

İşitme Taramasında Yeni Nesil Biyomedikal Cihaz Teknolojileri

Betül Karabudak¹

Özet

İşitme tarama ve tanı sistemleri, geçmişte analog sınırlılıkları bulunan, düşük işlem gücüyle çalışan ve büyük ölçüde klinik ortamlara bağımlı biyomedikal cihaz teknolojileri üzerine kuruluyken, günümüzde sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, gömülü sistem tasarımları, yüksek çözünürlüklü dijital işleme altyapıları ve yapay zekâ temelli analiz yöntemleri sayesinde köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Yeni nesil otoakustik emisyon temelli cihazlar, işitsel beyin sapı cevabı ölçüm sistemleri ve geniş bant akustik immitans analiz birimleri, mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) tabanlı mikrofonlar, çok fonksiyonlu prob tasarımları, düşük gürültülü ön yükselteç devreleri ve uyarlanabilir dijital filtreleme yöntemleriyle daha hızlı, daha doğru ve daha taşınabilir hâle gelmiştir. Uzaktan odyoloji uygulamaları, bulut tabanlı veri yönetimi altyapıları ve nesnelerin interneti temelli bağlantı sistemleri sayesinde işitme taramaları artık mekâna bağlı olmaktan çıkmıştır. Böylelikle sürekli izlenebilir, veri odaklı ve uzaktan kontrol edilebilir bir yapıya dönüşmüştür. Yapay zekâ ile güçlendirilmiş geçici/kaldı değerlendirme modelleri ve sinyal-gürültü oranı kestirim yöntemleri, ölçüm ve yorumlama süreçlerini standardize etmektedir, sınıf içi iletişimi destekleyen frekans modülasyonlu iletim sistemleri ve Roger tabanlı işitsel destek teknolojileri ise tarama sonrasında uygulanan rehabilitasyonun etkisini belirgin biçimde artırmaktadır. Bu bütünlüklü yaklaşım, işitme sağlığını yalnızca ölçüm odaklı bir uygulama olmaktan çıkarıp akıllı, bağlantılı ve sürdürülebilir bir işitsel sağlık ekosistemine dönüştürmektedir.

1 Öğr. Gör., Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, betulkarabudak@karabuk.edu.tr, 0000-0002-8266-4737

2.2. İŞİTME TARAMASINDA YENİ NESİL BİYOMEDİKAL CİHAZ TEKNOLOJİLERİ

İşitme kaybının erken dönemde belirlenmesi, çocukluk gelişimi, eğitim başarısı ve yaşam kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yenidoğanlardan okul çağı çocuklarına, genç ve erişkinlere kadar geniş bir popülasyonda uygulanan işitme tarama programları, günümüzde klasik analog temelli sistemlerden ileri biyomedikal cihaz teknolojilerine sahip, yüksek doğrulukta çalışan dijital sistemlere doğru dönüşmüştür. Bu dönüşüm, sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, yüksek çözünürlüklü analog-sayısal çeviriciler, düşük gürültülü amplifikasyon devreleri, gelişmiş dijital sinyal işleme algoritmaları ve yapay zekâ destekli otomatik karar sistemlerinin bir arada kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. Yeni nesil işitme taramasında, Otoakustik Emisyon (OAE), İşitsel Beyinsapı Cevabı (ABR) ve Akustik İmmittansmetri gibi temel odyolojik yöntemleri daha hızlı, tekrarlanabilir ve kullanıcıdan bağımsız biçimde uygulamaya olanak tanıyan cihaz tasarımlarını içerir. Tele-odyoloji ve IoT (Internet of Things, Nesnelerin İnterneti) tabanlı cihaz yönetimi, saha taramalarında taşınabilirliği artırırken, otomatik gürültü tayini, prob sızdırmazlık kontrolü ve algoritmik artefakt giderme gibi fonksiyonlar taramaların güvenilirliğini üst seviyeye taşımaktadır.

2.2.1. Yeni Nesil OAE Tarama Cihazlarının Mühendisliği

OAE temelli tarama cihazları, yenidoğan işitme taramalarından okul ve işitme sağlığı programlarına kadar geniş bir yelpazede birincil objektif tarama aracı hâline gelmiştir. Güncel eğilim, bu sistemlerin yalnızca klinik cihaz olarak değil, düşük maliyetli, taşınabilir, ağ bağlantılı ve otomatik karar destekli biyomedikal tanı platformları hâline gelmesi yönündedir (Chan vd., 2022).

