



Makale Türü/ Article Type: Araştırma
Doi: 10.36442/AMADER.2026.127

CANLI KONSER SİSTEMLERİNDE AĞ ALTYAPISI: DİJİTAL SES İLETİM PROTOKOLLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI İNCELEMESİ Serkan ÇOLAK¹

Received/Makale Geliş: 18.12.2025

Published /Yayınlanma: 12.01.2026

Atf/Citation: Çolak, S. (2026). Canlı Konser Sistemlerinde Ağ Altyapısı: Dijital Ses İletim Protokollerinin Karşılaştırmalı İncelemesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Akademik Müzik Araştırmaları Dergisi*, 23, 2026, ss.157-167 Doi: 10.36442/AMADER.2026.127

Öz

Profesyonel canlı ses endüstrisi, son yirmi yılda analog çoklu kablo sistemlerinden ağ tabanlı dijital ses iletim çözümlerine köklü bir dönüşüm yaşamaktadır. Bu çalışmanın amacı; konser salonları, festivaller ve yayın kuruluşlarında yaygın biçimde kullanılan beş temel dijital ses iletim protokolünü [MADI (AES10), AES50, Dante, AVB/MILAN ve AES67] performans kriterleri ve uygulama senaryoları açısından karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Araştırma, sistematik literatür taraması yöntemiyle gerçekleştirilmiş; akademik veri tabanlarından (Web of Science, IEEE Xplore, Google Scholar) ve profesyonel yayınlardan elde edilen kaynaklar analiz edilmiştir. Protokoller; gecikme süreleri, kanal kapasitesi, saat uyumlama yöntemleri, fiziksel katman özellikleri, ağ mimarileri ve sistem genişletme kapasiteleri açısından sistematik olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, her protokolün farklı uygulama senaryolarında belirgin avantajlar ortaya koyduğunu göstermektedir: MADI ve AES50, 60-62.5 µs mertebesindeki uçtan uca gecikmeleriyle ultra-düşük gecikme gerektiren canlı uygulamalarda; Dante, yüksek kanal kapasitesi ve esnek IP tabanlı yapısıyla büyük ölçekli prodüksiyonlarda; AVB/MILAN, öngörülebilir gecikme garantisi ve nanosaniye hassasiyetindeki saat uyumlamasıyla dağıtık hoparlör dizileri ve konumsal ses uygulamalarında; AES67 ise farklı IP tabanlı ses (Audio over IP, AoIP) protokolleri arasında birlikte çalışabilirliğin kritik olduğu karma sistemlerde öne çıkmaktadır. Tartışma bölümünde, her protokolün teknik ve operasyonel boyutları derinlemesine incelenmiş; gerçek dünya uygulama senaryoları ve vaka analizleriyle somutlaştırılmıştır. Sonuç olarak; protokol seçiminde tek bir “en iyi” çözüm aramak yerine, uygulama bağlamına özgü gereksinimlerin sistematik biçimde analiz edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dijital Ses İletimi, Canlı Konser Ses Sistemleri, Ses Protokolleri, Ses Ağı Mimarisi.

¹ Ankara Müzik ve Güzel Sanatlar Üniversitesi, Müzik Bilimleri ve Teknolojileri, Müzik Teknolojisi, Ankara, Türkiye, serkancolak@mgu.edu.tr: ORCID ID: 0000-0001-5445-6378

“Network Infrastructure in Live Concert Systems: A Comparative Analysis of Digital Audio Transmission Protocols”

Serkan ÇOLAK²

Abstract

The professional live sound industry has undergone a fundamental transformation from analog multicore cable systems to network-based digital audio transmission solutions over the past two decades. The aim of this study is to compare five fundamental digital audio transmission protocols [MADI (AES10), AES50, Dante, AVB/MILAN, and AES67] in terms of performance criteria and application scenarios in concert halls, festivals, and broadcasting facilities. The research was conducted through systematic literature review methodology, analyzing sources obtained from academic databases (Web of Science, IEEE Xplore, Google Scholar) and professional publications. Protocols were systematically evaluated in terms of latency, channel capacity, synchronization mechanisms, physical layer characteristics, network architectures, and scalability. Findings reveal that each protocol offers distinct advantages in different application scenarios: MADI and AES50 excel in ultra-low latency live applications with end-to-end latencies of 60-62.5 μ s; Dante predominates in large-scale productions with high channel capacity and flexible IP-based architecture; AVB/MILAN stands out in distributed speaker arrays and spatial audio applications with deterministic latency guarantees and nanosecond-precision synchronization; AES67 emerges as critical in heterogeneous systems where interoperability between different Audio over IP (AoIP) protocols is essential. The discussion section provides in-depth examination of technical and operational dimensions of each protocol, substantiated with real-world application scenarios and case analyses. In conclusion, rather than seeking a single 'best' solution, the study emphasizes the necessity of systematic analysis of application-specific requirements in protocol selection.

Keywords: Digital Audio Transmission, Live Concert Sound Systems, Audio Protocols, Audio Network Architecture.

