet ana kriterinin ikinci alt kriteri olan Sinyalizasyon ve Emniyet alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.48'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) $\otimes$ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)

S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)

S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (0. 0,23 . 0,6) ^{T}

W = (0. 0,23 . 0,6) ^{T} / 0,8307 = (0 . 0,28 . 0,72)

Tablo 4.48: Sinyalizasyon ve Emniyet Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Sinyalizasyon ve Emniyet(AK42)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Emniyet ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.49'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

S_{A2}=(7 . 11 . 15) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,62 . 0,71 . 0,76)

S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

Buradan ağırlık vektörü;

W' = (0. 1 . 0) ^{T}

W = (0. 1 . 0) ^{T} / 1 = (0 . 1 . 0)

Tablo 4.49: Demiryolu Kullanılan Sinyalizasyon Sistemi Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Demiryolu Kullanılan Sin. Sistemi(AK43)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 33)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 33)	(1 . 1 . 1)

4.5.3.5. Çevresel faktörler ölçütü alt kriterlerinin alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi

Çevresel faktörler ölçütü alt kriterleri için alternatiflerin değerlendirme sonuçlarının birleştirilmiş şekli aşağıdaki başlıklar altında görüldüğü gibidir.

Tabloda verilerden yararlanarak çevresel faktörler ölçütü alt kriterleri altında üç alternatife ilişkin sentez değerleri, belirli bir eşitlik yardımıyla şu şekilde hesaplanır.

Çevresel Etkiler ana kriterinin ilk alt kriteri Çevresel Faktörler alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu değerlendirme Tablo 4.50'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)

S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)

S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1.\ 0{,}6\ .\ 0{,}01)^T$

$W = (1.\ 0{,}6\ .\ 0{,}01)^T / 1{,}6187 = (0{,}62\ .\ 0{,}37\ .\ 0{,}01)$

Tablo 4.50: Çevresel Faktörler Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Çevresel Faktörler(AK51)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,14 . 2)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Çevresel Etkiler ana kriterinin ikinci alt kriteri olan Enerji Tüketimi ve Verimlilik alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.51'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)

S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)

S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0.\ 0{,}23\ .\ 0{,}6)^T$

$W = (0.\ 0{,}23\ .\ 0{,}6)^T / 0{,}8307 = (0\ .\ 0{,}28\ .\ 0{,}72)$

Tablo 4.51: Enerji Tüketimi ve Verimlilik Alt Kriteri İçin Alternatif Sonuçları

Enerji Tüketimi ve Verimlilik(AK52)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Çevresel Etkiler ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.52'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

S_{A2}=(7 . 11 . 15) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,62 . 0,71 . 0,76)

S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0. 1 . 0)^T$

$W = (0. 1 . 0)^T / 1 = (0 . 1 . 0)$

Tablo 4.52: Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Endüstriyel ve Ticari Faaliyetler(AK53)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)

Çevresel Etkiler ana kriterinin dördüncü alt kriteri olan Turistik Potansiyel alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.53'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,72 . 0,78 . 0,79)

S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,1)

S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,11)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0 . 0)^T$

$W = (1. 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.53: Turistik Potansiyel Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Turistik Potansiyel(AK54)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Çevresel Etkiler ana kriterinin beşinci alt kriteri olan Toplum ve Çevre alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.54'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,67 . 0,67 . 0,63)
S_{A2}=(1,29 . 1,4 . 1,67) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,08 . 0,06 . 0,06)
S_{A3}=(4,12 . 6,11 . 8,14) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,25 . 0,27 . 0,3)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0 . 0)^T$
$W = (1. 0 . 0)^T / 1 = (1 . 0 . 0)$

Tablo 4.54: Toplum ve Çevre Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Toplum ve Çevre(AK55)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)
3. Ray	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)

4.5.3.6. Maliyetler alt kriterlerinin alternatiflerin karşılaştırma matrisi

Maliyetler ana kriterinin ilk alt kriteri Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu değerlendirme Tablo 4.55'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(6,15 . 8,2 . 10,33) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,49 . 0,44 . 0,4)
S_{A2}=(4,2 . 6,33 . 9) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,34 . 0,34 . 0,35)
S_{A3}=(2,12 . 4,14 . 6,2) ⊗ (1/12,45 . 1/18,68 . 1/25,53) = (0,17 . 0,22 . 0,24)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0,6 . 0,01)^T$
$W = (1. 0,6 . 0,01)^T / 1,6187 = (0,62 . 0,37 . 0,01)$

Tablo 4.55: Elektrifikasyon Kurulum Maliyeti Alt Kriteri Alternatif Sonuçları

Elektrifik. Kur. M.(AK61)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,33)	(5 . 7 . 9)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)