2.2.1.1. Mikro-Elektro-Mekanik Sistem (MEMS) Mikrofon Teknolojileri

Klasik OAE problemlerinde kullanılan elektrot kondenser mikrofonlar, düşük maliyet ve yeterli duyarlılık sunmalarına rağmen frekans bandı genişliği, ısı kararlılık, boyut ve entegrasyon açısından sınırlıdır (Young, 2023). Yüksek frekanslı (8–20 kHz) OAE ölçümleri ile geniş bant timpanometri gibi yeni uygulamalar, bu geleneksel mikrofon tasarımlarının yetersizliklerini daha görünür hâle getirmiştir. Bu ihtiyaçlara yanıt olarak MEMS mikrofonlar, milimetre ölçeğindeki kompakt yapıları sayesinde prob içine kolaylıkla entegre olabilmekte; 10–20 kHz'e uzanan geniş bant frekans cevabı ve düşük eşdeğer gürültü seviyeleri ile düşük genlikli OAE yanıtlarının daha güvenilir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır (Shah vd., 2019). Aynı prob gövdesinde birden fazla mikrofon kullanımının mümkün olması,

beamforming ve adaptif gürültü bastırma gibi gelişmiş sinyal işleme tekniklerinin uygulanmasını kolaylaştırarak özellikle gürültülü klinik ortamlarda ölçüm performansını artırır (Zauli vd., 2023). Bununla birlikte prob mikrofonlarının kalibrasyonu, ölçümlerin doğruluğu ve hasta-kulak kanalı akustiği ile etkileşimin modellenmesi açısından kritik bir mühendislik aşamasıdır; mikrofon empedansı, prob hacmi ve akustik sızıntılar gibi faktörler hassas bir biçimde değerlendirilmelidir (Rasetshwane & Neely, 2011).

2.2.1.2. Prob Tasarımında Yeni Yaklaşımlar

OAE probu, hoparlör, mikrofon ve uç adaptöründen oluşan kulak kanalına yerleşen bir akustik-elektro-mekanik yapıdır. Probun kulak kanalına doğru yerleşimi hem uyarının iletimini hem de geri dönen otoakustik emisyon sinyalinin düşük gürültüyle algılanmasını belirleyen temel bileşendir. Yeni nesil prob tasarımları, erişilebilirlik ve çok işlevlilik odaklı geliştirilmiştir. Tek hoparlör ve tek mikrofon içeren düşük maliyetli prob topolojileri, 3B baskı ve enjeksiyon kalıplı medikal sınıf plastikler sayesinde özellikle geniş ölçekli yenidoğan veya okul tarama programlarında yaygınlaşmaktadır (Abdala vd., 2018; Lewis vd., 2021). Akustik sızdırmazlık hem uyarın seviyesinin stabil kalması hem de dış gürültünün kulak kanalına sızmaması açısından kritik bir parametredir. Bu nedenle farklı uç geometrileri, yaşa göre boyutlandırılmış uçlar ve tek kullanımlık adaptörler yaygınlaşmaktadır (British Society of Audiology (BSA), 2023).

2.2.1.3. Düşük Gürültülü Pre-Amplifikatör Devreleri

OAE sinyalleri çoğunlukla kulak kanalındaki fizyolojik gürültüye ve cihazın elektronik gürültüsüne çok yakın genliktedir. Bu nedenle prob mikrofonundan gelen mikrovolt düzeyindeki sinyallerin çok düşük gürültülü pre-amplifikatörler ile yükseltilmesi gerekir. Giriş katında düşük gürültülü op-amp (işlemsel amplifikatör) veya enstrümantasyon yükselteçlerinin kullanılması, yüksek giriş empedansı ve uygun kazanç dağılımı temel tasarım ilkeleridir. Hastane ortamında sık karşılaşılan elektromanyetik girişimler, diferansiyel hat kullanımı, bükülü çift kablolama, ayrı tasarlanmış analog ve dijital topraklama ile ekranlı kablolar sayesinde etkin biçimde bastırılır. Pre-amplifikatörün tasarımı ise 24 bit çözünürlüklü delta-sigma tabanlı analog/dijital devreler ve dijital sinyal işleme blokları üzerine kuruludur. Bu yapı içerisinde uyarılar filtreleme, gürültü bastırma ve sinyal-gürültü oranı (SNR) optimizasyonu gibi algoritmalar kullanılarak geniş dinamik aralığa sahip, kararlı ve güvenilir bir entegre sinyal koşullandırma mimarisi elde edilmektedir (Interacoustics, 2023).

