

## **Kritik Ulaştırma Altyapısı Dayanıklılığına Yönelik Yatırım Faktörlerinin Belirlenmesi**

Ertuğrul Ayyıldız<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

\* (ertugrulayyildiz@ktu.edu.tr)

**Özet** – Küresel ulaşım ağı modern toplumların can damarıdır ve malların, hizmetlerin ve insanların kesintisiz akışını sağlar. Ancak, kritik ulaşım altyapısından oluşan bu karmaşık ağ, doğal afetlerden kazalara ve öngörülemeyen olaylara kadar çeşitli yıkıcı güçlere karşı savunmasızdır. Buna karşılık, ulaşım sistemlerinin dayanıklılığı dünya çapında hükümetler, politika yapıcılar ve paydaşlar için önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Bu çalışma, kritik ulaşım altyapısının dayanıklılığını artırmaya yönelik yatırımları etkileyen karmaşık faktörler ağını incelemektedir. Bu çalışmada, Sezgisel Bulanık Analitik Hiyerarşi Sürecini (IF-AHP) kullanarak altı temel kriteri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir: Kritiklik, Hassasiyet, Potansiyel Etki, Dayanıklılık İyileştirme, Maliyet ve Uyarlanabilirlik. Bulgular, ulaşım sistemi içerisindeki münferit bileşenlerin çok önemli rolüne vurgu yapan "Kritiklik "in büyük önemini ortaya koymaktadır. "Hassasiyet" ve "Potansiyel Etki", kesintilere karşı duyarlılığın değerlendirilmesinin ve başarısızlıkların sonuçlarının tahmin edilmesinin önemini vurgulayarak yakından takip etmektedir. Bu çalışma, karar vericiler ve paydaşlar için, kritik ulaştırma altyapısının dayanıklılığını artırmaya yönelik seçimler için yapılandırılmış bir çerçeve sunmaktadır. IF-AHP metodolojisinin entegrasyonu, altyapı yatırımlarının doğasında bulunan karmaşıklıkları ve belirsizlikleri ele alarak karar verme sürecine yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler** – AHP, Sezgisel Bulanık Sayılar, Kritik Ulaştırma Altyapısı, Dayanıklılık, Kritiklik

### **I. GİRİŞ**

Kritik ulaşım altyapısı, modern toplumların can damarı olarak hizmet vermekte, malların, hizmetlerin ve insanların küresel ölçekte hareketini bir araya getirmektedir [1]. Ancak, bu karmaşık hayati ulaşım altyapısı ağı, doğal afetlerden öngörülemeyen kazalara kadar uzanan bir dizi yıkıcı güce karşı savunmasız kalmaktadır [2]. Sürekli gelişen bu ortamda, bu ulaşım sistemlerinin dayanıklılığı hükümetler, politika yapıcılar ve paydaşlar için endişe verici bir konu olarak ön plana çıkmıştır. Bu kritik sistemlerin kesintiler karşısında sürekli çalışması ve uyum sağlayabilmesi, toplumsal refahı, ekonomik istikrarı ve çevresel sürdürülebilirliği etkilemesi açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, bu çalışma, bu vazgeçilmez kritik ulaşım altyapısının dayanıklılığını artırmaya yönelik yatırımları destekleyen faktörlerin titizlikle araştırılmasına

odaklanmıştır. Kritik ulaşım altyapısının dayanıklılığı, modern toplumların işleyişi ve sürdürülebilirliği için temel bir dayanak noktasıdır. Sezgisel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci'ni (IF-AHP) kullanarak, bu kritik faktörlerin önceliklendirilmesi için kapsamlı bir çerçeve sunmaya ve küresel ulaşım ağlarının güçlendirilmesine yönelik içgörüler sunulmaktadır.

Kritik ulaştırma altyapısı, çok yönlü önemi nedeniyle dayanıklılık tartışmalarında merkezi bir konuma sahiptir. İlk olarak, mal ve hizmetlerin kesintisiz hareketini kolaylaştırarak bir ülkenin ekonomisinin can damarı olarak hizmet vermektedir [3]. Esnek bir ulaştırma ağı, tedarik zincirlerindeki aksaklıkları en aza indirdiği, ticaret engellerini azalttığı ve işletme maliyetlerini düşürdüğü için ekonomik büyüme ve refah için gereklidir. Esnek bir altyapı olmadan, ekonomiler afetlerin veya öngörülemeyen olayların ardından

önemli aksaklıklarla karşılaşabilir. İkinci olarak, bir topluluğun veya ulusun toplumsal refahı, ulaşım sistemlerinin güvenilirliğine yakından bağlıdır [4]. Bu sistemler sağlık, eğitim ve acil durum müdahalesi gibi hayati hizmetlere erişim sağlar. Krizler sırasında, insanların ve kaynakların hızlı bir şekilde taşınabilmesi bir ölüm kalım meselesi haline gelir. Dayanıklı ulaştırma altyapısı, bu temel hizmetlerin en çok ihtiyaç duyuldukları anda erişilebilir ve çalışır durumda kalmasını sağlar. Ayrıca, kritik ulaşım altyapısı çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur [5]. Verimli ulaşım ağları tıkanıklığı azaltabilir, yakıt tüketimini düşürebilir ve emisyonları azaltarak çevre dostu hale getirebilir. Ayrıca, esnek altyapı çevresel felaketlere daha iyi dayanabilir ve bu felaketlerden kurtulabilir, böylece ekolojik etkilerini azaltabilir.