Maliyetler ana kriterinin ikinci alt kriteri olan İnşaat Maliyetleri alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.56'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(1,4 . 1,67 . 3) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,21 . 0,13 . 0,14)
S_{A2}=(3 . 7 . 11) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,45 . 0,54 . 0,52)
S_{A3}=(2,2 . 4,33 . 7) ⊗ (1/6,6 . 1/13 . 1/21) = (0,33 . 0,33 . 0,33)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0.\ 0{,}23\ .\ 0{,}6)^T$
$W = (0.\ 0{,}23\ .\ 0{,}6)^T / 0{,}8307 = (0.\ 0{,}28\ .\ 0{,}72)$

Tablo 4.56: İnşaat Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

İnşaat Maliyetleri(AK62)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)	(0,2 . 0,33 . 1)
3. Ray	(1 . 3 . 5)	(1 . 1 . 1)	(1 . 3 . 5)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 3 . 5)	(0,2 . 0,33 . 1)	(1 . 1 . 1)

Maliyetler ana kriterinin üçüncü alt kriteri olan Bakım ve İşletme Maliyetleri alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.57'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)
S_{A2}=(7 . 11 . 15) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,62 . 0,71 . 0,76)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/11,29 . 1/15,4 . 1/19,67) = (0,19 . 0,14 . 0,12)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (0.\ 1\ .\ 0)^T$
$W = (0.\ 1\ .\ 0)^T / 1 = (0.\ 1\ .\ 0)$

Tablo 4.57: Bakım ve İşletme Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Bakım ve İşletme Maliyetleri(AK63)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,3)	(1 . 3 . 5)
3. Ray	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)
Yerden Beslemeli S.	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,3)	(1 . 1 . 1)

Maliyetler ana kriterinin dördüncü alt kriteri olan Bakım Kolaylığı alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.58'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,72 . 0,78 . 0,79)
S_{A2}=(2,12 . 2,11 . 2,14) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,1)
S_{A3}=(2,15 . 2,2 . 2,33) ⊗ (1/15,25 . 1/19,31 . 1/21,48) = (0,14 . 0,11 . 0,11)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0 . 0)^T$
$W = (1. 0 . 0)^T / 1 = (1. 0 . 0)$

Tablo 4.58: Bakım Kolaylığı Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

Bakım Kolaylığı(AK64)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(7 . 9 . 9)	(3 . 5 . 7)
3. Ray	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)
Yerden Beslemeli S.	(0,14 . 0,2 . 0,3)	(1 . 1 . 1)	(1 . 1 . 1)

Maliyetler ana kriterinin beşinci alt kriteri olan İşçilik Maliyetleri alt kriteri için yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen değerlendirme Tablo 4.59'te gösterilmektedir.

S_{A1}=(11 . 15 . 17) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,67 . 0,67 . 0,63)
S_{A2}=(1,29 . 1,4 . 1,67) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,08 . 0,06 . 0,06)
S_{A3}=(4,12 . 6,11 . 8,14) ⊗ (1/16,4 . 1/22,51 . 1/26,81) = (0,25 . 0,27 . 0,3)

Buradan ağırlık vektörü;

$W' = (1. 0 . 0)^T$
$W = (1. 0 . 0)^T / 1 = (1. 0 . 0)$

Tablo 4.59: İşçilik Maliyetleri Alt Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonuçları

İşçilik Maliyetleri(AK65)	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Katener	(1 . 1 . 1)	(3 . 5 . 7)	(7 . 9 . 9)
3. Ray	(0,14 . 0,2 . 0,3)	(1 . 1 . 1)	(0,14 . 0,2 . 0,3)
Yerden Beslemeli S.	(0,11 . 0,11 . 0,14)	(3 . 5 . 7)	(1 . 1 . 1)

4.5.4. Bulanık AHP değerlendirme sonucu

Her bir alt kriterin alternatiflere göre normalleştirilmiş ağırlığı, her bir ana kriterin alt kriterlere göre ve ana kriterlerin kendi içindeki normalleştirilmiş ağırlıkları çarpımı ile her alternatifin normalleştirilmiş bulanık olmayan göreceli ağırlıkları hesaplanır; en yüksek sonuçlu alternatif en tercih edilen kabul edilir.

Tablo 4.60. Hat Özellikleri Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Hat Özellikleri Ana Kriteri	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,54	0,36	0,09
1.1 Hat Uzunluğu	0,16	0,62	0,37	0,01
1.2 Toplam Hat Uzunluğu	0,11	0,00	0,63	0,38
1.3 Ray Tipi	0,17	0,00	1,00	0,00
1.4 Demiryolu Hattı Eğimi	0,00	1,00	0,00	0,00
1.5 Hat Topolojisi	0,09	1,00	0,00	0,00
1.6 Köprü ve Tünel Sayısı	0,10	1,00	0,00	0,00
1.7 Yol Şartları	0,11	0,54	0,00	0,46
1.8 Malzeme Kalitesi	0,17	1,00	0,00	0,00
1.9 Trafik Yoğunluğu	0,08	0,22	0,78	0,00