2.2.1.4. Çevresel Gürültü İndeksleme Sistemleri

Yenidoğan ve çocuklarda OAE ölçümlerinin en önemli sınırlayıcılarından biri çevresel gürültüdür. Bu nedenle güncel kılavuzlar, ölçüm ortamının gürültü düzeyinin ve SNR'nin ölçüm boyunca izlenmesini önermektedir (British Society of Audiology, 2023). Yeni nesil cihazlarda prob mikrofonuna ek olarak yerleştirilen referans mikrofonlar, ortam gürültüsünü gerçek zamanlı spektral analizle izler. Sistem, ortam uygun ya da uygunsuz uyarıları verebilir, kayıt süresini otomatik uzatabilir ve ölçüm raporuna gürültü indeksleri ekleyebilir. SNR'ye dayalı yanıt var veya yanıt yok karar eşikleri (örneğin belirli bantlarda $SNR \geq 6$ dB), bu mekanizmanın temel bileşenidir (Interacoustics, 2023).

2.2.2. Yeni Nesil ABR Tarama Cihazlarının Mühendisliği

Yeni nesil ABR tarama sistemleri, klasik analog tabanlı cihazlardaki sınırlamaları geride bırakarak yüksek empedanslı elektrotlar, gelişmiş dijital filtreleme ve otomatik pik analizi gibi mühendislik iyileştirmeleriyle daha hızlı, güvenilir ve pratik işitme değerlendirmeleri sunmaktadır (Hall, 2007; Picton, 2011).

2.2.2.1. Yüksek Empedanslı Elektrot Teknolojileri

Yeni nesil ABR sistemleri, düşük genlikli beyin sapı yanıtlarının güvenilir biçimde kaydedilmesini engelleyen elektrot-cilt ara yüzeyine bağlı sorunları çeşitli mühendislik yaklaşımlarıyla azaltmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, yüksek empedans değerlerinde bile kararlı ölçüm yapabilen diferansiyel amplifikatör devrelerinin kullanılması önemli bir avantaj sağlamaktadır, böylelikle 20-100 k Ω aralığındaki elektrot empedanslarında da stabil sinyal alınabilmektedir ve cilt hazırlığına ayrılan süre kısalmıştır (Burkard vd., 2007; Chiappa, 1997). Yenidoğan ve bebeklerde tahriş riskini en aza indiren yumuşak hidrojel tabanlı pediatrik elektrotlar hem biyouyumluluk hem de sinyal sürekliliği açısından güncel standart hâline gelmiştir (American Electroencephalographic Society, 1991; Sininger, 1993). Bunun yanı sıra, jel gerektirmeyen kuru elektrotlar ve giyilebilir elektrot bantları, özellikle saha taramaları ve tele-odyoloji uygulamaları için kullanım kolaylığı sunarak uygulama çeşitliliğini artırmaktadır (Lopez-Gordo vd., 2014; Mihajlović vd., 2015). Bu teknolojik iyileştirmeler, düşük genlikli ABR cevaplarının daha yüksek sinyal-gürültü oranıyla kaydedilmesine imkân tanımaktadır, böylece yanlış ölçüm riskini azaltmakta ve kullanıcı bağımlılığını belirgin şekilde düşürmektedir (Polonenko & Maddox, 2019).

