

Afet Sonrası Elektronik Haberleşme Sürekliliğinde Yapay Zekâ Destekli Katmanlı Kapasite Planlaması

Emrehan Taştekin¹

Gönderilme Tarihi: 7 Nisan 2026

Kabul Tarihi: 22 Nisan 2026

Atıf | Citation: Taştekin, E. (2026). Afet sonrası elektronik haberleşme sürekliliğinde yapay zekâ destekli katmanlı kapasite planlaması. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Dergisi, 4(1). 101-121 gibi <https://doi.org/10.66643/btkdergi.1924979>

Araştırma Makalesi / Research Article

ÖZET

Afet sonrasında haberleşme altyapısının çökmesi yalnızca teknik bir arıza üretmez; sağlık, lojistik, arama-kurtarma ve kamu koordinasyonunun aynı anda zayıflamasına yol açar. Bu çalışma, ilk 24 saatte elektronik haberleşme sürekliliğinin nasıl yeniden kurulacağına odaklanan yapay zekâ destekli katmanlı bir kapasite planlama modeli önermektedir. Model, mobil baz istasyonları, taşınabilir uydu düğümleri ve İHA rölelerini tek bir karar mimarisinde bir araya getirmektedir. Yapay zekâ bileşeni, talep, kritik hizmet yoğunluğu ve erişim/izolasyon göstergelerinden bölgesel öncelik puanı üreten; siber alarm düzeyini ise risk tavanı ve etkin kapasite ayarlamalarına aktaran bir karar destek katmanı olarak kurgulanmıştır. Yöntem kısmında, literatürde tanımlanan dayanıklılık ilkeleri ile endüstri mühendisliğinin kapasite planlama, çok ölçütlü önceliklendirme ve kısıt altında kaynak tahsisi araçları birleştirilmiştir. Sayısal deney, talep artışı, kritik hizmet yoğunluğu, erişilebilirlik ve siber risk göstergeleriyle tanımlanan 12 bölgeyi sentetik bir karar ortamında yürütülmüştür. Yoğun kentsel deprem, bölgesel enerji ve erişim kesintisi ile birleşik siber-fiziksel kriz olmak üzere üç senaryo incelenmiştir. Bulgular, katmanlı stratejinin ortalama 24 saatlik ağırlıklı kapsama oranını yüzde 76,6 düzeyine çıkararak tek katmanlı çözüme göre 3,2 puan, tepkisel yaklaşıma göre 14,2 puan üstünlük sağladığını göstermektedir. İlk 90 dakikada katmanlı yapı yüzde 49,0 kapsama ulaşırken diğer iki yaklaşım yüzde 25,2 düzeyinde kalmaktadır. Performans artışı sınırlı bir maliyet artışıyla elde edilse de siber risk yüzeyinin genişlediği görülmektedir. Çalışma, afet haberleşmesinde yalnızca yeni teknoloji eklemenin değil, doğru kaynak portföyünü doğru anda devreye almanın belirleyici olduğunu ortaya koymakta; ön-konumlandırma, sıfır güven mimarisi ve dijital ikiz tabanlı tatbikatlar için uygulanabilir bir karar çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *afet haberleşmesi, yapay zekâ destekli karar verme, kapasite planlama, endüstri mühendisliği, İHA röle ağları.*

¹ ULAK Haberleşme AŞ., R&D and Technology Management Department, Ankara, erdem.demircioglu@ulakhaberlesme.com.tr, ORCID: 0000-0002-0779-0215

AI-Supported Layered Capacity Planning for Post-Disaster Electronic Communication Continuity

ABSTRACT

The collapse of communication infrastructure after a disaster creates more than a technical outage; it simultaneously weakens healthcare coordination, logistics, search and rescue, and public command functions. This study proposes an AI-supported layered capacity planning model for restoring electronic communication continuity during the first 24 hours after a disruption. The model integrates mobile base stations, portable satellite nodes, and UAV relays within a single decision architecture. The AI component is implemented as a decision-support layer that generates regional priority scores from demand, critical-service intensity, and accessibility/isolation indicators while transferring cyber-alert information into risk ceilings and effective-capacity adjustments. Methodologically, it combines resilience principles from the emergency communications literature with industrial engineering tools such as capacity planning, multi-criteria prioritization, and constrained resource allocation. The numerical experiment is conducted in a 12-zone synthetic decision environment defined by demand escalation, critical-service intensity, accessibility, and cyber-risk indicators. Three scenarios are examined: a dense urban earthquake, a regional power and access outage, and a combined cyber-physical crisis. Results show that the layered strategy raises average 24-hour weighted coverage to 76.6%, outperforming the single-layer solution by 3.2 percentage points and the reactive baseline by 14.2 points. In the first 90 minutes, the layered design reaches 49.0% weighted coverage, whereas the other two approaches remain at 25.2%. The performance gain is achieved with a limited cost increase, but the cyber exposure of the operating environment also grows. The study demonstrates that post-disaster communication resilience depends not only on adding more technology, but on activating the right resource portfolio at the right time. It therefore offers an actionable decision framework for pre-positioning, zero-trust control planes, and digital-twin-based preparedness exercises.

Keywords: *disaster communications, AI-supported decision making, capacity planning, industrial engineering, UAV relay networks.*

GİRİŞ

Afet sonrası ilk saatler, elektronik haberleşme şebekelerinin yalnızca ayakta kalma kapasitesini değil, kamu yönetiminin karar alma hızını da sınar. Baz istasyonlarının fiziksel hasar görmesi, enerji kesintileri, omurga bağlantılarının kopması ve eş zamanlı trafik yığılması bir araya geldiğinde iletişim talebi yükselir, erişilebilir kapasite ise daralır. Sonuç ağırdır. Sağlık sevkleri gecikir, saha ekipleri ortak resim üretemez, lojistik akış körleşir.

Bu tabloyu yalnızca telekom mühendisliği çerçevesinde okumak eksik kalır. Sorun aynı zamanda bir endüstri mühendisliği problemidir. Hangi taşınabilir kaynağın nereye gönderileceği, hangi bölgenin önce servis alacağı, kısıtlı bütçenin ve erişilebilir ekibin nasıl dağıtılacağı, hangi siber risk seviyesinde hangi katmanın devreye alınacağı, karar verilmesi gereken başlıklardır. Özellikle afet koşullarında zaman, maliyet, kapsama ve güvenlik arasında kurulan denge teknik olmaktan çıkarak yönetsel bir tasarım problemine dönüşmektedir.

Literatür; dayanıklılık ilkelerini, acil durum haberleşme ağlarını ve afet operasyon yönetimi araçlarını güçlü biçimde tartışmaktadır (Altay & Green, 2006; Sterbenz vd., 2010; Wang vd., 2023). Buna rağmen uygulamada karar vericinin karşısına çıkan soru daha somuttur: İlk 24 saatte sınırlı sayıda mobil baz istasyonu, taşınabilir uydu düğümü ve İHA rölesi eldeyse, bu kaynaklar hangi bileşimle ve hangi sırayla sahaya sürülmelidir? Tek bir teknolojiye odaklanan çözümler bu soruya ancak kısmi yanıt üretebilmektedir.