Tablo 4.61. Tren Özellikleri Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Tren Özellikleri Ana Kriteri	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,49	0,21	0,30
2.1 Tren Sayısı	0,09	0,62	0,37	0,01
2.2 Tren Tipi	0,17	0,00	0,28	0,72
2.3 Tren Hızı	0,07	0,00	1,00	0,00
2.4 Tren Kapasitesi	0,10	1,00	0,00	0,00
2.5 Tren Bkm. ve Onarım S.	0,12	1,00	0,00	0,00
2.6 Tren Sefer Sıklığı	0,01	1,00	0,00	0,00
2.7 Güvenilirlik	0,13	0,54	0,00	0,46
2.8 Durak Mesafeleri	0,11	1,00	0,00	0,00
2.9 Konfor	0,07	0,22	0,78	0,00
2.10 Entegrasyon	0,12	0,00	0,00	1,00

Tablo 4.62. Yolcu Talebi Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Yolcu Talebi	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,29	0,47	0,24
3.1 Yolcu Kapasitesi	0,47	0,62	0,37	0,01
3.2 Headway Süresi	0,33	0,00	0,28	0,72
3.3 Sezonluk Talep	0,20	0,00	1,00	0,00
3.4 Yolcu Yoğunluğu	0,00	1,00	0,00	0,00

Tablo 4.63. Emniyet Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Emniyet	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,57	0,37	0,07
4.1 Emniyet Standartları	0,92	0,62	0,37	0,01
4.2 Sin. ve Emniyet	0,08	0,00	0,28	0,72
4.3 Demiryolu Kul. Sin. S.	0,00	0,00	1,00	0,00

Tablo 4.64. Çevresel Etkiler Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Çevresel Etkiler	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,37	0,31	0,31
5.1 Çevresel Faktörler	0,52	0,62	0,37	0,01
5.2 Enerji Tük. ve Verim.	0,43	0,00	0,28	0,72
5.3 Endüs. ve Tic. Faaliyet.	0,00	0,00	1,00	0,00
5.4 Turistik Potansiyel	0,05	1,00	0,00	0,00
5.5 Toplum ve Çevre	0,00	1,00	0,00	0,00

Tablo 4.65. Maliyet Ana Kriteri İçin Alternatif Değerlendirme Sonucu

Maliyet	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,42	0,57	0,01
6.1 Elektrifikasyon Kur. M.	0,68	0,62	0,37	0,01
6.2 İnşaat Maliyetleri	0,00	0,00	0,28	0,72
6.3 Bakım ve İşletme M.	0,32	0,00	1,00	0,00
6.4 Bakım Kolaylığı	0,00	1,00	0,00	0,00
6.5 İşçilik Maliyetleri	0,00	1,00	0,00	0,00

Karar vericinin kriterler arasında Hat Özellikleri, Tren Özellikleri, Emniyet ve Çevresel Etkiler gibi öncelikleri dikkate alındığında, bu sıralamanın oluştuğu Tablo 4.66 de görülmüştür.

Tablo 4.66. Ana Kriterlere Göre Önem Ağırlıklarının Özeti

	Ağırlık	Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli S.
Alt Öncelik Ağırlığı		0,45	0,37	0,19
Hat Özellikleri	0,37	0,54	0,36	0,09
Tren Özellikleri	0,23	0,49	0,21	0,30
Yolcu Talebi	0,23	0,29	0,47	0,24
Güvenlik	0,00	0,57	0,37	0,07
Çevresel Etkiler	0,08	0,37	0,31	0,31
Maliyetler	0,09	0,42	0,57	0,01

Alternatifler bu değerlendirmeler sonucunda şu şekilde sıralanmıştır: Katener (A1) > 3. Ray (A2) > Yerden Beslemeli Sistemler (A3). Elde edilen bu sıralama, demiryolu elektrik iletim yöntemleri arasında en uygun seçimin tablo 4.67. de Katener (A1) olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.67. Bulanık AHP Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması

Katener	3. Ray	Yerden Beslemeli Sistemler
0,45	0,37	0,19

4.6. SONUÇ

Demiryolu sektörü, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alan olup, doğru iletim yöntemi seçimi bu sektörün başarısı için kritik öneme sahiptir. Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin uygulanmasıyla geliştirilen enerji iletim yöntemi karar modeli, demiryolu enerji iletim yöntemlerini değerlendirmek için bir çerçeve sunmuştur. Bu model, farklı kriterlerin ve alt kriterlerin bulanık ağırlıklarını dikkate alarak, karar verme sürecine esneklik kazandırmıştır.