2.2.2.2. Dijital Filtreleme ve Artefakt Bastırma

Klasik ABR ölçümlerinde sinyalin görünürlüğünü azaltan temel gürültü kaynakları arasında kas aktivitesinden kaynaklanan elektromiyografi sinyalleri, göz kırpması ve hareket artefaktları, çevresel elektromanyetik girişim ve uyarının oluşturduğu başlangıç artefaktı yer almaktadır (Burkard vd., 2007; Picton, 2011). Yeni nesil ABR sistemlerinde bu sorunlar daha gelişmiş dijital sinyal işleme yöntemleriyle azaltılmaktadır. Adaptif dijital filtreleme yaklaşımı, sabit bant-geçiren filtrelerin ötesine geçerek sinyal ve gürültü bileşenlerini gerçek zamanlı analiz ederek gürültü yapısına göre filtre ayarlarını otomatik olarak optimize eder. Uyarın artefaktının bastırılması amacıyla click veya CE-Chirp gibi uyarıların oluşturduğu yüksek genlikli başlangıç artefaktları, ters fazlı uyarın çiftleri, matematiksel iptal yöntemleri veya diğer sinyal işleme algoritmaları ile etkili bir şekilde azaltılmaktadır (Hu vd., 2015). Buna ek olarak, akıllı averajlama ve SNR temelli kayıt sonlandırma yöntemleri, sabit tekrar sayısı yerine sinyal-gürültü oranını sürekli izleyerek hedef SNR'ye ulaşıldığında kaydı otomatik olarak sonlandırmaktadır (BC Early Hearing Program, 2022).

2.2.2.3. Otomatik Pik Analizi ve Karar Algoritmaları

ABR kayıtlarında klinik değerlendirmenin temelini dalga latansları, genlikleri ve özellikle 5. dalganın güvenilir biçimde saptanması oluşturur (Hall, 2007; Picton, 2011). Geleneksel yöntemlerde bu değerlendirme büyük ölçüde kullanıcı yorumuna dayanmaktadır bu da hem sübjektifliğe hem de standardizasyon eksikliğine yol açmaktadır. Yeni nesil ABR sistemleri, bu süreci otomatikleştiren gelişmiş sinyal işleme ve makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Otomatik 5. dalga algılama sistemleri, derin öğrenme tabanlı modeller kullanarak dalga formunu analiz ederek 5. dalganın latans, genlik ve gürültü oranı gibi temel özelliklerini otomatik olarak belirler. Bu yöntem, kullanıcıya geçti/kaldı karar desteği sağlayarak hem yorum hatalarını azaltır hem de tarama sürecini önemli ölçüde kısaltır. Şablon eşleme yaklaşımlarında kaydedilen ABR yanıtı, normatif veri tabanlarındaki yaş ve uyarın seviyesine göre oluşturulmuş referans dalga formlarıyla karşılaştırılır; böylece değerlendirme süreci daha standardize hâle gelir. Buna ek olarak, SNR tabanlı karar modelleri yalnızca dalga görünürlüğünü değil matematiksel bir eşik kriterini esas alır; örneğin SNR'nin 3-6 dB'in üzerinde olması yanıtın varlığı için güçlü bir gösterge olarak kabul edilir (BC Early Hearing Program, 2022). Çok seviyeli uyarın ve eşik protokolleri ise cihazın uyarın seviyesini kademeli olarak azaltarak eşik tahminini hızlandırmasına imkân tanır, bu yöntem özellikle yenidoğan taramalarında test süresini belirgin şekilde kısaltmaktadır (Hu vd., 2015).

2.2.3. Geniş Bant Akustik İmmittans (Wideband Acoustic Immittance, WAI) Sistemleri

Geniş Bant Akustik İmmittans (WAI) sistemleri, klasik 226 Hz timpanometrinin sınırlamalarını aşarak orta kulak fonksiyonunu 0,25–8 kHz gibi geniş bir frekans aralığında değerlendirme olanağı sunmaktadır (Belgin & Şahlı, 2016). Son yıllarda yapılan çalışmalar, WAI'nin yenidoğan işitme taramasında iletim tipi kayıpların erken tanısında klasik timpanometriden anlamlı derecede üstün olduğunu göstermektedir (Hunter vd., 2013). WAI sistemlerinin temelinde, kulak kanalına iletilen geniş bant uyaran sinyalleri yer alır. Chirp, click veya geniş bant gürültü benzeri kısa süreli uyaranlar orta kulağın tüm frekanslardaki davranışını eş zamanlı değerlendirmeyi sağlar (Ellison vd., 2012). Bu çok frekanslı uyaranların en önemli avantajları, hızlı ölçüm süresi, prob yerleşimine bağlı hatalara karşı daha yüksek tolerans ve frekans-seçici iletim kayıplarını daha hassas biçimde ortaya koymasındır (Feeney & Keefe, 1999; Feeney vd., 2017). Son yıllarda geliştirilen geniş bant prob hoparlörleri ve MEMS mikrofonlar, yüksek frekans doğruluğu sağlayarak bebek ölçümlerindeki hareket artefaktlarını azaltmaktadır ve bu sistemler, prob yerleşim hatalarına daha toleranslı çalıştığı için toplu tarama programlarında uygunluk göstermektedir (Novelli vd., 2024).