Bu çalışma söz konusu boşluğu kapatmak için yapay zekâ destekli katmanlı bir kapasite planlama çerçevesi önermektedir. Buradaki yapay zekâ, talep artışı, kritik hizmet yoğunluğu ve erişim/izolasyon göstergelerini birleştirerek bölgesel öncelik puanı üreten; siber alarm düzeyini ise senaryo motorunda risk tavanı ve etkin kapasite ayarlamalarına aktaran bir karar destek katmanı olarak tanımlanmıştır; sayısal deneylerde bu katman literatürden türetilen tahmini parametrelerle temsil edilmiştir. Çalışmanın üç katkısı öne çıkmaktadır. İlk katkı, elektronik haberleşme sürekliliğini mobil, uydu ve hava katmanlarını birlikte ele alan tek bir karar mimarisinde modellemesidir. İkinci katkı, maliyet, siber risk ve enerji tüketimini aynı tabloda izleyen senaryo temelli bir değerlendirme sunmasıdır. Üçüncü katkı ise sonuçları yalnızca performans farkı olarak değil, operatör ve düzenleyici düzeyde uygulanabilir hazırlık adımlarına dönüştürmesidir.

1. KURAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR

1.1. Afet Sonrası Haberleşme Sürekliliğinin Yönetim Problemi

Haberleşme dayanıklılığı, bir ağın bozulma anında hizmeti koruma, bozulma sonrasında asgari işlevi sürdürme ve kabul edilebilir sürede toparlanma kapasitesini birlikte içerir (Sterbenz vd., 2010). Bu nedenle afet sonrasındaki iletişim sorunu yalnızca hasarlı altyapıyı onarma işi değildir. Aynı anda kapasite ikamesi, yönlendirme esnekliği, geçici omurga kurulumu, enerji yedekliliği ve servis önceliklendirmesi gerekir.

Acil durum haberleşme ağlarını inceleyen kapsamlı çalışmalar, uydu bağlantıları, özel kablosuz ağlar, hücresel şebekeler ve taşınabilir düğümlerin birbirini tamamlayan özellikler sunduğunu göstermektedir (Wang vd., 2023). OECD (2025) ile ITU-T (2016) dokümanları da dayanıklılığın yedeklilik, çeşitlilik ve taşınabilir kaynak birimleriyle güçlendirilebileceğini vurgulamaktadır. Dünya Bankası'nın uygulama rehberi, iklim ve deprem riski altındaki ülkelerde telekom dayanıklılığının tasarım aşamasında ele alınmasının yaşam döngüsü maliyetini azaltabileceğini belirtmektedir (World Bank, 2024).

Buradaki kritik nokta şudur: Süreklilik tek bir sabit çözümle sağlanamaz. Mobil baz istasyonu yüksek kapasite sağlar fakat erişilebilir yol ve saha lojistiği ister. Taşınabilir uydu düğümü omurga yerine geçebilir; buna karşılık terminal sayısı arttıkça siber ve operasyonel yük de artar. İHA rolleri çok hızlı devreye alınır; ancak pil ömrü, komuta güvenliği ve hava koşulları karar kalitesini etkiler. Başarılı tasarım, bu farklılıkları bastırmak yerine portföy mantığıyla yönetir.

1.2. Endüstri Mühendisliği Bakış Açısının Katkısı

Afet operasyon yönetimi literatürü, kaynak tahsisi ve zaman baskısı altında karar verme başlıklarının OR/MS araçlarıyla uzun süredir çalışıldığını göstermektedir (Altay & Green, 2006; Galindo & Batta, 2013). Buna karşın elektronik haberleşme sürekliliği çoğu zaman ağ mühendisliğinin alt problemi gibi görülmekte, kapasite planlama ve çok ölçütlü karar verme boyutu ikinci plana düşmektedir.

Endüstri mühendisliği burada iki nedenle belirleyicidir. Birinci neden, afet ortamında her taşınabilir kaynağın alternatif kullanım değerine sahip olmasıdır. Bir mobil baz istasyonunu bir bölgeye göndermek, başka bir bölgede kapasite

açığı bırakmak anlamına gelir. İkinci neden ise performansın tek boyutlu olmasıdır. Karar verici aynı anda kapsama, konuşlandırma süresi, enerji ihtiyacı, siber risk ve maliyet göstergelerini izlemek zorundadır. Bu çalışma bu nedenle problemi bir şebeke kurulum meselesi olarak değil, çok kısıtlı bir hizmet portföyü optimizasyonu olarak ele almaktadır.

İHA'ların afet yanıtındaki rolünü inceleyen güncel derleme, bilgi toplama, teslimat ve haberleşme kurtarma işlevlerinin giderek daha fazla OR temelli modellere konu olduğunu ortaya koymaktadır (Yucesoy vd., 2025). Bu eğilim önemlidir; çünkü haberleşme kurtarma artık salt altyapı onarımı değil, dinamik bir operasyon tasarımı sorunudur.

Bu karar destek yönü, güncel yapay zekâ temelli çalışmalarla da güçlenmektedir. Soularidis, Kotis ve Vouros (2024), hayati ve zaman-kritik karar destek sistemlerinde heterojen veri bütünleştirme ve anlamsal muhakemenin saha komutanlarına gerçek zamanlı ve açıklanabilir içgörü sağlayabildiğini göstermektedir. Zeng vd. (2024) hava-yer ad hoc ağlarının uzamsal-zamansal konuşlandırmasını derin pekiştirmeli öğrenme ile optimize ederek yapay zekânın haberleşme kurtarma tasarımında yalnızca tahmin değil, konuşlandırma sıralaması açısından da değer ürettiğini ortaya koymaktadır. Benzer biçimde Dcruz, Zolotas, Greenwood ve Arana-Catania (2025), afet yönetiminde yapılandırılmış ve insan denetimini koruyan yapay zekâ karar çerçevelerinin güvenilirlik ve gerekçelendirilebilirlik açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır.

1.3. Literatürdeki Boşluk ve Çalışmanın Konumu

Literatürde belirli teknolojilere odaklanan güçlü çalışmalar bulunmaktadır. Berioli vd. (2011) uydu geri taşımanın hızlı devreye alma değerini göstermiş, Zhou vd. (2021) ise taşınabilir uydu ve mesh bileşenlerini birleştiren sahaya dönük bir post-afet mimarisi önermiştir. Zhao vd. (2025), İHA tabanlı acil durum ağlarında kapsama maksimizasyonu için derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımını test etmiştir. Wen vd. (2025), çoklu İHA röle sistemlerinde haberleşme hızını ortak biçimde optimize etmiştir. Okeukwu-Ogbonnaya vd. (2024) ise topluluk direncinin iletişim boyutunu nicelleştirmeye çalışmıştır.