Tablo 4.68. Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS sonuçlarının karşılaştırılması

	TOPSIS	AHP
Katener	0,655	0,45
3. Ray	0,627	0,37
Yerden Beslemeli S.	0,622	0,19

Bu çalışma, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde bulanık analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve TOPSIS (Teknik Optimal Çok Kriterli Karar Verme) yöntemlerinin kullanılabilirliğini ve etkinliğini Yapı Merkezi İDİS Mühendislik firmasının Tanzanya Lot 1-2 projeleri üzerinde incelemiştir. Proje içerisindeki tüm ana kriterler ve alt kriterler, Katener, 3. Ray ve Yerden besleme iletim yöntemleri içerisinden kullanılabilecek en verimli enerji iletim yöntemi seçilmesi için uygulanmıştır. Tablo.5.68' de gösterilen analiz sonuçlarına bakacak olursak TOPSIS yöntemi sonucu olan A1= 0,655 ile Katener sistem sonucu çıkmıştır. Bunu sırasıyla A2= 0,627 ile 3. Ray ve A3= 0,622 yerden beslemeli sistemler takip izlemektedir. AHP yöntemi sonucu ise A1=0,45 değeri ile yine Katener sistemi çıkmıştır. Daha sonra sırası ile A2= 0,37 3. ray ve A3=0,19 ile yerden besleme takip etmektedir. Yerden beslemeli sistemlerde kurulum işletme ve bakım maliyetleri maliyet kriteri altında incelenmiş olup sonucu en

fazla etkileyen kriter olurken, 3. Ray sisteminde ise sonuca en çok etkileyen kriter emniyet kriteri olmuştur. Bu sonuçlar, projede uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Yapılan iki analiz sonucunun da katener sisteminin daha verimli olduğunu göstermesi projede uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

Analiz sonuçları, her iki yöntemin de demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi konusunda etkili olduğunu göstermektedir. Bulanık AHP 'nin belirsizlikleri ve subjektif değerlendirmeleri daha iyi ele aldığı görülmüştür, bu da karar vericilere daha fazla esneklik sağlamıştır. Diğer yandan, TOPSIS yöntemi net ve kesin sonuçlar üretmiş ve karar verme sürecini hızlandırmıştır. Bu sonuçlar, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasının, karar verme sürecini zenginleştirebileceğini ve daha kapsamlı bir bakış açısı sunabileceğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, daha fazla kriterin ve değişkenin dikkate alınmasıyla bu modelin genişletilmesi ve geliştirilmesi önerilmektedir. Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanımı, demiryolu sistemlerinin daha sürdürülebilir, verimli ve güvenilir hale gelmesine katkı sağlayabilir.

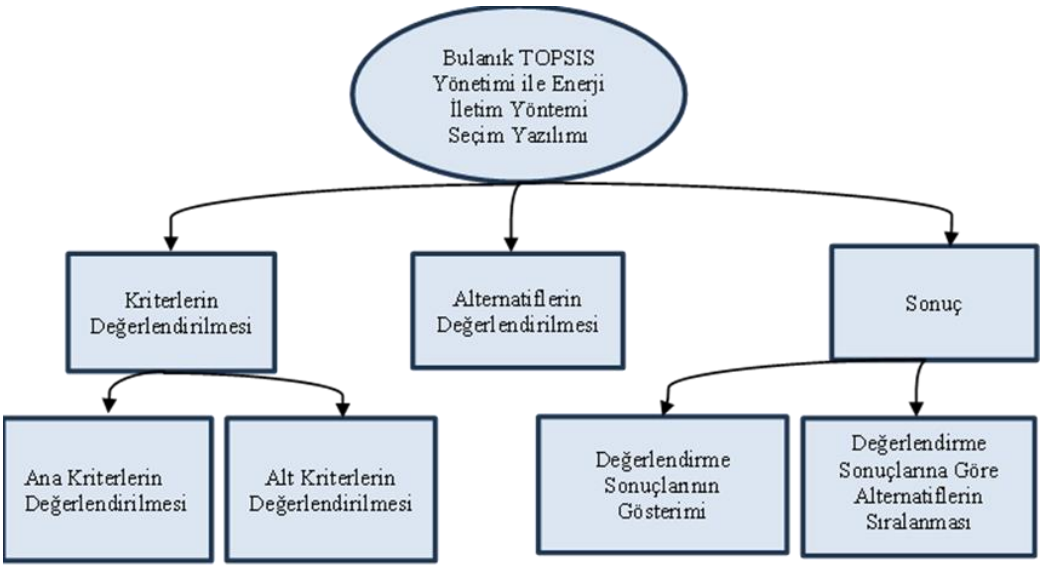
5. BULANIK TOPSIS YÖNTEMLERİ İLE DEMİRYOLU ENERJİ İLETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ YAZILIMI

Bu bölümde, bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Bulanık TOPSIS yöntemi ile demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi probleminde çözüm sağlamak için Excel Visual Basic – VBA olan excel macro yazılımı hakkında bilgi verilecektir. Program, birbirine alternatif olarak kabul edilebilecek yöntemlerden biri Bulanık TOPSIS ile çözüm sağlayan iki yazılımdan oluşmaktadır. Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi sağlayan yazılım üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıdaki şekildedir:

- Ana ve Alt Kriterlerin Değerlendirilmesi
- Alternatiflerin Değerlendirilmesi
- Sonuçlar

5.2. Yazılımın Yapısı

Bulanık TOPSIS yöntemi ile analiz yapılırken, tüm alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları hesaplanır. Çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan bulanık TOPSIS, bulanık AHP yöntemine göre daha basit bir çözüm süreci sunar. Ancak, kriter ve alternatif sayısının arttığı durumlarda bu avantajlar azalır. Bulanık TOPSIS yöntemi ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimine yönelik yazılımın temel yapısı Şekil. 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimine Yönelik Yazılımın Temel Yapısı

Bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi yapan yazılımın ilk aşaması, ana ve alt kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesidir. Bu aşamaya ait form ekranı Şekil 5.2'de gösterilmektedir. TOPSIS yazılımında ana ve alt kriterlerin önem ağırlıkları tek bir ekran üzerinden değerlendirilmektedir.