2.2.4. Tele-Odyoloji Tabanlı Tarama Cihazları

Tele-odyoloji tabanlı tarama cihazları, işitme değerlendirmelerinin fiziksel klinik ortamdan bağımsız biçimde yürütülmesini sağlayan yeni nesil biyomedikal sistemlerdir. Bu cihazlar; internet bağlantısı, bulut tabanlı platformlar, uzaktan kontrol altyapıları ve güvenli veri yönetimi protokolleri sayesinde WAI gibi objektif testlerin saha koşullarında, ev ortamında veya düşük kaynaklı bölgelerde uygulanmasına olanak tanır. Böylece hem erişilebilirlik artar hem de yenidoğan işitme taraması gibi geniş ölçekli programların sürdürülebilirliği güçlenir. (Krumm & Syms, 2011)

2.2.4.1. Uzaktan Kontrol Mekanizmaları

Tele-odyoloji cihazlarının en kritik bileşenlerinden biri, klinisyenin test sürecini fiziksel olarak orada bulunmadan yönetebilmesini sağlayan uzaktan kontrol altyapısıdır. Bu altyapı, cihazın bağlı olduğu tablet veya mini bilgisayar üzerinden güvenli internet bağlantısıyla çalışır ve klinisyenin test parametreleri, uyaran seviyesi, elektrot empedansı ve prob yerleşimi gibi değişkenleri gerçek zamanlı yönetmesine imkân tanır (Swanepoel vd., 2010).

2.2.4.2. Bulut Tabanlı Veri Yönetimi ve Güvenlik

Bulut tabanlı veri yönetimi, tele-odyoloji sistemlerinin sürdürülebilirliğinde temel rol oynar. Ölçüm sonuçları cihazdan bulut sunucusuna uçtan uca şifreleme ile güvenli biçimde aktarılır ve farklı lokasyonlardaki uzmanlar tarafından eş zamanlı olarak erişilebilir (World Health Organization, 2019). Bu yapı, özellikle yenidoğan taramalarında hızlı karar süreçlerini desteklemekte ve geniş ölçekli programların yönetimini kolaylaştırmaktadır. Bulut sistemleri, yapay zekâ destekli pik analizi, SNR hesaplama, artefakt sınıflandırma ve kalite kontrol algoritmalarının sunucu tarafında çalıştırılmasına olanak tanır; böylece cihaz üzerindeki işlem yükü azalır (Mahomed-Asmail vd., 2016).

2.2.5. Yapay Zekâ Destekli Otomatik Tarama Algoritmaları

Yapay zekâ, yeni nesil işitme tarama sistemlerinde özellikle OAE ve ABR gibi objektif testlerin otomatik analizini standartlaştırarak ölçümlerin hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller; sinyal kalitesi değerlendirmesi, gürültü sınıflandırması, ABR dalga biçimi tanıma, latans-pik tespiti, OAE yanıt var veya yanıt yok sınıflandırması ve otomatik geçti/kaldı karar mekanizmaları gibi aşamalarda yüksek performans göstermektedir (Peng vd., 2025; McKearney vd., 2022). Bu modeller; sinyal kalitesi değerlendirmesi, gürültü sınıflandırması, dalga biçimi tanıma ve otomatik geçti/kaldı karar mekanizmalarının oluşturulmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Böylece kullanıcı bağımlılığı azalmaktadır, tarama süresi kısalmakta ve klinik dışı ortamlarda dahi güvenilir sonuçlar elde edilmektedir (Shao vd., 2025).