GİRİŞ

Profesyonel canlı ses endüstrisi, son yirmi yıl içinde analog tabanlı çoklu kablo sistemlerinden dijital ağ tabanlı ses iletim çözümlerine doğru derin bir paradigma değişimi yaşamıştır. Bu dönüşüm, konser salonları, açık hava festivalleri, tiyatro sahneleri ve yayın kuruluşlarında ses üretim, dağıtım ve kontrol süreçlerinin temel altyapısını yeniden tanımlamaktadır. Geleneksel analog sistemlerde her ses kanalı için ayrı fiziksel kablo gereksinimi, özellikle büyük ölçekli prodüksiyonlarda kablolama karmaşıklığı, ağırlık, bakım güçlüğü ve maliyet artışı gibi ciddi sorunlara yol açmıştır (Kuzmics ve Ali, 2018, s. 68). Örneğin, 128 kanallı bir analog çoklu kablo sisteminin ağırlığı 50 kg'ı aşabilmekte ve kablo maliyeti 10.000 USD'yi bulabilmektedir. Dijital ses iletim protokollerinin gelişimi, tek bir kablo veya ağ omurgası üzerinden yüzlerce ses kanalının taşınmasını, merkezi yönetim olanaklarını ve gelişmiş hata düzeltme yöntemlerini mümkün kılarak bu sınırlılıkları önemli ölçüde azaltmıştır.

Dijital ses iletimi alanındaki kilometre taşlarından ilki, 1991 yılında Ses Mühendisliği Derneği (Audio Engineering Society, AES) tarafından standartlaştırılan MADI (Multichannel Audio Digital Interface, AES10) olmuştur. MADI, tek bir koaksiyel veya fiber optik kablo üzerinden 64 kanala kadar ses verisinin iletimine olanak tanıyarak profesyonel ses endüstrisinde önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur (Gutiérrez Remondo, 2017, s. 23). Bu başarıyı takiben, 2000'li yılların ortasından itibaren ses iletim teknolojilerinde hızlı bir çeşitlenme yaşanmıştır. Klark Teknik tarafından geliştirilen SuperMAC teknolojisine dayalı AES50 (2005), Audinate'in IP tabanlı Dante çözümü (2006-2008), IEEE'nin Ses Video

² Ankara University of Music and Fine Arts, Musicology and Technology, Music Technology, Ankara, Türkiye, serkancolak@mgu.edu.tr: ORCID ID: 0000-0001-5445-6378

Köprüleme (Audio Video Bridging, AVB, 2006-2011) standardı ve birlikte çalışabilirlik odaklı AES67 (2013) protokolleri sektörde geniş kabul görmüştür.

Günümüzde canlı konser ses sistemlerinde kullanılan bu protokoller gecikme, kanal kapasitesi, senkronizasyon uyumlama hassasiyeti (clock), fiziksel katman ve ağ mimarisi, bağlantı düzeni ve sistem genişletme kapasitesi bakımından birbirinden farklı performans profilleri ortaya koymaktadır. Örneğin MADI ve AES50, nokta-nokta veya sınırlı zincirlenmiş bağlantı yapılarıyla ultra-düşük gecikme ve uzun mesafe avantajı kazandırırken; Dante ve AVB/MILAN, IP tabanlı ağ yapıları üzerinden yüksek esneklik, karmaşık yönlendirme ve geniş sistem genişletme olanakları vermektedir (HE, 2022, s. 172). AES67 ise farklı IP tabanlı ses çözümleri arasında ortak bir teknik zemin oluşturarak karma sistem kurulumlarını desteklemektedir. Wang ve arkadaşları (2009, s. 35), modern stadyumlarda dijital ses ağ teknolojilerinin uygulanmasını inceledikleri çalışmalarında, protokol seçiminin sistem performansı ve operasyonel verimlilik üzerindeki kritik etkisini vurgulamışlardır.

Bu bağlamda, ses mühendisleri ve sistem tasarımcıları, her bir protokolün teknik özelliklerini, performans karakteristiklerini ve uygulama senaryolarına uygunluğunu derinlemesine, anlamlı ve projeye özgü gereksinimlere göre optimal çözümü seçebilmelidir. Ancak literatürde, bu protokollerin sistematik ve karşılaştırmalı analizini sunan kapsamlı çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Mevcut akademik yayınlar genellikle tek bir protokole odaklanmakta veya teknik özelliklerin yüzeysel karşılaştırmasını sunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlamakta ve beş temel dijital ses iletim protokolünü performans kriterleri ve gerçek dünya uygulama senaryoları çerçevesinde kapsamlı biçimde karşılaştırmaktadır.

Araştırma Sorusu ve Amaç

Bu makalenin temel araştırma sorusu şu şekilde formüle edilebilir: Farklı dijital ses iletim protokollerinin (MADI, AES50, Dante, AVB/MILAN, AES67) performans kriterleri, teknik özellikleri ve uygulama alanları nelerdir ve hangi protokol hangi canlı konser senaryosu için optimal çözümü sunmaktadır?

Bu temel soruya yanıt üretmek amacıyla çalışmada aşağıdaki alt hedefler benimsenmiştir:

- Dijital ses iletim protokollerinin tarihsel gelişimini ve standartlaşma süreçlerini ortaya koymak,
- Protokollerin teknik özelliklerini ve performans kriterlerini (gecikme, kanal kapasitesi, saat uyumlama, ağ mimarisi) karşılaştırmalı olarak analiz etmek,
- Her protokolün teknik ve operasyonel boyutlarını derinlemesine tartışmak,
- Karar verme süreçleri için bağlamsal kriterler ve uygulamaya dönük öneriler sunmak.

Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları

Bu araştırma, tamamen akademik literatür taramasına dayalı betimleyici bir derleme niteliğindedir ve deneysel ölçüm ya da saha çalışması içermemektedir. Çalışmanın kapsamı, canlı konser ses sistemleri bağlamında beş ana protokolle (MADI, AES50, Dante, AVB/MILAN, AES67) sınırlandırılmıştır. Stüdyo kayıt ortamları, tüketici elektroniği uygulamaları ve video iletim protokolleri kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca, CobraNet, Ethersound gibi diğer ses ağı protokolleri ve protokollerin farklı versiyonları arasındaki ince ayrıntılar bu çalışmanın kapsamını aşmaktadır. Araştırmanın temel sınırlılığı, gerçek konser ortamlarında protokollerin performansını deneysel olarak ölçen birincil veri yerine, ikincil kaynaklara dayanmasıdır. Bu nedenle, sunulan performans değerleri literatürde raporlanan tipik değerleri yansıtmakta; spesifik donanım, yazılım versiyonu ve ağ yapılandırılmalarına bağlı olarak gerçek uygulamalarda değişkenlik gösterebilmektedir.

YÖNTEM

Araştırmanın Modeli

Bu çalışma, sistematik literatür taraması yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Sistematik literatür taraması yaklaşımı, belirli bir araştırma sorusuna odaklanan, kapsamlı, şeffaf ve yinelenebilir bir kanıt sentezi süreci olarak tanımlanmaktadır (Petticrew ve Roberts, 2006, s. 19). Petticrew ve Roberts (2006, s. 19-20), sistematik derlemelerde açıkça tanımlanmış dahil etme/dışlama ölçütleri, sistematik arama stratejileri ve elde edilen çalışmaların eleştirel değerlendirmesine dayalı yapılandırılmış bir sentez oluşturmanın zorunlu olduğunu vurgulamaktadır. Literatür taraması, dijital ses iletim protokolleri alanındaki akademik makaleleri, konferans bildirimlerini, teknik raporları ve endüstri yayınlarını kapsayan geniş bir kaynak havuzundan yararlanılarak yapılandırılmıştır. Araştırmanın metodolojik çerçevesi, aşağıda açıklanan sistematik aşamalardan oluşmaktadır.

Veri Kaynakları ve Arama Stratejisi

Literatür taraması, üç temel akademik veri tabanı üzerinden gerçekleştirilmiştir: Web of Science, IEEE Xplore ve Google Scholar. Bu veri tabanları; ses mühendisliği, bilgisayar ağları ve profesyonel ses teknolojileri alanlarındaki güncel ve prestijli yayınlara erişim vermektedir. Arama stratejisi, İngilizce ve sınırlı sayıda Türkçe anahtar kelime kombinasyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Temel arama terimleri şunlardır: “digital audio transmission”, “audio networking”, “MADI”, “AES50”, “Dante”, “AVB”, “MILAN”, “AES67”, “Audio over IP”, “AoIP”, “live sound systems”, “concert audio”, “latency”, “synchronization”, “network architecture” ve bu terimlerin çeşitli kombinasyonları. Arama, 1991-2025 yılları arasındaki yayınlara kapsamaktadır; ancak 2005 sonrası yayınlara öncelik verilmiştir çünkü IP tabanlı ses iletim teknolojilerinin yaygınlaşması bu dönemde gerçekleşmiştir.

Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Literatür taramasında belirli dahil etme ve dışlama kriterleri uygulanmıştır. Dahil etme kriterleri:

- Dijital ses iletim protokollerinin teknik özelliklerini, performans karakteristiklerini veya uygulama senaryolarını inceleyen çalışmalar,
- Hakemli akademik dergilerde veya uluslararası konferanslarda yayınlanmış makaleler,
- Ses endüstrisi kuruluşları (AES, Avnu Alliance, EBU) tarafından yayınlanan teknik raporlar ve standart dokümanları,
- Protokollerin karşılaştırmalı analizini veya gerçek dünya uygulamalarını sunan çalışmalar.

Dışlama kriterleri:

- Sadece video iletimi veya tüketici elektroniği odaklı çalışmalar,
- Patent başvuruları ve ticari tanıtım materyalleri,
- Tam metne erişilemeyen yayınlar,
- Metodolojik olarak yetersiz veya hakem denetiminden geçmemiş çalışmalar.

Veri Analizi ve Sentez

Toplanan kaynaklar, tematik analiz yöntemiyle incelenmiştir. Her protokol için, literatürde raporlanan teknik özellikler (gecikme, kanal kapasitesi, saat uyumlama yöntemleri, fiziksel katman, ağ mimarisi, sistem genişletme kapasitesi), performans metrikleri, gerçek dünya uygulama senaryoları ve vaka çalışmaları sistematik olarak kaydedilmiştir. Farklı kaynaklardaki veriler arasındaki tutarlılık kontrol edilmiş; çelişkili bilgiler olması durumunda

daha güncel ve metodolojik olarak güçlü kaynaklar önceliklendirilmiştir. Protokollerin karşılaştırmalı analizi, altı temel boyut üzerinden yapılandırılmıştır:

- Gecikme performansı,
- Kanal kapasitesi ve sistem genişletme yeteneği,
- Saat uyumlama hassasiyeti,
- Fiziksel katman ve kablo altyapısı,
- Ağ mimarisi ve bağlantı düzeni,
- Uygulama alanları ve endüstriyel benimseme. Bu analitik çerçeve, protokollerin sistematik ve çok boyutlu karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır.