Bu çalışmaların ortak sınırlılığı, çoğunun tek bir teknoloji ekseninde yoğunlaşması ve karar vericinin elindeki kaynak portföyünü bütüncül biçimde yönetmemesidir. Haberleşme sürekliliği açısından asıl soru, uydu, mobil ve hava

katmanlarının birlikte kullanıldığı hibrit yapının hangi senaryo altında nasıl davranacağıdır. Ayrıca literatürde siber riskin operasyonel çeviklik karşısında nasıl konumlanacağı, çoğu zaman açık bırakılmaktadır.

Bu makale söz konusu eksikleri üç noktada tamamlamayı amaçlamaktadır. İlk olarak, çok katmanlı kaynak portföyünü ortak bir kapasite planlama modelinde birleştirmektedir. İkinci olarak, kararları yalnızca 24 saatlik son duruma göre değil, ilk 90 dakika ve 3,5 saat gibi kritik ara dönemlere göre değerlendirmektedir. Son olarak, teknoloji seçimini yönetim ve hazırlık önerileriyle ilişkilendirmektedir. Tablo 1, çalışmanın literatürdeki konumunu özetlemektedir.

Tablo 1. Literatürde baskın eğilimler, boşluklar ve bu çalışmanın konumu

Eksen	Literatürde baskın yön	Gözlenen boşluk	Bu çalışmanın yanıtı
Teknoloji odağı	İHA, uydu veya hücre altyapı çoğu zaman ayrı ayrı inceleniyor.	Kaynak portföyü düzeyinde ortak karar yapısı sınırlı.	Mobil, uydu ve hava katmanı tek modelde birlikte ele alınmıştır.
Performans ölçütü	Kapsama veya hız çoğunlukla tekil başarı göstergesi olarak öne çıkıyor.	Maliyet, siber risk ve enerji etkisi çoğu çalışmada ikincil kalıyor.	Ağırlıklı kapsama, maliyet, siber risk ve enerji birlikte raporlanmıştır.
Zaman boyutu	Nihai durum veya tek anlık sonuçlar baskın.	İlk 90 dakika ile ilk 24 saat aynı tabloda değerlendirilmiyor.	Saatlik kapsama eğrisi kullanılarak toparlanma hızı izlenmiştir.
Karar verici seviyesi	Ağ tekniği baskın, kurumsal karar mantığı zayıf.	Operatör ve düzenleyici için uygulanabilir yol haritası eksik.	Sonuçlar ön-konumlandırma, siber yönetim ve dijital ikiz önerilerine bağlanmıştır.

2. ARAŞTIRMA TASARIMI VE YÖNTEM

2.1. Araştırma Tasarımı ve Karar Ortamı

Çalışma, gerçek saha verisiyle kalibre edilmiş ampirik bir ağ simülasyonu değil; literatürde tanımlanan afet haberleşmesi mantığını karar desteği amacıyla sayısal deneye dönüştüren analitik bir tasarımıdır. Karar ortamı 12 bölgeden oluşmaktadır. Her bölge için temel talep seviyesi, kritik hizmet yoğunluğu ve erişilebilirlik katsayısı tanımlanmıştır. Üç senaryoda bu değişkenler farklı biçimde bozulmakta, böylece hem fiziksel hasar hem de operasyonel erişim baskısı modele yansıtılmaktadır.

Ana performans ölçütü ağırlıklı kapsama oranıdır. Bu oran, her bölgedeki servis açığının yalnızca niceliğini değil, söz konusu bölgenin toplumsal ve operasyonel önceliğini de dikkate alır. Böylece hastane, lojistik düğüm veya saha koordinasyon alanı barındıran bölgelerde geri yüklenen kapasite, aynı miktardaki sıradan kullanıcı talebinden daha yüksek ağırlık almaktadır.

Karşılaştırma üç strateji üzerinde kurulmuştur. Tepkisel yaklaşım, afet sonrasında sahadan gelen ilk hasar bilgileri tamamlanmadan, eldeki mobil baz istasyonlarının en yüksek talep görülen noktalara sıralı olarak gönderildiği kural tabanlı bir çözümü temsil eder; bu stratejide uydu ve İHA desteği kullanılmaz, bölgesel öncelik puanı yalnızca karar sonrası değerlendirme için izlenir. Tek katmanlı yaklaşım, mobil baz istasyonları ile taşınabilir uydu düğümlerini aynı optimizasyon havuzunda değerlendirir; böylece karadan erişilebilen yüksek kapasiteli çözümler ile omurga bağlantısı sağlayan uydu düğümleri arasında maliyet ve risk dengesi kurulmaya çalışılır. Katmanlı yaklaşım ise bu iki kaynağa İHA rölelerini ekleyerek ilk 90 dakikadaki hızlı kapsama gereksinimini, 3,5 saatlik uydu destekli toparlanmayı ve 24 saatlik mobil kapasite genişlemesini ardışık bir karar mantığı içinde bütünleştirir.

Stratejiler arasındaki fark yalnızca kullanılan ekipman sayısından kaynaklanmamaktadır. Tepkisel strateji düşük siber risk ve düşük maliyet üretse de erken saatlerde kapsama açığını büyütmektedir. Tek katmanlı strateji uydu düğümleri sayesinde omurga ikamesi sağlayarak orta faz performansını yükseltir; ancak erişimi tamamen kopan veya kısa süreli kapsama ihtiyacı olan bölgelerde hava katmanı bulunmadığı için sınırlı kalır. Katmanlı strateji, hızlı fakat sınırlı süreli İHA rölelerini, daha kararlı uydu geri taşıma bileşenleri ve yüksek kapasiteli

mobil baz istasyonlarıyla tamamlayarak zaman, kapasite ve risk arasında portföy temelli bir denge kurmayı hedeflemektedir.

2.2. Yapay Zekâ Destekli Katmanlı Karar Mimarisi

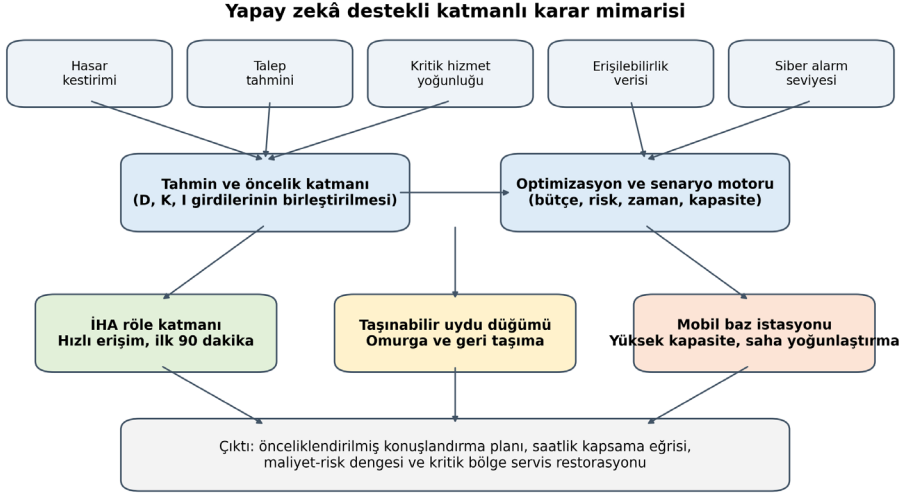
Önerilen mimaride yapay zekâ doğrudan saha yerine geçen tam otonom bir karar verici değildir. Daha gerçekçi bir kurgu tercih edilmiştir. Hasar kestirimi, anlık trafik tahmini, kritik hizmet yoğunluğu ve erişim güçlüğü gibi veriler önce tahmin katmanında birleştirilir. Bu katman, operasyon merkezine hangi bölgelerin önce servis alması gerektiğini gösteren bir öncelik puanı üretir. Ardından optimizasyon motoru, kullanılabilir taşınabilir kaynakları bu önceliklere göre yerleştirir.