Ulusal güvenlikle ilgili hususlar, ulaştırma altyapısının dayanıklılığına öncelik verilmesi için bir başka zorlayıcı nedenlerdendir [6]. Askeri güçleri harekete geçirme, acil durumlara müdahale etme ve potansiyel tehditlere karşı koruma yeteneği, bu sistemlerin bütünlüğüne ve işlevselliğine bağlıdır. Esnek bir ulaşım ağı, bu kritik kabiliyetlerin bozulmadan kalmasını sağlayarak ulusal güvenliği destekler. Daha toplum odaklı bir düzeyde, ulaşım ağları sosyal uyumu ve kültürel alışverişi teşvik eden bağlayıcılar olarak hizmet eder [7]. Dayanıklı altyapı bu bağlantıları koruyarak toplulukların zor zamanlarda birbirlerini desteklemelerine ve sosyal dokularını korumalarına olanak tanır. Turizm ve ticarete büyük ölçüde bağımlı bölgelerde, ulaşım altyapısının dayanıklılığı çok önemli hale gelir [8], [9]. Bu ağlarda meydana gelen aksaklıklar turistleri caydırabilir, tedarik zincirlerini bozabilir ve bir bölgenin genel ekonomik sağlığına zarar verebilir. Dahası, kritik ulaşım sistemleri genellikle boru hatları ve elektrik hatları gibi enerji dağıtım ağlarıyla kesişir. Ulaşım altyapısındaki esneklik, afetler sırasında bu enerji ağlarının zarar görmesini önler, istikrarlı bir güç ve kaynak tedariki sağlar.

Dirençli ulaştırma altyapısının acil durum müdahalesi ve afet kurtarma çalışmalarındaki rolü göz ardı edilemez [10]. İlk müdahale ekiplerinin hızlı bir şekilde konuşlandırılmasını, yardım ve kurtarma malzemelerinin dağıtımını ve etkilenen nüfusun güvenli bir şekilde tahliye edilmesini kolaylaştırır. Kritik ulaştırma altyapısı modern toplumların dayanıklılığı için temel bir dayanak noktasıdır. Katkıları ekonomik büyümeyi,

toplumsal refahı, çevresel sürdürülebilirliği, ulusal güvenliği ve günlük yaşamın çeşitli yönlerini kapsar. Bu altyapının dayanıklılığını sağlamak, toplumların ve ulusların istikrarını ve refahını korumak, ortaya çıkabilecek aksaklıklara ve öngörülemeyen olaylara karşı koruma sağlamak için zorunludur.

Bu çalışmanın odak noktası, temel ulaşım altyapısının dayanıklılığına yönelik yatırımları etkileyen kritik faktörlerin önem düzeylerini belirlemektir. İlk olarak, ulaşım sistemlerinin genel dayanıklılığı üzerinde önemli etkiye sahip olan temel faktörleri belirlenir. Bu faktörler Kritiklik, Savunmasızlık, Potansiyel Etki, Dayanıklılık İyileştirme, Maliyet ve Uyarlanabilirliği kapsayan çok yönlü bir spektrumu kapsamaktadır. İkinci olarak, IF-AHP kullanılarak belirlenen faktörlerin sistematik ve yapılandırılmış bir değerlendirmesini uzman görüşlerini alarak yapılmıştır. IF-AHP uygulaması, sezgisel bulanık mantığın gücünden yararlanarak, altyapı dayanıklılığı alanında karar verme sürecini karakterize eden içsel belirsizlikler ve karmaşıklıkların üstesinden gelmek için benzersiz bir kapasite sunmaktadır. Çalışmanın özü, bu kilit faktörlerin önceliklendirilmesine odaklanmaktadır. Geliştirilen IF-AHP çerçevesine yönelik uygulama, ulaşım ağlarının dayanıklılığını artırmadaki rolü bakımından her bir faktöre titizlikle göreceli önem atfetmektedir.