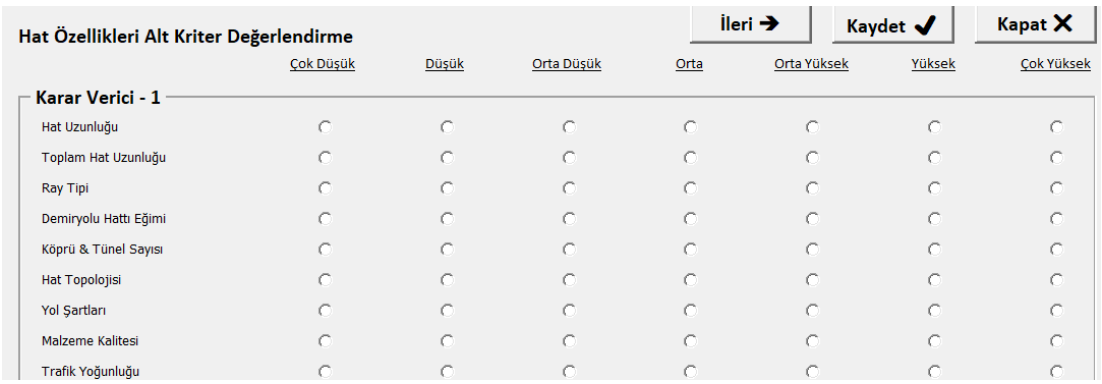


Şekil 5.2. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Form Ekranı

Her karar verici için ayrı ayrı doldurulması gereken formda, kullanıcılar için bulunan yardım butonu da kullanım açısından karar vericilere yol göstermektedir

5.3.Alt Kriterlerin Değerlendirilmesi

Yazılım, isteğe bağlı farklı formlarda da kullanım imkânı sunmaktadır. Karar vericiler, form aracılığıyla ana ve alt kriterin önemini sözel olarak ifade etmektedir.

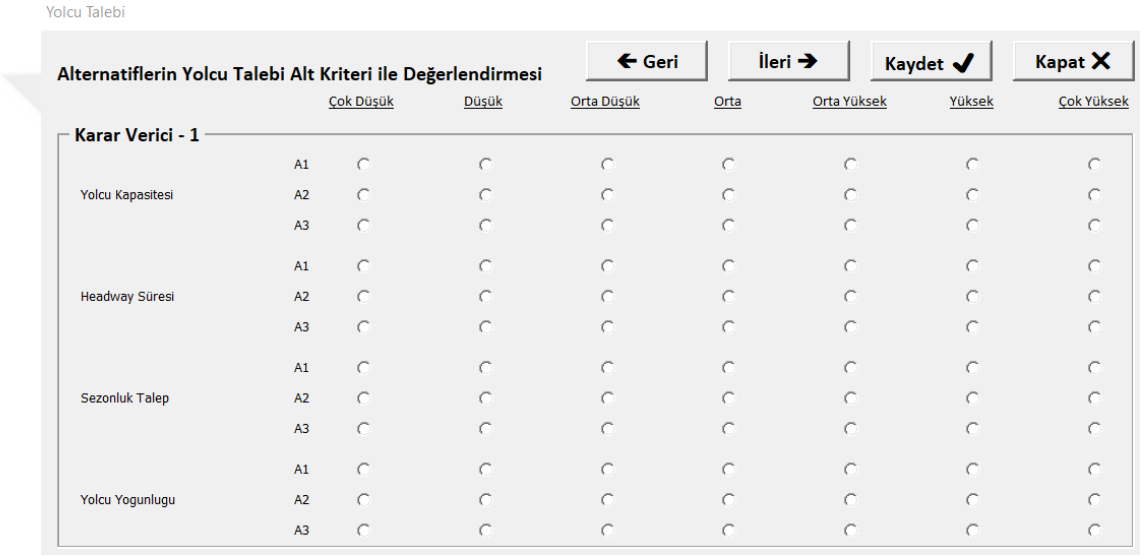


Şekil 5.3. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Kriterlerin Değerlendirilmesi

Önem ağırlıklarının değerlendirilmesi tamamlandığında, karar verici "Kaydet" butonuna tıklayarak bu sözel değerlerin yazılım tarafından işlenmesini sağlamaktadır.