Bölge öncelik puanı P_i , normalize talep düzeyi D_i , kritik hizmet yoğunluğu K_i ve izolasyon göstergesi I_i kullanılarak oluşturulmuştur. Bu puanlama tek bir değişkenin tüm kararı yutmasını önler ve afet merkezindeki kritik bölgeleri görünür kılar. Ağırlıklı kapsama oranı ise öncelik puanları ile servis açığı arasındaki ilişkiyi izleyerek kararı yalnızca nüfus yoğunluğuna indirgememektedir.

Teknik olarak bu süreç iki aşamada işlemektedir: ilk aşamada hasar kestirimi ve trafik tahmini çıktıları D_i , K_i ve I_i girdilerinin güncellenmesinde kullanılır; ikinci aşamada bu girdiler $P_i = 0,45D_i + 0,40K_i + 0,15I_i$ öncelik fonksiyonunda birleştirilir. Talep ve kritik hizmet yoğunluğuna daha yüksek ağırlık verilmesi, afet sonrası ilk saatlerde trafik sıçraması ve kritik servis sürekliliğinin belirleyici olduğuna işaret eden literatürle uyumludur (ITU-T, 2016; Wang vd., 2023; World Bank, 2024); izolasyon değişkeni ise erişim baskısını görünür kılmak amacıyla pozitif fakat daha düşük bir katsayıyla tutulmuştur (Altay & Green, 2006; Galindo & Batta, 2013). Siber alarm seviyesi formülde ayrı bir öncelik terimi olarak değil, Şekil 1’de gösterildiği üzere senaryo motoruna aktarılan bir risk girdisi olarak ele alınmış; böylece siber baskı, bölge sıralamasını dolaylı biçimde risk üst sınırı ve etkin kapasite azaltımları üzerinden etkilemiştir (Sterbenz vd., 2010; OECD, 2025).

Şekil 1’de görülen mimaride İHA katmanı ilk 90 dakikaya, taşınabilir uydu katmanı ilk birkaç saate, mobil baz istasyonu katmanı ise daha yüksek kapasiteli orta dönem toparlanmaya hizmet etmektedir. Böylece model, farklı kaynakların hız ve kapasite karakterini birbirinin yerine koymak yerine ardışık ve tamamlayıcı bir kurgu olarak ele alır.

Şekil 1. Yapay zekâ destekli katmanlı karar mimarisi



2.3. Karar Modeli, Kısıtlar ve Performans Göstergeleri

Her senaryoda önce bölgesel servis açığı biçiminde hesaplanmıştır. Sonraki aşamada karar modeli, ağırlıklı karşılanan servis miktarını azami yapacak biçimde kurulmuştur. Amaç fonksiyonu, öncelik-ağırlıklı servis miktarını yükseltirken maliyet, siber risk ve enerji için küçük ceza katsayıları içermektedir. Bu yapı, en yüksek kapsama peşinde koşarken bütçe ve güvenlik sınırlarını görünmez kılmaktadır.

Modelde her kaynak birimi en fazla bir konuşlandırma noktasına atanabilmektedir. Her kaynak için kapasite üst sınırı, kapsama yarıçapı ve erişilebilirlik koşulu tanımlanmıştır. Aynı tür kaynağın aynı sahada aşırı kümelenmesini önlemek amacıyla ek kısıtlar kullanılmıştır. Senaryo tasarımı kapsamında bütçe tavanı, siber risk üst sınırı ve kapasite çarpanları farklılaştırılmıştır. Birleşik siber-fiziksel kriz senaryosunda uydu ve İHA katmanlarının etkin kapasitesi özellikle düşürülmüştür.

Optimizasyon motoru, her bir taşınabilir kaynağın en çok bir bölgeye atanabildiği ve kapsama kararlarının ikili değişkenlerle izlendiği 0-1 karma tamsayılı doğrusal bir atama modeli olarak kurulmuştur. Amaç fonksiyonundaki 0,015C, 0,020R ve 0,010E ceza katsayıları kapsamayı birincil hedef olarak korurken maliyet, siber risk ve enerji baskılarını görünür tutacak şekilde

seçilmiş; bu katsayılar veri güdümlü öğrenmeden değil, literatürde vurgulanan dayanıklılık-güvenlik gerilimiyle uyumlu analitik bir kalibrasyondan türetilmiştir (Sterbenz vd., 2010; OECD, 2025; World Bank, 2024). Tablo 2'deki devreye alma süreleri ile kapasite, maliyet ve risk endeksleri de saha ölçümünün birebir karşılığı olarak değil, taşınabilir uydu geri taşıma, mobil konuşlandırma ve İHA röle kullanımına ilişkin operasyon profillerinin normalize edilmiş karşılıkları olarak tanımlanmıştır (Berioi vd., 2011; Zhou vd., 2021; Wang vd., 2023; Zhao vd., 2025; Wen vd., 2025).

Kapsama eğrileri 0, 1,5, 3,5, 6, 12 ve 24 saat noktalarında hesaplanmıştır. Bu zaman noktaları kaynak türlerinin ortalama devreye alma süreleriyle ilişkilidir. Buna ek olarak maliyet endeksi, siber risk endeksi ve enerji endeksi raporlanmıştır. Tablo 2 katman özelliklerini, Tablo 3 ise senaryo kurgularını göstermektedir.

Tablo 2. Kaynak katmanlarının teknik ve operasyonel özellikleri

Kaynak	Adet	Devreye alma süresi (saat)	Kapasite endeksi	Erişim çapı	Maliyet endeksi	Siber risk endeksi	Temel rol
Mobil baz istasyonu	4	6,0	165	1,05	9,0	2,8	Yoğun bölgelerde orta dönem yüksek kapasite
Taşınabilir uydu düğümü	4	3,5	95	0,80	6,2	4,2	Geri taşıma ve omurga ikamesi
İHA rölesi	8	1,5	78	1,25	4,2	4,8	İlk saatlerde hızlı kapsama genişletme

Tablo 3. Senaryo kurguları ve operasyonel baskın kısıtlar

Senaryo	Kriz örüntüsü	Bütçe endeksi	Risk üst sınırı	Baskın operasyonel kısıt	Öncelikli bölge karakteri
S1	Yoğun kentsel deprem	44	70	Karayolu erişiminin kırılması ve çekirdek talep yığılması	Sağlık, lojistik ve koordinasyon düğümleri
S2	Bölgesel enerji ve erişim kesintisi	42	68	Yaygın enerji düşüşü ve geciken kara konuşlandırması	Dağıtık talep cepleri ve yedek enerji gereksinimi
S3	Birleşik siber-fiziksel kriz	40	58	Uydu ve İHA katmanında kapasite düşüşü, daha sıkı risk baskısı	Kritik hizmet bölgeleri ile komuta trafiği odakları

3. BULGULAR

3.1. Ortalama Kapsama Performansı

Ortalama sonuçlar, katmanlı yaklaşımın özellikle erken saatlerde belirgin avantaj yarattığını göstermektedir. Şekil 2'ye göre tepkisel ve tek katmanlı stratejiler ilk 1,5 saatte yüzde 25,2 düzeyinde kalırken katmanlı yapı yüzde 49,0 kapsama ulaşmaktadır. Farkın kaynağı açıktır. İHA röleleri hızlı devreye alınabilmekte ve erişim yolları açılmadan da ilk iletişim omurgasını kurabilmektedir.