## II. SEZGİSEL BULANIK AHP

Zadeh bulanık mantığı 1965 yılında literatüre sunmuştur [11]. Bulanık mantık, karar verme problemlerinin hem niteliksel değerlendirmesi hem de öznel yargılaması için uygundur. Net değerlerin kullanıldığı geleneksel Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden farklı olarak, bulanık AHP'de kriterlerin değerlendirilmesi bir değerler kümesi halinde verilir. ÇKKV problemleri daha iyi bir karar vermek için birden fazla kriterden oluşur. Bu kriterler dilsel terimlerle tanımlanır. Dilsel terimler farklı bulanık kümeler aracılığıyla bulanık sayılara dönüştürülebilir [12]. Sezgisel bulanık kümeler, dilsel kriterleri tanımlamak için en çok kullanılan bulanık kümelerden biridir. Geleneksel bulanık kümelerde bir elemanın kümeye üyelik derecesi  $\mu_A$  ile, kümeye üye olmama derecesi ise  $1 - \mu_A$  ile tanımlanır. Dolayısıyla üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı 1'e eşittir. [13]. Ancak bu durum karşılaşılan bazı problemlerdeki belirsizliği açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu

nedenle Atanassov, bulanık küme teorisinin geliştirilmiş bir versiyonu olan sezgisel bulanık küme teorisini önermiştir. Atanassov'un IFS teorisinde, bir elemanın kümeye üyelik derecesi  $\mu_A$  ile, kümeye üye olmama derecesi  $v_A$  ile tanımlanır. Dolayısıyla üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı 1'den düşük olabilir. Bu durumda, Atanassov bu toplamı 1'e yuvarlamak için tereddüt derecesi adı verilen üçüncü bir parametre tanımlamıştır [14].

**Tanım 1:** Sezgisel bulanık sayı aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$\tilde{I} \cong \{x, \tilde{I}(\mu_{\tilde{I}}(x), v_{\tilde{I}}(x)); x \in X\} \quad (1)$$

Burada  $X$  fonksiyonda sabit bir kümedir.  $\mu_{\tilde{I}}(x): X \mapsto [0,1]$  ve  $v_{\tilde{I}}(x): X \mapsto [0,1]$  sırasıyla  $x \in X$  elemanının  $\tilde{I}$ 'ye üyelik derecesini ve üye olmama derecesini tanımlar.

$$0 \leq \mu_{\tilde{I}}(x) + v_{\tilde{I}}(x) \leq 1; x \in X \quad (2)$$

Belirsizlik derecesi Eşitlik 3 ile hesaplanır:

$$\pi_{\tilde{I}}(x) = \sqrt{1 - \mu_{\tilde{I}}(x) + v_{\tilde{I}}(x)} \quad (3)$$

Aralık sayıları, kriterleri ve alternatifleri değerlendirirken belirsizliği daha iyi yansıtmak için kullanılır [14]. Bu çalışmada, bulanıklık ve belirsizliği ele almak için aralık değerli bulanık sayılar kullanılmıştır. Aralık değerli sezgisel bulanık sayılar için ön bilgiler aşağıdaki gibi verilmiştir [15].

**Tanım 2.** Aralık değerli sezgisel bulanık sayı aşağıdaki gibi temsil edilir.[16]

$$\tilde{I} = \{x[\mu_{\tilde{I}}^-(x), \mu_{\tilde{I}}^+(x)], [v_{\tilde{I}}^-(x), v_{\tilde{I}}^+(x)]; x \in X\} \quad (4)$$

Öyle ki

$$0 \leq \mu_{\tilde{I}}^-(x), \mu_{\tilde{I}}^+(x), v_{\tilde{I}}^-(x), v_{\tilde{I}}^+(x) \leq 1 \quad (5)$$

$$\mu_{\tilde{I}}^-(x) \leq \mu_{\tilde{I}}^+(x) \text{ ve } v_{\tilde{I}}^-(x) \leq v_{\tilde{I}}^+(x) \quad (6)$$

$$\mu_{\tilde{I}}^+(x) + v_{\tilde{I}}^+(x) \leq 1 \quad (7)$$

**Tanım 3.** Aralık değerli bulanık sayılar ( $\tilde{\alpha} = [\mu_{\tilde{\alpha}}^-, \mu_{\tilde{\alpha}}^+], [v_{\tilde{\alpha}}^-, v_{\tilde{\alpha}}^+]$  ve  $\tilde{\beta} = [\mu_{\tilde{\beta}}^-, \mu_{\tilde{\beta}}^+], [v_{\tilde{\beta}}^-, v_{\tilde{\beta}}^+]$ ) için bazı matematik operasyonları aşağıda verilmiştir [17]:

$$\tilde{\alpha} \oplus \tilde{\beta} = \left[ \mu_{\tilde{\alpha}}^- + \mu_{\tilde{\beta}}^- - \mu_{\tilde{\alpha}}^- \mu_{\tilde{\beta}}^-, \mu_{\tilde{\alpha}}^+ + \mu_{\tilde{\beta}}^+ - \mu_{\tilde{\alpha}}^+ \mu_{\tilde{\beta}}^+ \right], \left[ v_{\tilde{\alpha}}^- v_{\tilde{\beta}}^-, v_{\tilde{\alpha}}^+ v_{\tilde{\beta}}^+ \right] \quad (8)$$