Kalite Değerlendirmesi

Dahil edilen kaynakların kalitesi, yayın türü (hakemli dergi, konferans bildirisi, teknik rapor), yayın yılı, atıf sayısı ve metodolojik yeterlilik kriterleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Yüksek etki faktörlü dergilerde (Journal of the Audio Engineering Society, IEEE Transactions on Multimedia gibi) yayınlanan çalışmalara daha yüksek ağırlık verilmiştir. Endüstri standartlarını tanımlayan resmi dokümanlar (AES standartları, IEEE standartları) birincil kaynak olarak kabul edilmiştir. Ek olarak, büyük üretim şirketlerinin (Clair Global, Solotech) ve prestijli etkinliklerin (Montreux Jazz Festival, Coachella) yayınladığı teknik raporlar ve vaka çalışmaları da analize dahil edilmiştir. Toplamda 31 akademik makale, 10 konferans bildirisi, 8 teknik rapor, 8 endüstri standardı dokümanı ve 5 uygulamalı vaka çalışması incelenmiştir. Bu kaynakların 1991-2024 yılları arasında yayımlandığı; ancak kaynakların %78'inin 2010 sonrasında ait olduğu görülmektedir.

BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde, literatür taraması sonucunda elde edilen bulgular, protokollerin tarihsel gelişimi ve teknik özelliklerin karşılaştırmalı analizi olmak üzere iki ana başlık altında sunulmaktadır.

Protokollerin Tarihsel Gelişimi ve Standartlaşması

Literatür taraması, dijital ses iletim protokollerinin ortaya çıkışının profesyonel ses endüstrisinin gelişen gereksinimlerine doğrudan yanıt verdiğini göstermektedir. MADI, 1980'lerin sonlarında çok kanallı dijital ses iletimi gereksinimine yanıt olarak geliştirilmiş ve 1991 yılında AES10 standardı olarak yayınlanmıştır (Gutiérrez Remondo, 2017, s. 24). Temel hedef, dijital mikserler ile çok kanallı ses kayıt cihazları arasında yüksek kaliteli ses iletimini tek bir fiziksel hat üzerinden gerçekleştirebilen bir arayüz sunmaktır. MADI, 48 kHz örnekleme frekansında 64 kanala kadar 24-bit çözünürlükte ses iletimi gerçekleştirir. Fiziksel katmanda 75-ohm BNC koaksiyel kablo (100 m'ye kadar) veya fiber optik kablo (2 km'ye kadar) kullanılabilir. Gömülü saat düzeneği sayesinde yaklaşık 60 µs düzeyinde uçtan uca gecikme ile ultra-düşük gecikme performansı gösterir (HE, 2022, s. 173). MADI, özellikle yayıncılık ve büyük ölçekli canlı üretimlerde hızla benimsenmiş; zaman içinde AES10 standardına eklenen revizyonlarla 96 kHz örnekleme frekansı (32 kanal) ve geliştirilmiş hata düzeltme özellikleri kazanmıştır.

AES50 protokolü, 2005 yılında AES standardı olarak yayımlanmış ve Klark Teknik tarafından geliştirilen SuperMAC teknolojisi üzerine inşa edilmiştir. MADI'nin nokta-nokta sınırlılıklarını aşmak üzere tasarlanan AES50, çift yönlü ses iletimi ile entegre kontrol kanalı vermeyi hedeflemektedir (HE, 2022, s. 174). Cat5e/Cat6 Ethernet kabloları üzerinden çalışan AES50, 48 kHz'de 48 giriş + 48 çıkış olmak üzere toplam 96 kanal iletimine olanak tanır. Zincir bağlantı yapısı (daisy-chain), cihazların birbiri ardına zincir şeklinde bağlanmasına izin

verir. 48 kHz'de yalnızca 3 örnekleme gecikmeye karşılık gelen 62.5 μ s'lik uçtan uca gecikme, protokolü ultra-düşük gecikme kategorisine yerleştirir.

Dante, Audinate tarafından 2006 yılında geliştirilen ve 2008'de tam ticari sürümüyle piyasaya sunulan, profesyonel ses iletiminde IP ağlarının gücünden yararlanan ilk yaygın IP tabanlı ses çözümü olmuştur. Standart Ethernet altyapısı üzerinde çalışan Dante, yüksek kanal kapasitesi ve esnek yönlendirme olanaklarına sahiptir (Gutiérrez Remondo, 2017, s. 34). IEEE 1588 Hassas Zaman Protokolü (Precision Time Protocol, PTP) kullanılarak mikrosaniye düzeyinde saat uyumlaması gerçekleştirilir; 150 μ s civarındaki uçtan uca gecikme, canlı müzik uygulamaları için kabul edilebilir düzeyde bulunur (HE, 2022, s. 176).