2.2.5.1. Geçti/Kaldı Sınıflandırma Modelleri

Geçti/Kaldı karar yapısı, yenidoğan işitme taramalarının temel değerlendirme aşamasıdır. Yapay zekâ tabanlı sınıflandırma modelleri, kaydedilen sinyallerin istatistiksel ve morfolojik özelliklerini analiz ederek otomatik karar üretir. Bu süreçte OAE yanıt genliği, frekans bileşenleri, ABR 5. dalga latansı ve genliği, artefakt yoğunluğu ve SNR dağılımı gibi çok sayıda parametre birlikte değerlendirilir. Son yıllarda derin öğrenme tabanlı dalga biçimi tanıma modelleri, geleneksel eşik tabanlı yöntemlerin üzerine çıkarak daha yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik bildirmiştir. Bu gelişmeler, büyük nüfus taramalarında objektif ve standardize edilmiş karar süreçlerinin uygulanmasını mümkün kılmakta ve klinik doğruluğu artırmaktadır (AlSamhori vd., 2024).

2.2.5.2. Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) Kestirim Yöntemleri

SNR, OAE ve ABR ölçümlerinde sinyal kalitesini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Yapay zekâ destekli SNR kestirim yöntemleri, sinyal ve gürültü bileşenlerini zaman-frekans düzleminde ayırarak daha hızlı ve doğru hesaplama sağlar. Bu yöntemler; kısa süreli Fourier dönüşümü (STFT), dalga ayrıştırma, gürültü sınıflandırma algoritmaları, adaptif SNR tahmini ve derin öğrenme tabanlı sinyal iyileştirme modelleri gibi tekniklere dayanır (Mahomed-Asmail vd., 2016).

2.2.6. İşitsel Destek Teknolojileri: Frekans Modülasyonu (FM) Ve ROGER Sistemleri

Tarama sonrası işitsel destek teknolojileri, erken tanı alan çocukların eğitim ve iletişim süreçlerinde karşılaştıkları dinleme zorluklarını azaltmak için kritik bir role sahiptir. FM ve Roger sistemleri, özellikle sınıf gibi yüksek gürültü ve yankı içeren ortamlarda konuşma sinyalinin kalitesini artıran modern kablosuz iletim çözümleridir. Bu sistemler, öğretmenin sesini doğrudan çocuğun işitme cihazına veya koklear implantına ileterek çevresel gürültüyü ve mesafe etkisini önemli ölçüde azaltır, böylece sinyal-gürültü oranında anlamlı iyileşme sağlanır (Norrix vd., 2016; Thibodeau, 2014). Roger platformunda kullanılan adaptif dijital modülasyon, geniş bant ses iletimi, düşük gecikme süreleri ve sınıf gürültüsüne göre kazancı dinamik olarak ayarlayan adaptive gain algoritmaları sayesinde klasik analog FM sistemlerine kıyasla daha yüksek performans sunmaktadır. Klinik araştırmalar, Roger sistemlerinin SNR'yi 8–15 dB artırdığını, konuşma anlama skorlarını ise gürültülü ortamlarda anlamlı düzeyde iyileştirdiğini göstermektedir (Wolfe vd., 2015).

2.2.7. Sonuç

Yeni nesil işitme tarama cihazları, donanım (MEMS mikrofonlar, çok işlevli prob sistemleri, düşük gürültülü amplifikatörler), yazılım (DSP tabanlı filtreleme, otomatik pik analizi), bağlantı (tele-odyoloji, bulut altyapıları) ve yapay zekâ (Geçti/Kaldı sınıflandırma, SNR kestirimi) katmanlarının bütünleşmesiyle klasik işitme tarama modellerinin ötesine geçmiştir. Bu sistemler sayesinde taramalar daha hızlı, daha taşınabilir, daha doğru ve kullanıcıya daha az bağımlı hâle gelmiş; geniş nüfus taramaları, kırsal bölgeler ve ev temelli uygulamalar için erişilebilirlik büyük ölçüde artmıştır. Tarama sonrası FM ve Roger sistemleri gibi dijital işitsel destek teknolojilerinin devreye girmesi ise yalnızca işitme kaybının tespitini değil, bireyin eğitim, iletişim ve sosyal yaşamdaki işitsel katılımını da geliştiren daha geniş bir bakım çevrimi oluşturmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım,

biyomedikal cihaz teknolojilerinin işitme sağlığında yalnızca ölçüm üreten bir araç değildir, karar destek, veri akışı, uzaktan yönetim ve rehabilitasyon süreçlerinin ayrılmaz bir bileşeni hâline geldiğini göstermektedir.