$$\tilde{\alpha} \otimes \tilde{\beta} = \left[ \mu_{\tilde{\alpha}}^- \mu_{\tilde{\beta}}^-, \mu_{\tilde{\alpha}}^+ \mu_{\tilde{\beta}}^+ \right], \left[ v_{\tilde{\alpha}}^- + v_{\tilde{\beta}}^- - v_{\tilde{\alpha}}^- v_{\tilde{\beta}}^-, v_{\tilde{\alpha}}^+ + v_{\tilde{\beta}}^+ - v_{\tilde{\alpha}}^+ v_{\tilde{\beta}}^+ \right] \quad (9)$$

$$\lambda \tilde{\alpha} = [1 - (1 - \mu_{\tilde{\alpha}}^-)^\lambda, 1 - (1 - \mu_{\tilde{\alpha}}^+)^\lambda], [(v_{\tilde{\alpha}}^-)^\lambda, (v_{\tilde{\alpha}}^+)^\lambda] \quad (10)$$

$$(\tilde{\alpha})^\lambda = [(\mu_{\tilde{\alpha}}^-)^\lambda, (\mu_{\tilde{\alpha}}^+)^\lambda], [1 - (1 - v_{\tilde{\alpha}}^-)^\lambda, 1 - (1 - v_{\tilde{\alpha}}^+)^\lambda] \quad (11)$$

$$\frac{\tilde{\alpha}}{\tilde{\beta}} = [\min(\mu_{\tilde{\alpha}}^-, \mu_{\tilde{\beta}}^-), \min(\mu_{\tilde{\alpha}}^+, \mu_{\tilde{\beta}}^+)], [\max(v_{\tilde{\alpha}}^-, v_{\tilde{\beta}}^-), \max(v_{\tilde{\alpha}}^+, v_{\tilde{\beta}}^+)] \quad (12)$$

**Tanım 4.** Bir aralık değerli sezgisel sayı ( $\tilde{\alpha} = [\mu_{\tilde{\alpha}}^-, \mu_{\tilde{\alpha}}^+], [v_{\tilde{\alpha}}^-, v_{\tilde{\alpha}}^+]$ ) için skor fonksiyonu aşağıdaki gibidir [18]:

$$S(\tilde{\alpha}) = \frac{\mu_{\tilde{\alpha}}^- - v_{\tilde{\alpha}}^- + \mu_{\tilde{\alpha}}^+ - v_{\tilde{\alpha}}^+}{2} \quad (13)$$

Yukarıdaki tanım ve açıklamalara dayanarak, IF-AHP'nin adımları aşağıda verilmiştir [19]:

**Adım 1.** Tablo 1'deki dilsel terimleri kullanarak ikili karşılaştırma matrisini oluşturulur [15]. Ardından dilbilimsel terimleri bulanık değerlerine dönüştürülür.

Tablo 1. IF-AHP değerlendirmeleri için dilsel terimler

Dilsel Terimler	Bulanık sayı			
	$\mu_{\tilde{I}}^-$	$\mu_{\tilde{I}}^+$	$v_{\tilde{I}}^-$	$v_{\tilde{I}}^+$
Kesinlikle Düşük Önem -AL	0.1	0.25	0.65	0.75
Çok Düşük Önem - VL	0.15	0.3	0.6	0.7
Düşük Önem - L	0.2	0.35	0.55	0.65
Orta Düşük Önem -ML	0.25	0.4	0.5	0.6
Eşit Önem - EE	0.5	0.5	0.5	0.5
Orta Yüksek Önem - MH	0.5	0.6	0.25	0.4
Yüksek Önem - H	0.55	0.65	0.2	0.35
Çok Yüksek Önem - VH	0.6	0.7	0.15	0.3
Kesinlikle Yüksek Önem - AH	0.65	0.75	0.1	0.25

**Adım 2.** Matrisin tutarlılığı incelenir. Tutarlılık oranını (CR) bulmak için Saaty (1977) tarafından önerilen net değerleri kullanılır. CR'yi belirlemek için öncelikle matris tutarlılık endeksi (CI) hesaplanır [14]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (14)$$

$\lambda_{max}$  karar matrisinin maksimum özdeğeridir ve n matris sırasıdır [21]. Daha sonra CR hesaplanır:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (15)$$

RI Rastgele İndeks'tir ve matris sırasına bağlıdır. RI değeri Saaty (1994) tarafından önerilen Tablo 2 kullanılarak belirlenir. CR'nin kabul edilebilir değeri AHP için 0,1'e eşit veya daha küçüktür.