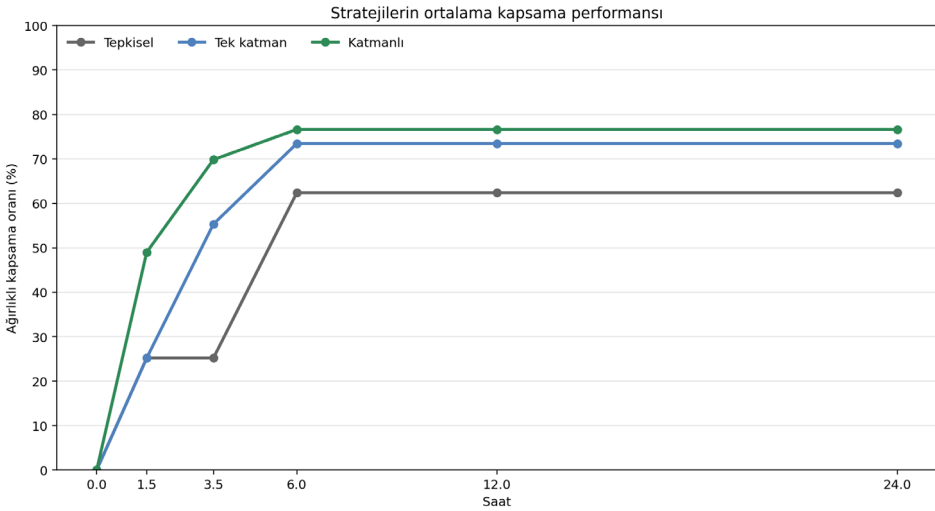
Strateji düzeyinde bu fark, modelin kaynakları yalnızca kapasite büyüklüğüne göre değil, devreye alma süresine göre de sıralamasından doğmaktadır. Tepkisel çözümde mobil baz istasyonu yüksek kapasite verse de 6 saatlik konuşlandırma süresi erken kapsama boşluğu bırakır; tek katmanlı çözüm uydu düğümleriyle

bu boşluğu kısmen azaltır; katmanlı çözüm ise İHA rollerini geçici köprü olarak kullanarak ilk müdahale ve orta dönem toparlanma arasında süreklilik sağlar.

3,5 saat noktasında fark daha da açılmaktadır. Tek katmanlı strateji yüzde 55,3 ortalama kapsama üretirken katmanlı yapı yüzde 69,8 düzeyine çıkmaktadır. Mobil baz istasyonları henüz sahaya tam yayılmadan uydu ve hava katmanlarının devreye alınması, karar modelinin zaman boyutunu neden ayrı bir performans eksenini ele aldığını açık biçimde göstermektedir.

24 saat sonunda katmanlı stratejinin ortalama ağırlıklı kapsaması yüzde 76,6 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tek katmanlı çözümden 3,2 puan, tepkisel çözümden 14,2 puan daha yüksektir. İyileşme yalnızca nihai seviyede değil, toparlanma eğrisinin eğiminde de görülmektedir. Başka bir deyişle model, hizmeti daha çok değil, daha erken geri getirmektedir.

Şekil 2. Stratejilerin saatlik ortalama ağırlıklı kapsama performansı



3.2. Senaryo Bazlı Karşılaştırma

Tablo 4 ve Şekil 3, strateji performansının senaryoya göre değiştiğini göstermektedir. Yoğun kentsel deprem senaryosunda katmanlı çözüm yüzde 80,9 ile en yüksek 24 saatlik kapsama düzeyine ulaşmıştır. Bu senaryoda sağlık ve koordinasyon talebinin keskin biçimde yoğunlaştığı çekirdek bölgelerde mobil kapasite ile hızlı hava erişiminin birlikte kullanılması en yüksek getiriye sağlamaktadır.

Bölgesel enerji ve erişim kesintisinde katmanlı yapının erken saatlerdeki üstünlüğü daha da görünürdür. İlk 1,5 saatte yüzde 62,5 kapsama, karayoluna bağımlı kaynakların gecikmesini telafi etmektedir. Buradaki mantık nettir. Erişim bozuldukça karadan gelen yüksek kapasiteli çözümün değeri korunur; fakat ilk müdahale avantajı hava ve uydu katmanına kayar.

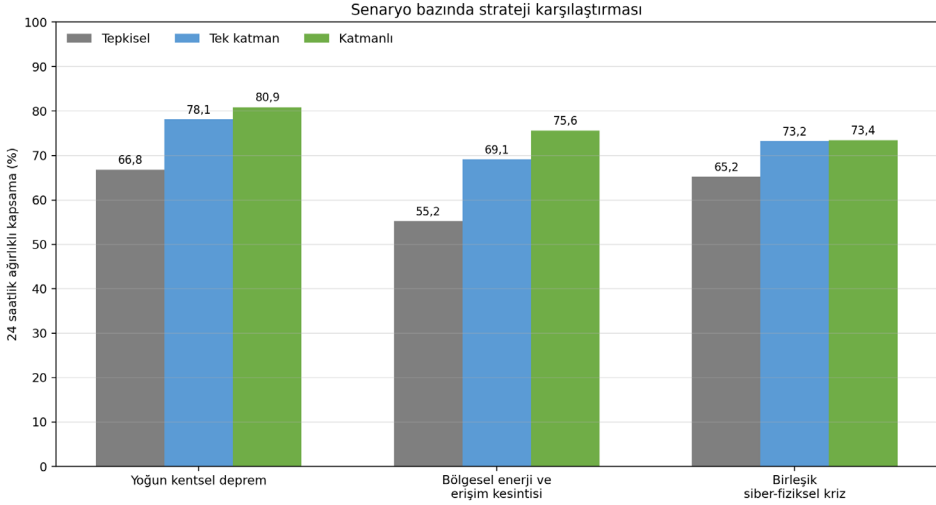
S2 senaryosunda 3,5 saatten 24 saate doğru görülen sınırlı kapsama gerilemesi, modelin başarısızlığından çok, ağırlıklı kapsama ölçütünün geçici hava/uydu üstünlüğünden kara destekli daha dengeli bir portföye geçişi yansıtmıştı. Erken fazda İHA ve taşınabilir uydu birimleri, yüksek öncelikli dağıtım cepleri hızlıca kapsayarak yüzde 79,2 düzeyine çıkmaktadır; ancak yaygın enerji düşüşü uzadıkça bu geçici katmanların sürdürülebilirliği azalmakta, kara konuşlandırmasının gecikmesiyle kapsama daha geniş alana yayılırken ağırlıklı öncelik yoğunluğu seyrelmektedir. Bu nedenle 24 saat sonunda toplam servis coğrafi olarak genişlese de yüksek öncelikli bölgeler üzerinden hesaplanan ağırlıklı kapsama yüzde 75,6 seviyesine çekilmektedir.