Kaynakça

- AlSamhori, J. F., AlSamhori, A. R. F., Amourah, R. M., AlQadi, Y., Koro, Z. W., Haddad, T. R. A., ... & Nashwan, A. J. (2024). Artificial intelligence for hearing loss prevention, diagnosis, and management. *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*, 3, 100133. DOI: 10.1016/j.glmedi.2024.100133
- American Electroencephalographic Society. (1991). American Electroencephalographic Society guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8(2), 200–202.
- BC Early Hearing Program. (2022). Auditory brainstem response (ABR) protocol guidelines. Government of British Columbia.
- Belgin, E., & Şahlı, A. S. (2016). Temel odyoloji. Güneş Tıp Kitabevleri.
- British Society of Audiology (BSA). (2023). Recommended Procedure: Transient evoked otoacoustic emissions (TEOAE) measurement and distortion product otoacoustic emissions (DPOAE) measurement. BSA Publications.
- Burkard, R. F., Eggermont, J. J., & Don, M. (Eds.). (2007). *Auditory evoked potentials: Basic principles and clinical applications*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Chan, J., Ali, N., Najafi, A., Meehan, A., Mancl, L. R., Gallagher, E., Bly, R., & Gollakota, S. (2022). An off-the-shelf otoacoustic-emission probe for hearing screening via a smartphone. *Nature Biomedical Engineering*, 6(11), 1203–1213. DOI : 10.1038/s41551-022-00947-6
- Chiappa, K. H. (1997). *Evoked potentials in clinical medicine* (3rd ed.). Lippincott-Raven. DOI: 10.1056/NEJM198205133061904
- Ellison, J. C., Gorga, M., Cohn, E., Fitzpatrick, D., Sanford, C. A., & Keefe, D. H. (2012). Wideband acoustic transfer functions predict middle-ear effusion. *The Laryngoscope*, 122(4), 887–894. DOI: 10.1002/lary.23182
- Feeney, M. P., & Keefe, D. H. (1999). Acoustic reflex detection using wide-band acoustic reflectance, admittance, and power measurements. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42(5), 1029–1041. DOI: 10.1044/jslhr.4205.1029
- Feeney, M. P., Keefe, D. H., Hunter, L. L., Fitzpatrick, D. F., Garinis, A. C., Putterman, D. B., & McMillan, G. P. (2017). Normative wideband reflectance, equivalent admittance at the tympanic membrane, and acoustic stapedius reflex threshold in adults. *Ear and hearing*, 38(3), e142–e160. DOI: 10.1097/AUD.0000000000000399
- Hall, J. W. (2007). *New handbook of auditory evoked responses*. Pearson.
- Hu, H., Kollmeier, B., & Dietz, M. (2015). Reduction of stimulation coherent artifacts in electrically evoked auditory brainstem responses. *Bi-*