Tablo 2. Farklı matris düzenleri için RI değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

**Adım 3.** Eşitlik 16 aracılığıyla ikili karşılaştırma matrisindeki her bir elemanın skor değeri belirlenir.

$$S(\tilde{I}) = \frac{\mu_j^-(x) + \mu_j^+(x) - v_j^-(x) + v_j^+(x)}{2} \quad (16)$$

**Adım 4.** Eşitlik 17 aracılığıyla aralıklı üstel matrisi hesaplanır

$$\tilde{I} = \begin{bmatrix} [e^{(\mu_{s_{11}}^- - v_{s_{11}}^+)}, e^{(\mu_{s_{11}}^+ - v_{s_{11}}^-)}] & \dots & [e^{(\mu_{s_{1n}}^- - v_{s_{1n}}^+)}, e^{(\mu_{s_{1n}}^+ - v_{s_{1n}}^-)}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [e^{(\mu_{s_{n1}}^- - v_{s_{n1}}^+)}, e^{(\mu_{s_{n1}}^+ - v_{s_{n1}}^-)}] & \dots & [e^{(\mu_{s_{nn}}^- - v_{s_{nn}}^+)}, e^{(\mu_{s_{nn}}^+ - v_{s_{nn}}^-)}] \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$= \begin{bmatrix} [\tilde{a}_{11}^-, \tilde{a}_{11}^+] & \dots & [\tilde{a}_{1n}^-, \tilde{a}_{1n}^+] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [\tilde{a}_{n1}^-, \tilde{a}_{n1}^+] & \dots & [\tilde{a}_{nn}^-, \tilde{a}_{nn}^+] \end{bmatrix}$$

**Adım 5.** Her bir kriter için öncelik vektörlerini Eşitlik 18 ile hesaplanır.

$$\tilde{W}_j = [w_j^+, w_j^-] = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij}^-}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}^+}, \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij}^+}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}^-} \right] \quad (18)$$

**Adım 6.** Eşitlik 19 kullanılarak olasılık derecesi matrisini oluşturulur.

$$p_{ij} = \frac{\max(0, w_j^+ - w_i^-) - \max(0, w_j^- - w_i^+)}{(w_i^+ - w_i^-) + (w_j^+ - w_j^-)} \quad (19)$$

**Adım 7.** Kriter ağırlıkları hesaplanır.

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n -1 + p_{ij}}{n} + 0.5 \quad (20)$$

**Adım 8.** Kriter ağırlıkları normalize edilir.

$$w_j^T = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^n w_j} \quad (21)$$

### III. UYGULAMA

Vaka çalışmasının odak noktası olarak seçilen ulaşım sistemi, modern dünyada kritik ulaşım altyapısının karmaşıklığını ve önemini örneklemektedir. İstanbul, bölgesel ve ulusal bağlantı için çok önemli bir merkez olarak hizmet vermektedir. Karayolları, demiryolları, havaalanları ve limanlar dahil olmak üzere çok çeşitli modları kapsayan İstanbul ulaşım sistemi, bölgenin ekonomik faaliyetlerinin bel kemiğini oluşturmaktadır. Otoyollar ve ana arterlerden oluşan karayolu ağı, bölge içinde malların ve insanların hareketini kolaylaştırmakta ve bölgeyi komşu bölgelere bağlamaktadır. Ayrıca, geniş bir demiryolu ağı hem yolcuların hem de yüklerin verimli bir şekilde taşınmasında hayati bir rol oynamaktadır. Bölge aynı zamanda küresel hava

yolculuğu ve kargo sevkiyatları için bir geçit görevi gören büyük bir uluslararası havalimanlarına da ev sahipliği yapmaktadır. Ayrıca, stratejik bir konuma sahip olan limanlar, önemli miktarda ithalat ve ihracatı gerçekleştirerek uluslararası ticarete önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. İncelenen kritik ulaşım sistemi sadece bir fiziksel altyapı ağı değildir; hizmet ettiği toplumlar için bir can damarıdır. Hastaneler, okullar ve acil müdahale tesisleri de dahil olmak üzere temel hizmetlere erişim sağlar. Ayrıca, mal akışını kolaylaştırarak ekonomik kalkınmayı teşvik eder, böylece bölgedeki ticareti ve sanayiye destekler.

Bu çalışmada, IF-AHP yöntemiyle farklı bileşenlerin önemi değerlendirilecektir. Bu analiz çeşitli zorluklar ve aksaklıklar karşısında bu hayati ulaşım ağının dayanıklılığını artırmaya yönelik içgörü ve öneriler de sunmaktadır. Bu amaçla IF-AHP adımları uygulanarak kriter ağırlıkları belirlenmiştir. İlk olarak, literatür taraması ve uzman görüşüne dayalı olarak kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler aşağıdaki gibidir.