5.4.Alternatiflerin Değerlendirilmesi

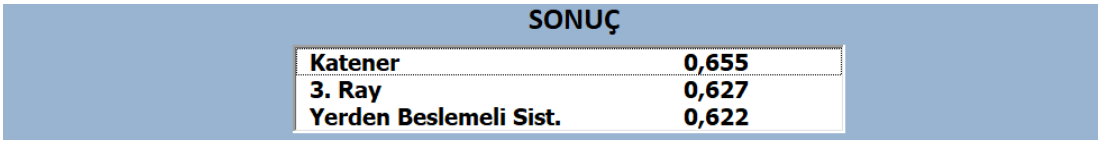
Bulanık TOPSIS yöntemi ile oluşturulan yazılımda da, alternatifler Katener sistem, Yerden Beslemeli Sistem ve 3. Ray sistemi ana kriterleri için değerlendirilir. Karar vericiler, her bir alternatifin ana ve alt kriterlerini değerlendirerek, sonucun Bulanık TOPSIS yöntemi ile elde edilmesini sağlar. Tüm değerlendirmeler yapıldıktan sonra “Sonuç” butonuna basılarak, girilen değerler program tarafından işlenmektedir.



Şekil 5.4. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Alternatiflerin Değerlendirilmesi

5.5.Sonuçlar

Bulanık TOPSIS yöntemine göre, kriterlerin sözel olarak önem değerlerinin belirlenmesi ve alternatiflerin sözel olarak her bir kriter için belirlenmesinin ardından Şekil 5.5’de bulunan sonuçlar kısmında elde edilmektedir. Sıralamada, en yüksek yakınlık katsayısına sahip olarak birinci olan alternatifin seçilmesi tanımlanan problem için en ideal çözüm olacaktır.



Şekil 5.5. Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçimi Sonuç Ekranı

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Demiryolu tasarımlarımda ve inşasında enerji iletim yönteminin seçimi projelerin en önemli konularınındın biridir. Enerji yönetimi seçimi projenin boyutu, bütçesi, uygulanacağı çevresel koşullar gibi birçok maddeye göre değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada Demiryolu tasarımında kullanılacak enerji iletim yöntemi çok kriterli bulanık karar verme yöntemlilerinden Bulanık TOPSİS ve Bulanık AHP yöntemleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında; Katener enerji iletim sistemi, 3.ray sistemi ve yerden beslemeli enerji sistemleri ele alınmış, bu üç enerji iletim sistemlerinin uygunlukları hesaplanmıştır.

Önerilen Demiryolu Enerji İletim Yöntemi Seçim Modeli için; Hat özellikleri, tren özellikleri, yolcu talebi, güvenlik, çevresel etkiler ve maliyetler olmak üzere 6 ana kriter ve 36 alt kriter belirlenmiştir. Enerji seçim modelini oluşturmada uzman sistem yaklaşımı kullanılmıştır.

Bulanık TOPSIS yöntemi ile demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi probleminde çözüm sağlamak için Excel Visual Basic – VBA olan excel macro yazılım programı gerçekleştirilmiştir. Program seçim sürecini önemli ölçüde hızlandırarak işletmeler için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi için önerilen AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılabilirliğini ve etkinliğini Yapı Merkezi İDİS Mühendislik firmasının Tanzanya Lot 1-2 projeleri üzerinde incelemiştir. Proje içerisindeki tüm ana kriterler ve alt kriterler, Katener, 3. Ray ve Yerden besleme iletim yöntemleri içerisinden kullanılabilecek en verimli enerji iletim yöntemi seçilmesi için uygulanmıştır. TOPSIS yöntemi sonucu olan A1= 0,655 ile Katener sistem sonucu çıkmıştır. Bunu sırasıyla A2= 0,627 ile 3. Ray ve A3= 0,622 yerden beslemeli sistemler takip izlemiştir. AHP yöntemi sonucu ise A1=0,45 değeri ile yine Katener sistemi çıkmıştır. Daha sonra sırası ile A2= 0,37 3. ray ve A3=0,19 ile yerden besleme takip etmektedir. Yerden beslemeli sistemlerde kurulum işletme ve bakım maliyetleri maliyet kriteri altında incelenmiş olup sonucu en fazla etkileyen kriter olurken, 3. Ray sisteminde ise sonuca en çok etkileyen kriter emniyet kriteri olmuştur. Bu sonuçlar, projede uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Yapılan iki analiz sonucunun da katener sisteminin daha verimli olduğunu göstermesi projede uygulanan yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, her iki yöntemin de demiryolu enerji iletim yöntemi seçimi konusunda etkili olduğunu göstermektedir. Bulanık AHP 'nin belirsizlikleri ve subjektif değerlendirmeleri daha iyi ele aldığı görülmüştür, bu da karar vericilere daha fazla esneklik sağlamıştır. Diğer yandan, TOPSIS yöntemi net ve kesin sonuçlar üretmiş ve karar verme sürecini hızlandırmıştır. Bu sonuçlar, demiryolu enerji iletim yöntemi seçiminde bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasının, karar verme sürecini zenginleştirebileceğini ve daha kapsamlı bir bakış açısı sunabileceğini göstermektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha fazla kriterin ve değişkenin dikkate alınmasıyla bu modelin genişletilmesi ve geliştirilmesi sağlanabilir. Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanımı, demiryolu sistemlerinin daha sürdürülebilir, verimli ve güvenilir hale gelmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

[1] Wikipedia contributors, “Rail transport,” In Wikipedia, The Free Encyclopedia.