- omedical Signal Processing and Control*, 00, 1–14. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.05.015
- Hunter, L. L., Prieve, B. A., Kei, J., & Sanford, C. A. (2013). Pediatric applications of wideband acoustic immittance measures. *Ear and hearing*, 34, 36s-42s. DOI: 10.1097/AUD.0b013e31829d5158
- Interacoustics. (2023). *Otoacoustic emissions: Technical whitepaper and device specifications*. Interacoustics A/S.
- Krumm, M., & Syms, M. J. (2011). Teleaudiology. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 44(6), 1297-1304. DOI: 10.1016/j.otc.2011.08.006
- Lopez-Gordo, M. A., Fernández, E., Romero, S., Pelayo, F., & Prieto, A. (2014). Dry EEG electrodes. *Sensors*, 14(7), 12847–12870. DOI: 10.3390/s140712847
- Mahomed-Asmail, F., Swanepoel, D. W., Eikelboom, R. H., Myburgh, H., & Hall, J. W. (2016). Clinical validity of hearScreen™ smartphone hearing screening for school children. *Ear and hearing*, 37(1), e11-e17. DOI: 10.1097/AUD.0000000000000223
- McKearney, R. M., Bell, S. L., Chesnaye, M. A., & Simpson, D. M. (2022). Auditory brainstem response detection using machine learning: a comparison with statistical detection methods. *Ear and Hearing*, 43(3), 949-960. DOI: 10.1097/AUD.0000000000001151
- Mihajlović, V., Grundlehner, B., Vullers, R., & Penders, J. (2015). Wearable, wireless EEG solutions in daily life applications. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(1), 6–21. DOI: 10.1109/JBHI.2014.2328317
- Norrix, L. W., Camarota, K., Harris, F. P., & Dean, J. (2016). The effects of FM and hearing aid microphone settings, FM gain, and ambient noise levels on SNR at the tympanic membrane. *Journal of the American Academy of Audiology*, 27(02), 117-125. DOI: 10.3766/jaaa.15012
- Novelli, C. V. L., Sanfins, M. D., Skarżyński, P. H., Skarżyńska, M. B., Diniz-Hein, T. A., & Colella-Santos, M. F. (2024). Neonatal Hearing Screening Using Wideband Absorbance and Otoacoustic Emissions Measured Under Ambient and Pressurized Conditions. *Children*, 11(11), 1290. DOI: 10.3390/children11111290
- Peng, S., Zhao, Y., Yao, X., Yin, H., Ma, B., Liu, K., ... & Cao, Y. (2025). Using Machine Learning for Analysis of Wideband Acoustic Immittance and Assessment of Middle Ear Function in Infants. *Audiology Research*, 15(2), 35. DOI: 10.3390/audiolres15020035
- Picton, T. W. (2011). *Human auditory evoked potentials*. Plural Publishing.
- Polonenko, M. J., & Maddox, R. K. (2019). The parallel auditory brainstem response. *Trends in Hearing*, 23, 1–15. DOI: 10.1177/2331216519871395

- Rasetshwane, D. M., & Neely, S. T. (2011). Calibration of otoacoustic emission probe microphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), EL238-EL243. DOI: 10.1121/1.3632047
- Shah, M. A., Shah, I. A., Lee, D. G., & Hur, S. (2019). Design approaches of MEMS microphones for enhanced performance. *Journal of sensors*, 2019(1), 9294528. DOI: 10.1155/2019/9294528
- Shao, L., Zhang, J., Chen, X., Xu, D., Gu, H., Mu, Q., ... & Yu, C. (2025). Artificial intelligence-driven distributed acoustic sensing technology and engineering application. *Photonix*, 6(1), 4. DOI: 10.1186/s43074-025-00160-z
- Sininger, Y. S. (1993). Auditory brain stem response for objective measures of hearing. *Ear and Hearing*, 14(1), 23–30. DOI: 10.1097/00003446-199302000-00004
- Swanepoel, D. W., & Hall, J. W. (2010). A systematic review of telehealth applications in audiology. *Telemedicine and e-Health*, 16(2), 181–187. DOI: 10.1089/tmj.2009.0111
- Thibodeau, L. M. (2020). Benefits in speech recognition in noise with remote wireless microphones in group settings. *Journal of the American Academy of Audiology*, 31(06), 404–411. DOI: 10.3766/jaaa.19060
- World Health Organization (WHO). (2019). *WHO guideline: Recommendations on digital interventions for health system strengthening*. World Health Organization.
- Wolfe, J., Morais Duke, M., Schafer, E., Jones, C., Mülder, H. E., John, A., & Hudson, M. (2015). Evaluation of performance with an adaptive digital remote microphone system and a digital remote microphone audio-streaming accessory system. *American Journal of Audiology*, 24(3), 440–450. DOI: 10.1044/2015_AJA-15-0018
- Young, A. (2023). *Otoacoustic emissions*. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
- Zauli, M., Peppi, L. M., Di Bonaventura, L., Arcobelli, V. A., Spadotto, A., Diemberger, I., ... & De Marchi, L. (2023). Exploring microphone technologies for digital auscultation devices. *Micromachines*, 14(11), 2092. DOI: 10.3390/mi14112092