C1.Kritiklik: Her bir ulaşım altyapısı bileşeninin önemini, ulaşım sisteminin genel işlevselliği ve bağlanabilirliğindeki rolü açısından önem düzeyini ifade eder.

C2.Hassasiyet: Her bir bileşenin doğal afetler, kazalar veya diğer öngörülemez olaylar gibi çeşitli aksaklıklara karşı duyarlılığını ifade eder.

C3.Potansiyel Etki: Ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri göz önünde bulundurarak her bir bileşenin arızalanması veya kesintiye uğramasının ulaşım ağı üzerindeki potansiyel olumsuz sonuçlarını gösterir.

C4.Dayanıklılık İyileştirme: Belirli bir bileşene yatırım yapmanın ulaşım sisteminin genel dayanıklılığını ne ölçüde artırabileceğini ölçer.

C5.Maliyet: Hem ilk yatırım hem de devam eden bakım maliyetleri dahil olmak üzere her bir altyapı bileşenine yatırım yapmak ve bakımını sağlamak için gereken mali kaynak miktarlarını ifade eder.

C6.Uyarlanabilirlik: Her bir bileşenin değişen koşullara ve aksaklıklara karşı esnekliğini ve uyarlanabilirliğini göz önünde bulundurarak hızlı bir şekilde toparlanmasını ifade eder.

Kriterler hakkında görüşlerini almak için beş kişilik bir uzman grubu oluşturulmuştur. Tablo 3 uzmanlar hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 3. Uzmanlar hakkında bilgiler

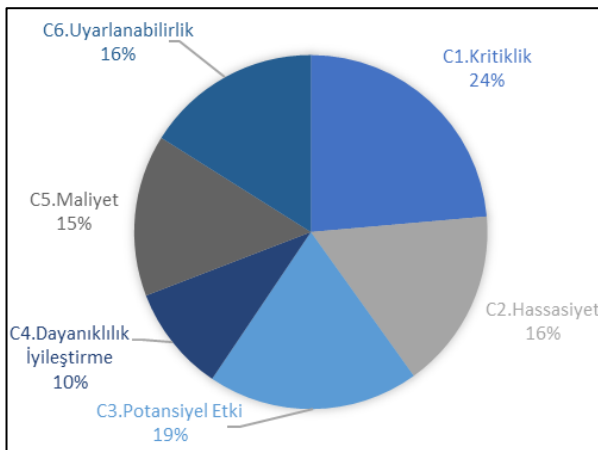
Ünvan	Tecrübe	Eğitim	Uzmanlık	
E-1	Ulaştırma Mühendisi	15 yıl	İnşaat Mühendisliği Doktorası	Altyapı dayanıklılığı ve afet yönetimi
E-2	Acil Durum Yönetimi Uzmanı	12 yıl	Acil Durum Yönetimi Yüksek Lisansı	Felaket risk azaltma ve ulaştırma dayanıklılığı
E-3	Ekonomist ve Politika Analisti	10 yıl	Ekonomi Doktorası	Ekonomik etki değerlendirmesi ve politika analizi
E-4	Çevre Bilimci	8 yıl	Çevre Mühendisliği Doktorası	Çevresel sürdürülebilirlik ve altyapı
E-5	Ulaştırma Planlamacısı	7 yıl	Şehir Bölge Planlama Yüksek Lisansı	Kentsel ulaştırma planlama ve dayanıklılık

Tablo 4, uzman görüşlerinin birleştirilmesi için modifiye Delphi [23] yöntemiyle oluşturulan ikili karşılaştırma matrisini sunmaktadır.

Tablo 4. İkili kıyaslama matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1.Kritiklik	EE	VH	VH	AH	VH	VH
C2.Hassasiyet	VL	EE	ML	H	MH	EE
C3.Potansiyel Etki	VL	MH	EE	VH	MH	MH
C4.Dayanıklılık İyileştirme	AL	L	VL	EE	L	VL
C5.Maliyet	VL	ML	ML	H	EE	EE
C6.Uyarlanabilirlik	VL	EE	ML	VH	EE	EE

Dilsel terimler aralık değerli sezgisel bulanık sayılara dönüştürülür. Ardından, IF-AHP adımları uygulanarak kriter ağırlıklarını Şekil 1'de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 1. Kriter ağırlıkları