Birleşik siber-fiziksel kriz senaryosunda katmanlı strateji yine en iyi sonucu vermektedir; ancak fark diğer iki senaryoya kıyasla daralmaktadır. Bunun nedeni, uydu ve İHA katmanlarının daha yüksek siber risk ve daha düşük etkin kapasiteyle çalışmasıdır. Model bu nedenle her senaryoda aynı teknoloji bileşimini dayatmamış, risk üst sınırı sıkılaştığında daha temkinli bir portföy seçmiştir.

Tablo 4. Senaryo bazında strateji sonuçları

Senaryo	Strateji	1,5 saat (%)	3,5 saat (%)	24 saat (%)	Maliyet	Siber risk	Enerji
S1	Tepkisel	28,1	28,1	66,8	35,0	11,4	24,8
S1	Tek katman	28,1	58,7	78,1	41,0	21,0	31,4
S1	Katmanlı	48,0	68,8	80,9	43,8	27,6	36,5
S2	Tepkisel	21,0	21,0	55,2	34,5	10,8	25,6
S2	Tek katman	21,0	49,3	69,1	40,8	23,8	30,6
S2	Katmanlı	62,5	79,2	75,6	42,0	31,9	35,2
S3	Tepkisel	26,5	26,5	65,2	40,0	15,5	26,4
S3	Tek katman	26,5	58,0	73,2	38,5	27,5	30,4
S3	Katmanlı	36,5	61,5	73,4	41,1	33,0	36,0

Şekil 3. Senaryo bazında 24 saatlik ağırlıklı kapsama karşılaştırması



3.3. Maliyet, Risk ve Enerji Dengesi

Katmanlı tasarımın üstün performansı bedelsiz değildir. Ortalama maliyet endeksi 42,3 iken tepkisel çözümde bu değer 36,5'tir. Fark yüzde 15,9 düzeyindedir. Buna karşılık siber risk endeksi 12,6'den 30,8 seviyesine yükselmektedir. Daha fazla taşınabilir düğüm, daha geniş bir komuta yüzeyi anlamına gelmektedir.

Bu bulgu iki şekilde okunabilir. İlk yorum, yüksek siber risk nedeniyle katmanlı mimariden kaçınmak gerektiği yönündedir. Bu çalışma bu sonuca katılmamaktadır. Daha güçlü yorum, teknolojik çevikliğin yönetim mimarisi güçlendirilmeden sürdürülemeyeceğidir. Sorun İHA veya uydu katmanının kendisi değil; bu katmanları güvenli biçimde yönetecek kimlik, segmentasyon ve denetim mekanizmalarının eksikliğidir.

Enerji endeksi de benzer bir gerilime işaret etmektedir. Katmanlı yapıda ortalama enerji endeksi 35,9 düzeyine çıkarken, tepkisel yaklaşım 25,6 seviyesinde kalmaktadır. Bu nedenle saha planlamasında yalnızca haberleşme ekipmanının değil, taşınabilir enerji ve yakıt lojistiğinin de aynı karar tablosunda düşünülmesi gerekir.

3.4. Duyarlılık Analizi

S1 senaryosu üzerinde yapılan duyarlılık analizi, modelin hangi girdilere daha hassas olduğunu göstermektedir. Tablo 5 ve Şekil 4'e göre bütçenin yüzde 10 daraltılması 24 saatlik kapsamı 80,9'dan 76,7'ye çekmektedir. Buna karşılık bütçenin yüzde 10 artırılması kapsama oranını 84,8'e yükseltmektedir. İlk faz yatırımlarının doğrusal olmayan ama somut bir performans karşılığı ürettiği burada açıkça görülmektedir.

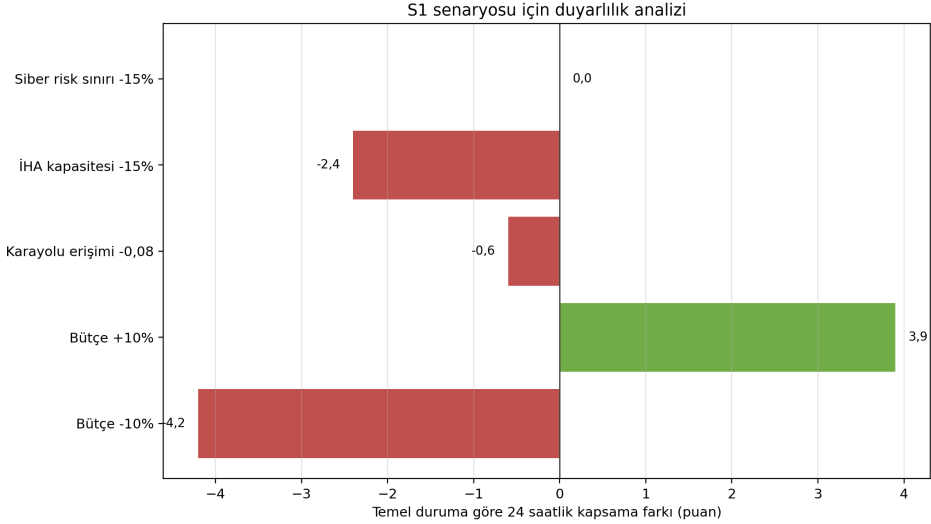
Karayolu erişiminin 0,08 puan daha bozulduğu durumda kapsama 80,3'e gerilerken siber risk endeksi 34,4'e çıkmaktadır. Sistem servis düzeyini büyük ölçüde koruyabilmek için daha çok hava ve uzay destekli çözüme yaslanmakta, bu da güvenlik yükünü artırmaktadır. İHA kapasitesinin yüzde 15 azaltılması ise performansı 78,5'e düşürmektedir. Erken müdahale katmanının kapasitesi azaldığında toplam eğri aşağı kaymaktadır.

İlginç bir bulgu, siber risk sınırının yüzde 15 daraltılmasının bu senaryoda çözümü değiştirmemesidir. Bu durum modelin S1 temel çözümünde risk tavanına göre rahat bir tampon bıraktığını düşündürmektedir. Dolayısıyla her senaryoda belirleyici darboğaz aynı değildir. Bazı durumlarda bütçe, bazı durumlarda erişim, bazı durumlarda ise siber güvenlik baskın kısıt haline gelmektedir.