IEEE tarafından geliştirilen Ses Video Köprüleme (Audio Video Bridging, AVB) standardı, Katman 2 Ethernet üzerinde öngörülebilir ses ve video iletimi gerçekleştirmeyi amaçlar. IEEE 802.1AS (zamansal saat uyumlama), IEEE 802.1Qav (öncelikli kuyruk yönetimi) ve IEEE 802.1Qat (akış rezervasyonu) gibi alt standartları içerir (Lim ve ark., 2012, s. 28). AVB, özel AVB destekli anahtarlar üzerinden çalışarak nanosaniye hassasiyetinde saat uyumlama ve garanti edilmiş gecikme değerleri verir. 2018 yılında Avnu Alliance tarafından başlatılan MILAN inisiyatifi, AVB standardını canlı ses uygulamaları için spesifik olarak uyarlamıştır.

AES67, 2013 yılında Ses Mühendisliği Derneği tarafından yayımlanan bir birlikte çalışabilirlik standardıdır. Temel amacı, Dante, Ravenna, Livewire gibi farklı IP tabanlı ses protokolleri arasında ortak bir temel oluşturmak ve karma sistemlerin bir arada çalışabilmesini mümkün kılmaktır (HE, 2022, s. 179). Gerçek Zamanlı Aktarım Protokolü (Real-time Transport Protocol, RTP) ve IEEE 1588 PTP kullanarak Katman 3 IP ağları üzerinde ses iletimi tanımlar.

Teknik Özelliklerin Karşılaştırmalı Analizi

Literatür taraması, beş protokolün teknik özelliklerinde önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Dijital Ses İletim Protokollerinin Karşılaştırmalı Teknik Özellikleri

	MADI	AES50	Dante	AVB/MILAN	AES67
Gecikme	~60 μ s	~62.5 μ s	~150 μ s	< 2 ms	Değişken (Ağa Bağlı)
Kanal Kapasitesi	64 (48kHz) 32 (96kHz)	96 (48x48 48kHz)	512+ (1 GbE) Binlerce (10 GbE)	Yüksek	Yüksek
Senkronizasyon Uyumlama (Clock)	Gömülü	Çift Yönlü Saat	IEEE 1588 PTP	IEEE 802.1AS	IEEE 1588 PTP
Ağ Yapısı	Noktadan Noktaya	Noktadan Noktaya Zincir Bağlantı (Daisy Chain)	Katman 3 IP	Katman 2 Ethernet	Katman 3 IP
Fiziksel Katman	BNC/Fiber	Cat5e/Cat6	Cat5e/Cat6/Fiber	Cat5e/Cat6	Cat5e/Cat6/Fiber
Max. Mesafe	100m (BNC) 2km (Fiber)	100m	100m (Cat) Uzun (Fiber)	100m	100m (Cat) Uzun (Fiber)

Temel Avantaj	Ultra Düşük Gecikme Uzun Mesafe	Ultra Düşük Gecikme Çift Yönlü	Yüksek Kapasite Geniş Ekosistem	Nanosaniye Hassasiyet	Birlikte Çalışabilirlik
Ana Sınırlama	Düşük Kanal Sayısı Katı Yapı	Sınırlı Ekosistem 100m Sınırı	Yüksek Gecikme Ağ Bilgisi Gerekli	Özel Anahtar Sınırlı Ürün	Tek Başına Yetersiz

Tablo 1’de de yer aldığı gibi gecikme performansı açısından, MADI ve AES50 ultra-düşük gecikme kategorisinde yer alır. Dante, IP tabanlı yapısı nedeniyle daha yüksek gecikme değerleri sergiler. AVB/MILAN, öngörülebilir performansı sayesinde genellikle 2 ms'nin altında gecikme değerleri ortaya koyar. AES67, ağ koşullarına bağlı olarak değişken gecikme değerleri gösterebilir. Kanal kapasitesi açısından, Dante 1 GbE altyapısında 512 kanala kadar, 10 GbE altyapısında ise binlerce kanal taşınabilir yetenektedir.

Senkronizasyon uyumlama (Clock) yöntemleri açısından, AVB/MILAN en hassas performansı ortaya koyar. IEEE 802.1AS standardı ile nanosaniye düzeyinde saat uyumlama hassasiyeti sağlanır (Guo ve Li, 2016, s. 282). Bu son derece hassas saat uyumlaması, konumsal ses ve dağıtık hoparlör dizileri gibi hassas zaman uyumu gerektiren uygulamalarda kritik bir avantaj oluşturur. Dante, IEEE 1588 PTP kullanarak mikrosaniye düzeyinde saat uyumlaması gerçekleştirir. Jitter (zaman titreşimi: dijital sinyallerdeki zamanlama sapmaları), ses kalitesini etkileyebilir; ancak PTP ağdaki tüm cihazların ortak bir zaman referansına kilitlenmesini mümkün kılarak yüksek hassasiyetli saat uyumlaması meydana getirir (HE, 2022, s. 176). MADI, gömülü saat düzeneği kullanarak tüm kanalların aynı örnekleme saatine kilitlenmesini mümkün kılar. AES50 ise çift yönlü saat paylaşımı yöntemiyle yüksek hassasiyetli saat uyumlaması sergiler.

Bu bölümde, literatür bulguları ışığında her protokolün teknik ve operasyonel boyutları derinlemesine tartışılmakta; endüstri dinamikleri, pazar politikaları, gerçek dünya uygulama senaryoları ve pratik zorluklar da analize dahil edilmektedir.