Şekil 1'de sunulan kriter ağırlıklarına göre 0,236'lık önem puanıyla "Kritiklik" yer almakta olup, bu da en büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu, çalışmanın her bir ulaştırma

altyapısı bileşeninin ulaştırma sisteminin genel işlevselliği ve bağlanabilirliğindeki rolünü ve önemini anlamaya güçlü bir vurgu yaptığı anlamına gelmektedir. Bu kritik bileşenlerin operasyonel bütünlüğünün korunmasının en önemli öncelik olduğunu göstermektedir. "Potansiyel Etki" 0,194 puanla ikinci en önemli kriterdir. Bu, ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri kapsayan her bir altyapı bileşeninin arızalanması veya kesintiye uğramasıyla ilişkili potansiyel olumsuz sonuçların tahmin edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu etkilerin tanınması, bilinçli karar alma ve proaktif dayanıklılık stratejileri için elzemdir. Hemen ardından 0,165 puanla "Hassasiyet" gelmektedir ve bu da büyük önem taşıdığını göstermektedir. Her bir bileşenin aksaklıklara karşı duyarlılığının değerlendirilmesinin kritik bir husus olduğunu göstermektedir. Genel sistemin dayanıklılığını artırmak için kırılabilirliklerin ele alınmasının araştırmanın temel odak noktalarından biri olduğu açıktır. Bu sonuçlar, kritik ulaştırma altyapısının dayanıklılığını etkin bir şekilde artırmak için kaynak tahsisinde ve stratejik seçimlerde karar vericilere ve paydaşlara rehberlik etmektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Artan kentleşme, küreselleşme ve çevresel belirsizliğin damgasını vurduğu bir çağda, kritik ulaşım altyapısının dayanıklılığı modern toplumların istikrarı ve refahı için temel bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, bu hayati ulaşım ağlarının dayanıklılığını artırmaya yönelik yatırımları etkileyen faktörleri kapsamlı bir şekilde araştırmaya başlamıştır. IF-AHP uygulanarak altı temel kriter titizlikle analiz edilmiş ve önceliklendirilmiştir: Kritiklik, Hassasiyet, Potansiyel Etki, Dayanıklılık İyileştirme, Maliyet ve Uyarlanabilirlik.

Çalışma sonuçları, her bir kriterin göreceli önemine ışık tutarak politika yapıcılar, paydaşlar ve altyapı planlamacıları için değerli bilgiler sağladı. "Kritiklik" en önemli kriter olarak ortaya çıkmış ve ulaşım sistemi içindeki münferit bileşenlerin çok önemli rolünün altını çizmiştir. Kesintisiz işlevsellik sağlamak için bu kritik unsurların korunması gerektiğini vurgulamaktadır. Hemen ardından gelen "Potansiyel Etki", aksaklıklara karşı duyarlılığın değerlendirilmesinin ve arızaların sonuçlarının tahmin edilmesinin önemini altını çizmektedir. Bu kriterler, güvenlik açıklarını azaltmak ve etkili bir afet müdahalesi