[2] Wikipedia contributors, “Turkish State Railways,” In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Turkish_State_Railways&oldid=1222010701

[3] “2023’e kadar yüksek hızlı trene kavuşacak iller!,” Trenhaber. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: https://www.trenhaber.com/yht/2023-e-kadar-yuksek-hizli-trene-kavusacak-iller-h1090.html

[4] S. Taşdan, “Yüksek hızlı tren uygulamalarında elektrik besleme sistemlerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde, 2015.

[5] “Dünden Bugüne Türkiye’nin Demiryolu Serüveni,” Lojistikhattı. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: https://www.lojistikhatti.com/haber/2012/12/dunden-bugune-turkiyenin-demiryolu-seruveni

[6] Y. Arıkan and E. Çam, “Assessment of Factors of Energy Consumption in Railways With The AHP Method,” *The Online Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, 2018.

[7] F. A. A. Rahman, M. Z. A. A. Kadir, M. Osman, and U. A. U. Amirulddin, “Review of the AC Overhead Wires, the DC Third Rail and the DC Fourth Rail Transit Lines: Issues and Challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 213277–213295, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040018.

[8] M. Hamurcu and T. Eren, “Prioritization of high-speed rail projects,” *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 02, no. 02, Aug. 2018.

[9] M. Hamurcu and T. Eren, “Raylı Sistem Projeleri Kararında Ahs-Hp Ve Aas-Hp Kombinasyonu,” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 3, pp. 1–13, 2017.

[10] H. Gerçek, B. Karpak, and T. Kılınçaslan, “A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul,” *Transportation (Amst)*, vol. 31, no. 2, pp. 203–228, May 2004, doi: 10.1023/B:PORT.0000016572.41816.d2.

[11] N. Yücel and S. E. Taşabat, “The Selection of Railway System Projects with Multi Creteria Decision Making Methods: A Case Study for Istanbul,” *Procedia Comput Sci*, vol. 158, pp. 382–393, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.066.

[12] S. Stoilova, N. Munier, M. Kendra, and T. Skrúcaný, “Multi-Criteria Evaluation of Railway Network Performance in Countries of the TEN-T Orient–East Med Corridor,” *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1482, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12041482.

[13] M. Hamurcu and T. Eren, “An Application of Multicriteria Decision-making for the Evaluation of Alternative Monorail Routes,” *Mathematics*, vol. 7, no. 1, p. 16, Dec. 2018, doi: 10.3390/math7010016.

[14] M. Hamurcu and T. Eren, “Ankara Büyükşehir Belediyesi’nde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi İle Monoray Güzergâh Seçimi,” in *Transist 8. Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı*, İstanbul, 2015.

[15] F. E.-S. Al-Tony and A. Lashine, “Cost-benefit analysis of railway electrification: case study for Cairo-Alexandria railway line,” *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 18, no. 4, pp. 323–333, Dec. 2000, doi: 10.3152/147154600781767312.

[16] S. Vilke, I. Petrović, and F. Tadić, “Evaluation and Selection of the Railroad Route between Rijeka and Zagreb,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 1306, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12031306.

[17] N. Karkosińska-Brzozowska, P. Stromski, and D. Karkosiński, “A multi-criteria decision model for the introduction of electric storage multiple units on the partially electrified Gdynia-Hel railway,” *Rail Vehicles*, no. 2, pp. 1–15, Jul. 2021,