Tablo 5. S1 senaryosu için duyarlılık analizi sonuçları

Durum	24 saatlik kapsama (%)	Maliyet	Siber risk	Kısa yorum
Temel durum	80,9	43,8	27,6	Dengeli ve yüksek kapsama sağlayan temel çözüm
Bütçe -10%	76,7	39,6	22,8	Erken müdahale katmanı zayıflıyor
Bütçe +10%	84,8	48,0	32,4	Ek kaynaklar kısa sürede ek kapsama üretiyor
Karayolu erişimi -0,08	80,3	43,2	34,4	Sistem hava ve uydu katmanına daha fazla yükleniyor
İHA kapasitesi -15%	78,5	43,8	27,6	İlk saat etkisi zayıflıyor, toparlanma eğrisi aşağı kayıyor
Siber risk sınırı -15%	80,9	43,8	27,6	Temel çözüm bu eşikte tampona sahip

Şekil 4. S1 senaryosunda temel duruma göre kapsama farkları



4. TARTIŞMA VE UYGULAMA ÖNERİLERİ

4.1. Operatör Düzeyinde Ön-Konumlandırma ve Portföy Tasarımı

Bulgular, taşınabilir haberleşme kaynaklarının tekil birer ekipman olarak değil, önceden tasarlanmış bir portföy olarak yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Operatörler ve kamu kurumları kritik bölge kümelerini belirlemeli, mobil baz istasyonu, taşınabilir uydu düğümü ve İHA röle sayısını bu kümelerin talep profiline göre önceden eşleştirmelidir. Böyle bir hazırlık yapılmadığında ilk saatlerde karar verme sahada doğaçlamaya dönüşür. Bu bulgu, taşınabilir ve konuşlandırılabilir kaynak birimlerinin önceden planlanmasının toparlanma hızını artırdığını vurgulayan ITU-T (2016), Berioli vd. (2011) ve World Bank (2024) ile uyumludur.

Ön-konumlandırma yalnızca depolama kararı değildir. Hangi ekibin hangi kaynağı kaç saat içinde işleteceği, hangi izin süreçlerinin önceden tamamlanacağı ve karşılıklı yardım protokollerinin nasıl işleyeceği de bu tasarımın parçasıdır. S2 senaryosu bunu net biçimde göstermektedir. Karayolu erişimi bozulduğunda en iyi ekipman en yakın ekipman olmayabilir; en hızlı devreye alınabilir ekipman olabilir. S2 senaryosunda gözlenen sınırlı gerileme de erişim ve enerji darboğazı uzadığında erken fazda değer üreten hava ve uydu katmanlarının tek başına ye-

terli olmadığını, portföy tasarımının sürdürülebilir enerji ve kara lojistiğiyle birlikte düşünülmesi gerektiğini göstermektedir. Bu sonuç, taşınabilir uydu ve hava bileşenlerinin tamamlayıcı ama tek başına kalıcı olmayan rolünü vurgulayan Wang vd. (2023) ve Zhou vd. (2021) ile de örtüşmektedir.

4.2. Siber Güvenlik ve Ayrık Yönetim Kanalları

Katmanlı haberleşme toparlanması, siber güvenliği ek bir modül gibi değil, işletme önkoşulu gibi ele almak zorundadır. İHA komuta kanalları, taşınabilir uydu terminalleri ve saha baz istasyonları için cihaz kimliği, karşılıklı sertifika doğrulaması, imzalı konfigürasyon dosyaları ve ayrık yönetim ağı gereklidir. Sıfır güven yaklaşımı özellikle geçici kurulumlarda önemlidir; çünkü afet anında en sık yapılan hata, hizmeti hızla ayağa kaldırmak adına denetimi gevşetmektir.

Literatürdeki sıfır güven örnekleri, bu önerinin yalnızca genel bir güvenlik söylemi olmadığını göstermektedir. Rose vd. (2020) tarafından hazırlanan NIST SP 800-207, güvenin ağ konumundan türetilmemesi; kullanıcı, cihaz ve hizmet erişimlerinin oturum bazında dinamik politika ile doğrulanması gerektiğini belirtir. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA, 2023) tarafından sunulan sıfır güven olgunluk modeli ise kimlik, cihaz, ağ, uygulama/iş yükü ve veri sütunlarında gelenekselden optimal düzeye uzanan uygulanabilir örnekler verir. National Institute of Standards and Technology (NIST, 2025) SP 1800-35 uygulama rehberi de 24 işbirlikçiyle oluşturulan 19 örnek sıfır güven mimarisi uygulamasında kimlik yönetimi, mikrosegmentasyon, yazılım tanımlı çevre ve SASE bileşenlerini birlikte göstererek geçici afet haberleşmesi bileşenlerinin kimlik temelli ve sürekli denetlenen bir kontrol düzlemine bağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın risk bulgusu, katmanlı yapının reddedilmesini değil, güvenli varsayılanlarla tasarlanmasını önermektedir. Kritik komut düzlemi veri düzleminde ayrılmalı, geçici ağ bileşenleri varsayılan olarak en düşük yetkiyle açılmalı ve tüm güncellemeler imzalı paketlerle yapılmalıdır. Afet bağlamında sıfır güven uygulaması, İHA komuta terminalinin veya taşınabilir uydu düğümünün yalnızca sahada bulunduğu için güvenilir sayılmamasını; her komut, telemetri ve yapılandırma isteğinin cihaz kimliği, görev rolü, zaman penceresi ve güncel risk sinyaliyle yeniden yetkilendirilmesini gerektirir. Böylece çeviklik ile güvenlik arasında daha gerçekçi bir denge kurulabilir. Bu yorum, çeşitlilik ve yedeklilik kazanımlarının aynı zamanda yeni saldırı yüzeyleri üretebileceğini vurgulayan Sterbenz vd. (2010) ile OECD (2025) bulgularıyla tutarlıdır.

4.3. Dijital İkiz, AIOps ve Kurumsal Öğrenme

Yapay zekâ destekli karar katmanının gerçek değeri, afet anından önce başlar. Operatörün canlı topolojisini, kritik kullanıcı yoğunluğunu, enerji yedeklerini ve taşınabilir kaynak envanterini birlikte gösteren bir dijital ikiz ortamı oluşturulduğunda tatbikatlar salt sunum egzersizi olmaktan çıkar, kurumsal öğrenme aracına dönüşür. Böyle bir yapı, hangi bölgede hangi darboğazın düzenli olarak tekrar ettiğini de görünür kılar. Lagap ve Ghaffarian (2024), dijital ikiz temelli afet yönetimi çalışmalarında gerçek zamanlı modelleme ve senaryo testlerinin özellikle toparlanma ve kaynak tahsisi aşamalarında kurumsal öğrenmeyi hızlandırdığını göstermektedir.

AIOps tabanlı erken uyarı sistemleri, trafik sıçraması, bağlantı kopması, enerji düşüşü ve anormal kontrol düzlemi hareketlerini birlikte okuyarak öncelik puanını dinamik biçimde besleyebilir. Bu durumda optimizasyon motoru statik bir model olmaktan çıkar, sahadaki değişimi yansıtan canlı bir karar panosuna dönüşür. Tablo 6, bu dönüşüm için aşamalı bir uygulama yol haritası önermektedir. Bu yaklaşım, heterojen ve akışkan verinin gerçek zamanlı entegrasyonunu kritik gören Soularidis vd. (2024) ile insan denetimini kaybetmeden yapılandırılmış yapay zekâ karar mantığı öneren Dcruz vd. (2025) çizgisiyle uyumludur.