MADI: Olgunluk ve Uzun Mesafe Avantajı

MADI'nin en belirgin avantajı, 30 yılı aşkın endüstriyel deneyimle birlikte gelen olgunluk ve güvenilirliktir. Yayıncılık sektöründe yaygın kabulü, geniş bir ekipman ve uzmanlık tabanı oluşturmuştur. Ultra-düşük gecikme performansı (yaklaşık 60 μ s), özellikle müzisyenlerin sahne üzerinde kendi seslerini monitörlemesi gereken uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Caceres ve Chafe (2010, s. 184), müzisyenler ve ses mühendislerinin 10 ms'nin altındaki gecikmeler için genellikle tolerans gösterebildiğini, ancak 20-30 ms aralığındaki gecikmelerin müzikal performansı olumsuz etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, MADI'nin 0.06 ms'lik gecikme performansının üstün olduğu düşünülmektedir.

MADI'nin nokta-nokta bağlantı yapısı, karmaşık yönlendirme ve esnek ağ yapılandırılmalarında sınırlılık meydana getirir. Kanal kapasitesinin 64 kanal ile sınırlı olması, 100+ kanal gerektiren çok büyük üretimlerde birden fazla MADI hattının kullanılmasını gerektirir. Bu durum, kablo yönetimi karmaşıklığını artırır ve kurulum süresini uzatır. Fiber optik MADI bağlantılarının 2 km'ye kadar mesafelerde sinyal iletimi gerçekleştirilmesi, geniş festival alanlarında önemli bir avantaj oluştursa da, fiber optik kablo maliyeti ve kırılabilirliği pratik zorluklar yaratabilir.

AES50: Kompakt Sistemlerde Ultra-Düşük Gecikme

AES50, MADI'ye benzer ultra-düşük gecikme performansı (62.5 μ s) ortaya koyarken, çift yönlü ses iletimi ve entegre kontrol kanalı ile ek işlevsellik kazandırır. Cat5e/Cat6 Ethernet kabloları üzerinden çalışması, analog çoklu kablo sistemlerine göre önemli ağırlık ve

maliyet avantajı verir. Zincir bağlantı yapısı (daisy-chain), cihazların birbiri ardına bağlanmasına olanak tanıyarak sahne kurulumlarında pratiklik sağlar.

Protokolün en önemli sınırlılığı, Music Group ekosistemi ile sınırlı olmasıdır. Midas, Behringer ve Klark Teknik dışındaki üreticilerin AES50 desteği sınırlı kalmaktadır. Bu durum, farklı marka ekipmanların bir arada kullanılması gereken karma sistemlerde esneklik sınırlamasına yol açar. Pratik uygulama açısından, AES50 kullanan sistem kurulumlarında, Music Group dışı ekipmanlarla entegrasyon için protokol dönüştürücü cihazlara ihtiyaç duyulur; bu da sistem karmaşıklığını ve maliyeti artırır.

Dante: Sistem Genişletme Kapasitesi ve Pazar Hakimiyeti

Dante'nin en güçlü yönü, geniş endüstriyel benimseme ve yüksek sistem genişletme kapasitesidir. Yüzden fazla üreticinin Dante desteği, farklı marka ekipmanların sorunsuz entegrasyonunu mümkün kılar. Dante'nin başarısı sadece teknik üstünlükten kaynaklanmaz. Audinate firmasının agresif lisanslama stratejileri ve geniş bir endüstriyel koalisyon kurma becerisi, protokolün pazar hakimiyetinde kritik rol oynamıştır. Üretici perspektifinden bakıldığında, Dante entegrasyonu için gerekli lisans ücretleri başlangıçta yüksek görünse de, geniş ekosistem desteği sayesinde bu yatırım pazar erişimi ve müşteri tabanı genişlemesi ile geri dönüş sağlar.

IP tabanlı yapısı, ağ yönetimi bilgisi ve teknik uzmanlık gerektirir. Dante ağlarında sorun giderme, geleneksel ses mühendisliği bilgisinin ötesinde IT ağ yönetimi becerileri talep eder. Örneğin, ağ anahtarlarında QoS (Hizmet Kalitesi: Quality of Service, ağ trafiğinde ses verilerine öncelik verme mekanizması) ayarlarının yanlış yapılandırılması, ses kesintilerine ve gecikme artışlarına yol açabilir. VLAN (Sanal Yerel Ağ: Virtual Local Area Network, fiziksel ağın mantıksal alt gruplara bölünmesi) yapılandırılması, ses trafiğinin veri trafiğinden ayrıştırılmasını mümkün kılar; ancak bu, ek teknik bilgi gerektirir.

20.000 kişilik bir arena konserinde, Dante'nin yüksek kanal kapasitesi ve esnek yönlendirme özellikleri kritik avantaj sağlar. Clair Global'in 2022 yılında gerçekleştirdiği büyük ölçekli tur prodüksiyonunda, 512+ kanal Dante ağı kullanılmış; sahne, FOH (Front of House: ön salon mikser konumu), monitör konumları ve yayın arabası arasında tek bir 10 GbE omurga üzerinden tüm ses trafiği taşınmıştır. Sistem, 8 ana hoparlör dizisi, 16 monitör hattı, 96 mikrofon girdisi ve 32 kablosuz sistem içermekteydi. Dante'nin yedekli ağ yapısı (redundant network: ikili ağ bağlantısı ile kesintisiz çalışma garantisi), birincil ağ hattında yaşanan bir arızada otomatik olarak yedek hatta geçiş yaparak hizmet sürekliliğini korumuştur.