doi: 10.53502/RAIL-139978.
[18] S. D. Stoilova, “A Multi-criteria Assessment Approach for the Evaluation of Railway Transport in the Balkan Region,” *PROMET - Traffic&Transportation*, vol. 31, no. 6, pp. 655–668, Dec. 2019, doi: 10.7307/ptt.v31i6.3189.
[19] Ömür D., “Demiryolu Hatlarinda Elektrifikasyon Sistem Tasarımı Ve Uygulaması,” Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019.
[20] Y. Oura, Y. Mochinaga, and H. Nagasawa, “Railway Technology Today 3 (Edited by Kanji Wako) Railway Electric Power Feeding Systems,” 2000. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14500226
[21] İ. Özmen, “750 V Dc Cer Gücü Tedarik Sisteminin Bilgisayar Destekli Modellemesi, Benzetimi Ve Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
[22] S. Sarısakal, “Rijit Katener Sisteminin Modellenerek Yolcu Üzerindeki Elektrik Ve Manyetik Alan Etkisinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2015.
[23] E. Karaköse, “Raylı sistemlerde pantograf-katener sisteminin modellenmesi, simülasyonu ve arıza teşhis yöntemlerinin geliştirilmesi,” Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.
[24] “Alstom’dan İstanbul tramvay hattına zeminden beslemeli APS güç sistemi,” Yesillojistikciler. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: https://www.yesillojistikciler.com/demiryolu/alstomdan-istanbul-tramvay-hattina-zeminden-beslemeli-aps-guc-sistemi/15550
[25] Tracy V. Wilson, “How Subways Work.” Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: https://science.howstuffworks.com/engineering/civil/subway3.htm
[26] G. R. Jahanshahloo, F. H. Lotfi, and M. Izadikhah, “Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data,” *Appl Math Comput*, vol. 181, no. 2, pp. 1544–1551, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.amc.2006.02.057.
[27] T. Saaty and L. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 2001. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
[28] B. Maviş, “Bulanık Mantık (Fuzzy Logıc),” Bahçeşehir, Üniversitesi. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: http://kergun.baun.edu.tr/20172018Guz/YZ_Sunumlar/Bulanik_Mantik_Busra_Mavis.pdf
[29] B. Chang, C.-W. Chang, and C.-H. Wu, “Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria,” *Expert Syst Appl*, vol. 38, no. 3, pp. 1850–1858, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.07.114.
[30] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making*, vol. 186. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9.
[31] J. M. Benítez, J. C. Martín, and C. Román, “Using fuzzy number for measuring quality of service in the hotel industry,” *Tour Manag*, vol. 28, no. 2, pp. 544–555, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.tourman.2006.04.018.
[32] A. Shanian and O. Savadogo, “TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell,” *J Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1095–1104, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.12.092.
[33] A. Gupta and S. Kumar, “Flow shop scheduling decisions through Techniques for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS),” *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 4, no. 2, p. 43, Jul. 2016, doi: 10.4995/ijpme.2016.4102.
[34] S. ÖZMEN-AKYOL, A. BABA, and S. SALMAN, “Selection of Material for Marine Environments Using Fuzzy TOPSIS Approach,” *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 11–22, Jan. 2021, doi: 10.17671/gazibtd.690740.
[35] Y.-M. Wang and T. M. S. Elhag, “Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment,” *Expert Syst Appl*, vol. 31, no. 2, pp. 309–319, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.040.

[36] G. Işıklar and G. Büyüközkan, “Using a multi-criteria decision making approach to evaluate mobile phone alternatives,” *Comput Stand Interfaces*, vol. 29, no. 2, pp. 265–274, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.csi.2006.05.002.
[37] N. Y. Seçme, A. Bayrakdaroğlu, and C. Kahraman, “Fuzzy performance evaluation in Turkish Banking Sector using Analytic Hierarchy Process and TOPSIS,” *Expert Syst Appl*, vol. 36, no. 9, pp. 11699–11709, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.03.013.
[38] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, “Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS,” *Eur J Oper Res*, vol. 156, no. 2, pp. 445–455, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
[39] S. Dündar, F. Ecer, and Ş. Özdemir, “Fuzzy TOPSIS Yöntemi ile Sanal Mağazaların Web Sitelerinin Değerlendirilmesi,” *Atatürk Üniversitesi iktisadi ve idari Bilimler Dergisi*, vol. 21, no. 1, 2007.
[40] D. Yong, “Plant location selection based on fuzzy TOPSIS,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 839–844, 2006, doi: 10.1007/s00170-004-2436-5.
[41] H.-J. Zimmermann, “Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems,” 1987, pp. 15–44. doi: 10.1007/978-94-009-3249-4_2.
[42] H. Jun and P. Jian-liang, “Application of Supplier Selection Based on the AHP Theory,” in *2008 IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008, pp. 1095–1097. doi: 10.1109/KAMW.2008.4810684.
[43] M. Punniyamoorty, P. Mathiyalagan, and G. Lakshmi, “A combined application of structural equation modeling (SEM) and analytic hierarchy process (AHP) in supplier selection,” *Benchmarking: An International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 70–92, Jan. 2012, doi: 10.1108/14635771211218362.
[44] V. Kannan, “Benchmarking the service quality of ocean container carriers using AHP,” *Benchmarking: An International Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 637–656, Jan. 2010, doi: 10.1108/14635771011076416.
[45] M. S. Ozdemir and T. L. Saaty, “The unknown in decision making: What to do about it,” *Eur J Oper Res*, vol. 174, no. 1, pp. 349–359, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.12.017.
[46] H. Efe, “Functionality of virtual signals in marshaling yard and workshop area signaling systems,” Master Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, 2022.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan Kocakaplan, Lisans eğitimini 2007-2011 yılları arasında Fatih Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlayarak, mezuniyet projesi olarak PLC kontrollü pnömatik kol ve bant geliştirmiştir. Yüksek lisans eğitimine Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı. Çalışma hayatında, elektrik projeleri ve raylı sistemlerde elektrik tasarım projeleri üzerine uzmanlaşmıştır. Yapı Merkezi İDİS Mühendislik' de Elektrik Proje Tasarım Lideri olarak çalışmakta ve uluslararası projelerde görev almaktadır.