planlamak için proaktif önlemlerin gerekliliğine ışık tutmaktadır. "Dayanıklılık İyileştirme" önceliklendirmede daha az merkezi bir konuma sahip olsa da, altyapı dayanıklılığının artırılmasının hayati bir yönü olmaya devam etmektedir. "Maliyet" kriterinde yansıtıldığı üzere, iyileştirmeler ile maliyet hususlarının dengelenmesi, mantıklı kaynak tahsisi ve yatırım stratejileri gerektirmektedir. "Uyarlanabilirlik", değişen koşullar ve aksaklıklar karşısında esneklik ihtiyacını vurgulayarak kendi önemini korumuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma karar vericileri ve paydaşları kritik ulaştırma altyapısı dayanıklılığı alanında bilinçli seçimler yapmaları için yapılandırılmış bir çerçeve ile donatmaktadır. IF-AHP metodolojisinin entegrasyonu, altyapı yatırımlarının doğasında var olan karmaşıklıkları ve belirsizlikleri ele alarak karar verme sürecine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Artan zorlukların ve aksaklıkların damgasını vurduğu bir geleceğin eşliğinde dururken, bu araştırmadan elde edilen içgörüler kaynak tahsisi, politika formülasyonu ve stratejik planlamaya rehberlik etme potansiyeline sahiptir. Nihayetinde, kritik ulaşım altyapısının dayanıklılığını artırmaya yönelik ortak çabalarımız yalnızca toplumların refahına değil, aynı zamanda ulusların sürdürülebilirliğine ve refahına da katkıda bulunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] J. S. Szyliowicz, "Safeguarding critical transportation infrastructure: The US case," *Transp. Policy*, vol. 28, 2013, doi: 10.1016/j.tranpol.2012.09.008.
- [2] C. Zoli and L. J. Steinberg, "Adaptive Resilience and Critical Infrastructure Security," in *Securing Transportation Systems*, 2015. doi: 10.1002/9781119078203.ch4.
- [3] L. Janušová and S. Čičmancová, "Improving Safety of Transportation by Using Intelligent Transport Systems," in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 134. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.031.
- [4] J. K. Herrman, *Laboratory evaluation of dynamic characterization methods for rapid condition assessment of bridges*. University of Arkansas, 2011.
- [5] T. Yigitcanlar and M. Kamruzzaman, "Investigating the interplay between transport, land use and the environment: a review of the literature," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 11, no. 8, 2014. doi: 10.1007/s13762-014-0691-z.
- [6] W. A. Hitchcock, S. Nunez, and S. V. Watson, "Emergency Reconstruction of Critical Transportation Infrastructure," *Univ. Transp. Cent. Alabama*, no. UTCA Rep. No. 06211, 2008.
- [7] K. Ntafloukas, D. P. McCrum, and L. Pasquale, "A Cyber-Physical Risk Assessment Approach for Internet of Things Enabled Transportation Infrastructure," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 18, 2022, doi: 10.3390/app12189241.
- [8] A. C. Baumann, "On the path towards understanding overtourism—cruise tourism and the transportation infrastructure," *World Leis. J.*, vol. 63, no. 1, 2021, doi: 10.1080/16078055.2021.1887995.
- [9] J. De Dios Aguilar *et al.*, "Risk-based adaptive management for future land development adjacent to critical transportation infrastructure systems," 2011. doi: 10.1109/SIEDS.2011.5876865.
- [10] Y. Huang, Y. Fan, and R. L. Cheu, "Optimal allocation of multiple emergency service resources for protection of critical transportation infrastructure," *Transp. Res. Rec.*, no. 2022, 2007, doi: 10.3141/2022-01.
- [11] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [12] A. Yildiz, E. Ayyildiz, A. Taskin Gumus, and C. Ozkan, "A Framework to Prioritize the Public Expectations from Water Treatment Plants based on Trapezoidal Type-2 Fuzzy Ahp Method," *Environ. Manage.*, vol. 67, no. 3, pp. 439–448, Sep. 2021, doi: 10.1007/s00267-020-01367-5.
- [13] E. Ayyildiz, A. Yildiz, A. Taskin Gumus, and C. Ozkan, "An Integrated Methodology Using Extended Swara and Dea for the Performance Analysis of Wastewater Treatment Plants: Turkey Case," *Environ. Manage.*, vol. 67, no. 3, pp. 449–467, Oct. 2021, doi: 10.1007/s00267-020-01381-7.
- [14] E. Ayyildiz and A. Taskin Gumus, "Interval-valued Pythagorean fuzzy AHP method-based supply chain performance evaluation by a new extension of SCOR model: SCOR 4.0," *Complex Intell. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 559–576, Nov. 2021, doi: 10.1007/s40747-020-00221-9.
- [15] C. Kahraman, B. Öztayşi, and S. Çevik Onar, "An Integrated Intuitionistic Fuzzy AHP and TOPSIS Approach to Evaluation of Outsource Manufacturers," *J. Intell. Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 283–297, Jan. 2020, doi: 10.1515/jisys-2017-0363.
- [16] A. Karasan, M. Erdogan, and E. Ilbahar, "Prioritization of production strategies of a manufacturing plant by using an integrated intuitionistic fuzzy AHP & TOPSIS approach," *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 510–528, Jul. 2018, doi: 10.1108/JEIM-01-2018-0001.
- [17] N. Aydin and S. Seker, "WASPAS based

MULTIMOORA method under IVIF environment for the selection of hub location,” *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 33, no. 5, pp. 1233–1256, Jun. 2020, doi: 10.1108/JEIM-09-2019-0277.

- [18] E. K. Zavadskas, J. Antucheviciene, S. H. Razavi Hajiagha, and S. S. Hashemi, “Extension of weighted aggregated sum product assessment with interval-valued intuitionistic fuzzy numbers (WASPAS-IVIF),” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 24, pp. 1013–1021, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.asoc.2014.08.031.
- [19] E. Tumsekali, E. Ayyildiz, and A. Taskin, “Interval valued intuitionistic fuzzy AHP-WASPAS based public transportation service quality evaluation by a new extension of SERVQUAL Model: P-SERVQUAL 4.0,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 186, p. 115757, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ESWA.2021.115757.
- [20] T. L. Saaty, “A scaling method for priorities in hierarchical structures,” *J. Math. Psychol.*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, Jun. 1977, doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [21] S. Duleba and S. Moslem, “Examining Pareto optimality in analytic hierarchy process on real Data: An application in public transport service development,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 116, pp. 21–30, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2018.08.049.
- [22] T. L. Saaty, “How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process,” *Interfaces (Providence)*, vol. 24, no. 6, pp. 19–43, Dec. 1994, doi: 10.1287/inte.24.6.19.
- [23] A. Yildiz, E. Ayyildiz, A. T. Gumus, and C. Ozkan, “A Modified Balanced Scorecard Based Hybrid Pythagorean Fuzzy AHP-Topsis Methodology for ATM Site Selection Problem,” *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, vol. 19, no. 02, pp. 365–384, 2020, doi: 10.1142/S0219622020500017.