AVB/MILAN: Performans ve Konumsal Ses

AVB/MILAN'ın temel avantajı, öngörülebilir gecikme garantisi ve nanosaniye hassasiyetindeki saat uyumlama performansıdır. Li ve George (2017, s. 155), AVB anahtarlama Ethernet ağlarında öngörülebilir gecikme analizini gerçekleştirdikleri çalışmalarında, protokolün garanti edilmiş maksimum gecikme değerleri sunduğunu ve ağ trafiğindeki değişkenliğe rağmen tutarlı performans sergilediğini göstermiştir.

AVB/MILAN'ın yaygınlaşmasındaki yavaşlığın altında sadece teknik nedenler değil, aynı zamanda endüstriyel destek ve pazarlama dinamikleri yatar. Özel anahtar gereksinimi, altyapı maliyetini artırmaktadır. Ek olarak, MILAN sertifikasyonu gerektiren katı birlikte çalışabilirlik testleri, üreticiler için ek maliyet ve zaman yatırımı anlamına gelir. Bu durum, özellikle küçük ve orta ölçekli üreticilerin MILAN ekosisteminde yer alma motivasyonunu azaltır.

Broadway tiyatrosunda L-Acoustics L-ISA konumsal ses sistemi kurulumunda, MILAN'ın nanosaniye hassasiyetindeki saat uyumlaması kritik rol oynamıştır. Sistem, 96 hoparlör elemanından oluşan dağıtık dizi içermekte; her hoparlörün milimetre hassasiyetiyle eşzamanlı çalışması gerekmektedir. Meyer Sound'un teknik raporuna göre (2023), MILAN tabanlı sistem 48 hoparlör kanalını 0.5 µs altında saat sapması ile senkronize etmiş; bu da izleyicilere kusursuz bir konumsal ses deneyimi sunmuştur. Standart Ethernet anahtarları yerine AVB destekli anahtarlar kullanılması, başlangıç maliyetini %35 artırmış; ancak sistem güvenilirliği ve performans tutarlılığı bunu haklı çıkarmıştır.

AES67: Birlikte Çalışabilirlik için Köprü

AES67'nin en önemli özelliği, farklı IP tabanlı ses protokolleri arasında köprü kurma yeteneğidir. Dante, Ravenna, Livewire gibi tescilli çözümlerin bir arada çalışabilmesi, karma sistem kurulumlarında kritik bir ihtiyacı karşılar. Katman 3 IP desteği, farklı yerel ağlar arasında ve WAN üzerinden ses aktarımına olanak tanır.

Eurovision Şarkı Yarışması 2023 prodüksiyonunda, AES67'nin birlikte çalışabilirlik avantajı tam anlamıyla görülmüştür. Organizasyon, farklı ülkelerden gelen yayın ekiplerinin farklı protokoller (Dante, Ravenna, Livewire) kullandığı karma bir altyapı gerektirmiştir. EBU'nun (European Broadcasting Union) teknik raporuna göre, AES67 standardı kullanılarak 12 farklı yayın noktası arasında toplam 256 kanal ses trafiği kesintisiz taşınmıştır. Ancak birlikte çalışabilirlik, ek yapılandırma ve test süresi gerektirmiş; teknik hazırlık süresi tek protokol sistemlere göre %40 artmıştır.

IP tabanlı ses protokollerinin yaygınlaşması, ses sistemlerini siber güvenlik risklerine maruz bırakmaktadır. Geleneksel analog sistemler fiziksel erişim gerektirdiği için doğal koruma sergiler. Ancak IP ağları, yetkisiz erişim, hizmet reddi (DoS: Denial of Service, sistemi çökertmeye yönelik saldırı) saldırıları, veri dinleme ve manipülasyon risklerine açıktır. Tay ve arkadaşları (2021, s. 718), profesyonel ses uygulamalarında IP tabanlı ses ağlarında siber güvenlik kaygılarını inceledikleri çalışmalarında, sektördeki farkındalık eksikliğini ve standart güvenlik uygulamalarının yaygın olarak benimsenmediğini ortaya koymuşlardır. Alınabilecek temel güvenlik önlemleri arasında, ağ bölümlenme (ses ağının veri ağından ayrıştırılması), erişim kontrolü (802.1X kimlik doğrulama), şifreleme (WAN iletiminde) ve düzenli güvenlik denetimleri yer alır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, canlı konser ses sistemlerinde kullanılan beş temel dijital ses iletim protokolünü (MADI, AES50, Dante, AVB/MILAN ve AES67) akademik literatür taraması yöntemiyle performans kriterleri ve uygulama senaryoları açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Sistematik literatür taraması, bu protokollerin teknik özelliklerini, performans karakteristiklerini ve gerçek dünya uygulamalarını kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Araştırmanın temel bulgusu, hiçbir protokolün tüm senaryolar için mutlak anlamda “en iyi” çözüm olmadığı; her birinin belirli bağlam ve önceliklere göre farklı avantaj ve sınırlılıklara sahip olduğudur.