Tablo 6. Katmanlı afet haberleşmesi için uygulama yol haritası

Dönem	Öncelikli iş paketi	Beklenen çıktı	Başlıca sorumlu küme
0-3 ay	Kritik bölge haritası, taşınabilir kaynak envanteri ve ortak veri sözlüğü hazırlanması	Talep ve öncelik verisinin standartlaştırılması	Operatör, kamu otoritesi, afet koordinasyon birimi
3-6 ay	Ön-konumlandırma planı, karşılıklı yardım protokolü ve saha tatbikatı	İlk 6 saat için doğrulanmış konuşlandırma senaryoları	Operatör saha ekipleri ve lojistik birimleri
6-12 ay	Dijital ikiz ortamı ve canlı karar panosu kurulumu	Senaryo bazlı kapasite planlamasının kurumsallaşması	Şebeke planlama, veri analitiği ve operasyon merkezi
12 ay ve sonrası	Sıfır güven yönetim düzlemi, imzalı konfigürasyon ve sürekli siber tatbikat	Çeviklik ile güvenlik arasında sürdürülebilir denge	Siber güvenlik, tedarik zinciri ve denetim birimleri

5. SONUÇ

Bu çalışma, afet sonrası elektronik haberleşme sürekliliğinin çok katmanlı ve çok ölçütlü bir karar problemi olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Literatür temelli sayısal deney, katmanlı portföy yaklaşımının ortalama 24 saatlik ağırlıklı kapsama oranını yüzde 76,6 düzeyine çıkardığını, özellikle ilk 90 dakikada belirgin hız kazancı sağladığını ortaya koymuştur. Kritik fark yalnızca daha yüksek kapasite kurmak değildir. Zaman profili farklı kaynakları ardışık biçimde devreye almaktır.

Çalışmanın temel katkısı, mobil baz istasyonu, taşınabilir uydu düğümü ve İHA rölesini ortak bir endüstri mühendisliği çerçevesine yerleştirmesidir. Bu çerçeve, teknoloji tercihini bütçe, siber risk, erişilebilirlik ve enerji kısıtlarıyla aynı masaya taşımaktadır. Bulgular, katmanlı mimarinin etkili olduğunu; ancak güvenlik ve yönetim düzenekleri güçlendirilmeden sürdürülebilir olmayacağını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, haberleşme dayanıklılığı ekipman listesi değil, kurumsal hazırlık tasarımıdır.

Çalışmanın sınırları açıktır. Model gerçek bir operatör topolojisine bağlanmamış, talep ve hasar verileri literatürden türetilmiş parametrelerle temsil edilmiştir. Bu nedenle sonuçlar belirli bir şebekenin birebir performans tahmini olarak değil, karar verme mantığını test eden genellenebilir bir analiz olarak okunmalıdır. Gelecek araştırmalarda gerçek trafik telemetrisi, meteorolojik kısıtlar, yol ağındaki dinamik tıkanıklık ve kurumlar arası koordinasyon maliyetleri modele eklenebilir. Buna rağmen burada elde edilen sonuçlar, afet haberleşmesinde en kritik yatırımın yeni bir cihaz satın almak değil, kaynak portföyünü önceden tasarlamak olduğunu güçlü biçimde göstermektedir.

KAYNAKÇA

Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475-493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>

Beroli, M., Caus, M., Corazza, G. E., de Sanctis, M., Ferrante, A., Gaudenzi, R., Salvadori, C., Vanelli-Coralli, A., & Wietfeld, C. (2011). WISECOM: A rapidly deployable satellite backhauling system for emergency situations. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 29(5), 419-440. <https://doi.org/10.1002/sat.982>

Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (2023). Zero Trust Maturity Model: Version 2.0. <https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/zero-trust-maturity-model>

Dcruz, J. G., Zolotas, A., Greenwood, N. R., & Arana-Catania, M. (2025). Structured AI decision-making in disaster management. *Scientific Reports*, 15, 32093. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15317-w>

Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.039>

ITU Telecommunication Standardization Sector. (2016). Recommendation ITU-T L.392: Disaster management for improving network resilience and recovery with movable and deployable information and communication technology (ICT) resource units. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.392/en>, 17.02.2026

Lagap, U., & Ghaffarian, S. (2024). Digital post-disaster risk management twinning: A review and improved conceptual framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104629. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104629>

National Institute of Standards and Technology. (2025). Implementing a zero trust architecture (NIST Special Publication 1800-35). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1800-35>

Okeukwu-Ogbonnaya, A., Amariuca, G., Natarajan, B., & Kim, H. J. (2024). Towards quantifying the communication aspect of resilience in disaster-prone communities. *Scientific Reports*, 14, 8837. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59192-3>

OECD. (2025). Enhancing the resilience of communication networks. <https://doi.org/10.1787/d6920477-en>

Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero trust architecture (NIST Special Publication 800-207). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>

Soularidis, A., Kotis, K. I., & Vouros, G. A. (2024). Real-time semantic data integration and reasoning in life- and time-critical decision support systems. *Electronics*, 13(3), 526. <https://doi.org/10.3390/electronics13030526>

Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Cetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J. P., Schöller, M., & Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8), 1245-1265. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>

Wang, Q., Li, W., Yu, Z., Abbasi, Q., Imran, M., Ansari, S., Sambo, Y., Wu, L., Li, Q., & Zhu, T. (2023). An overview of emergency communication networks. *Remote Sensing*, 15(6), 1595. <https://doi.org/10.3390/rs15061595>

Wen, C., Chen, G., Gu, X., & Wang, W. (2025). Joint optimization of communication rates for multi-UAV relay systems. *Complex & Intelligent Systems*, 11, 289. <https://doi.org/10.1007/s40747-025-01910-z>

World Bank. (2024). Resilient telecommunications infrastructure: A practitioner's guide. <https://hdl.handle.net/10986/42290>, 14.02.2026

Yucesoy, E., Balcik, B., & Coban, E. (2025). The role of drones in disaster response: A literature review of operations research applications. *International Transactions in Operational Research*, 32(2), 545-589. <https://doi.org/10.1111/itor.13484>

Zeng, Y., Tan, X., Sha, M., Hussain, Z. K., Lin, T., Tu, J., Wang, H., Liu, B., Li, C., Huang, F., & Sha, Z. (2024). The study of DDPG based spatiotemporal dynamic deployment optimization of Air-Ground ad hoc network for disaster emergency response. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128, 103708. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103708>

Zhao, L., Liu, X., & Shang, T. (2025). Maximizing coverage in UAV-based emergency communication networks using deep reinforcement learning. *Signal Processing*, 230, 109844. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109844>

Zhou, J., Zhou, C., Kang, Y., & Tu, S. (2021). Integrated satellite-ground post-disaster emergency communication networking technology. *Natural Hazards Research*, 1(1), 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2020.12.002>