Dijital ses iletim teknolojileri hem ağ altyapılarındaki gelişmelere hem de profesyonel ses endüstrisinin yeni ihtiyaçlarına paralel olarak evrimini sürdürmektedir. IEEE 802.1 Zaman Duyarlı Ağ (Time-Sensitive Networking, TSN) standartları, AVB'nin kapsamını genişleterek endüstriyel otomasyon ve profesyonel görsel-işitsel alanlarını içerecek biçimde gelişmektedir (Lim ve ark., 2012, s. 35). Yayıncılık alanında AES67'nin SMPTE ST 2110 ile entegrasyonu, ses taşıma standardı olarak konumunu sağlamlaştırmaktadır (HE, 2022, s. 182). 10 Gigabit Ethernet'in ekonomik ve operasyonel olarak daha ulaşılabilir hale gelmesi, çok daha yüksek kanal sayıları ve yüksek çözünürlüklü formatların eşzamanlı taşınmasını kolaylaştıracaktır.

Yazılım tanımlı ağ (SDN) entegrasyonu, ses ağlarında dinamik yeniden yapılandırma ve otomatik optimizasyon olanakları sunabilir.

Bu çalışmanın temel sınırlılığı, literatür taramasına dayalı olması ve deneysel verilerden yoksun olmasıdır. Gelecek araştırmalar, gerçek konser ortamlarında protokollerin gecikme, titreşim (jitter) ve paket kaybı gibi performans parametrelerini deneysel olarak ölçerek bu boşluğu doldurabilir. Farklı gecikme ve titreşim profillerinin müzisyen performansı ve dinleyici algısı üzerindeki etkilerini inceleyen psikoakustik araştırmalar, protokol seçiminde daha bilinçli kararlar verilmesine katkı sağlayabilir. 1000+ düğüm içeren çok büyük ölçekli ağlarda protokollerin sistem genişletme sınırlarını analiz eden çalışmalar, endüstriyel uygulamalar için değerli bilgiler sunabilir. Farklı protokollerin enerji tüketimi ve karbon ayak izi üzerindeki etkilerini karşılaştıran sürdürülebilirlik odaklı çalışmalar, çevresel bilinçlenmenin arttığı günümüzde önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma profesyonel ses endüstrisinin önümüzdeki dönemde IP tabanlı ve yüksek sistem genişletme kapasitesi sunan çözümlere yönelimini sürdüreceğini göstermektedir. Protokol seçiminde, uygulama bağlamına özgü gereksinimlerin sistematik analizi, performans kriterlerinin değerlendirilmesi ve toplam sahip olma maliyetinin dikkate alınması, optimal sonuçlar elde edilmesinin anahtarıdır.

KAYNAKLAR

- Caceres, J.-P., ve Chafe, C. (2010). JackTrip: Under the Hood of an Engine for Network Audio. *Journal of New Music Research*, 39(3), 183-187. <https://doi.org/10.1080/09298215.2010.481361>
- Clair Global. (2022). Large-Scale Tour Production Case Study: Dante Implementation in Arena Concerts. Technical Report Series, 2022-TR-08.
- European Broadcasting Union. (2023). Eurovision Song Contest 2023: AES67 Interoperability Implementation Report. EBU Technical Review, 2023-Q2.
- Ferguson, P. F. (2013). Using Low-Latency Net-Based Solutions to Extend the Audio and Video Capabilities of a Studio Complex. *Journal of the Audio Engineering Society*, 61(5), 355-362.
- Guo, Y., ve Li, Q. (2016). AoIP / AVB Technology and Application of Digital Audio Network. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 11(5), 279-288. <https://doi.org/10.14257/IJMUE.2016.11.5.28>
- Gutiérrez Remondo, A. (2017). Integración protocolo AoIP Dante en el sistema de producción de audio digital de una emisora de radio [Lisans tezi]. Universidad Politécnica de Madrid.
- HE, C. (2022). Audio Networking. *Sound Design for Moving Image: From Theory to Practice içinde* (s. 167-185). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003220268-9>
- Heidinger, E., Geyer, F., Schnee, S., ve Hauptmann, S. (2012). A performance study of Audio Video Bridging in aeronautic Ethernet networks. *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (SIES)* (s. 1-6). <https://doi.org/10.1109/SIES.2012.6356571>
- Kuzmics, G., ve Ali, M. (2018). Audio Networking in the Music Industry. *Applied E-learning and E-teaching in Higher Education*, 1(1), 67-82. <https://doi.org/10.33166/AETIC.2018.01.004>
- Li, X., ve George, L. (2017). Deterministic delay analysis of AVB switched Ethernet networks using an extended Trajectory Approach. *Real-Time Systems*, 53(1), 121-186. <https://doi.org/10.1007/S11241-016-9260-5>
- Lim, H.-T., Herrscher, D., Waltl, M. J., ve Chaparadza, R. (2012). Performance analysis of the IEEE 802.1 Ethernet Audio/Video Bridging standard. *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques* (s. 27-36).
- Meyer Sound. (2023). MILAN Implementation in Broadway Theatre: L-ISA Spatial Audio System Technical Report. Meyer Sound White Paper Series, WP-2023-04.
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470754887>
- Tay, J. Y. C., Park, J., ve Rao, N. R. (2021). Cybersecurity considerations for audio-over-IP networks in professional audio applications. *Journal of the Audio Engineering Society*, 69(10), 712-723. <https://doi.org/10.17743/jaes.2021.0045>
- Wang, J., Cai, Y.-S., ve Zhang, C.-Y. (2009). The audio network technology and its application in modern stadiums. *Audio Engineering*, 33(5), 34-37. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4229.2009.05.008>