

Yapay Zeka Otoloji ve Odyoloji Alanlarına Ne Yenilikler Getirdi?

What Innovations Has Artificial Intelligence Brought to the Fields of Otology and Audiology?

Mümtaz Taner Torun

MTT: 0000-0002-5194-4234

Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Kulak Burun ve Boğaz Hastalıkları Anabilim Dalı, Bandırma/Balıkesir.

Öz

Yapay zekanın (YZ) hem otoloji hem de kulak burun boğaz (KBB) alanlarına önemli yenilikler getirerek tetkik, teşhis, tedavi ve cerrahi planlama gibi konularda önemli gelişmelere yol açacağı görülmektedir. YZ destekli odyometrilere objektif işitme testleri gerçekleştirilerek insan yorumuna olan ihtiyacı azaltabilir ve sonuçların doğruluğunu artırabilir. YZ algoritmaları ilaç rejimlerini analiz edebilir ve önceden işitme kaybı olan hastalarda veya koklear implant uygulanacak hastalarda işitme hasarı riskini tahmin edebilir. YZ destekli görüntü analizi, BT veya MRI taramalarından otoskleroz, kemikçik zincir defektleri, endolenfatik hidropsun saptanması, beyindeki tinnitus lokalizasyonu ve kolesteatom gibi durumların teşhis edilmesine yüksek doğruluk oranları ile destek olabilmektedir. YZ işitme cihazı ayarlarını bireysel özelliklere göre optimize edebilir. Kişisel özelliklere göre tedavi şeması oluşturulması, cerrahi navigasyonlarda kullanım, 3D görüntüler oluşturarak temporal kemik gibi yapıların cerrahisi sırasında komplikasyon riskini azaltmada etkili olabilir. İşitme kaybı tahminleri ve vestibüler bozuklukların tanı ve tedavisi gibi karmaşık konularda YZ destekli uygulamalar ile hızlı tanı ve doğru tedavi planlaması yapılabilmektedir.

YZ destekli teletıp platformları, uzaktan konsültasyon ve izleme sağlayarak yetersiz hizmet alan bölgelerdeki hastaların sağlık sistemine ulaşımını hızlandırarak zaman kayıplarını önleyebilir. Sanal asistanlar sayesinde randevuların planlanması, tıbbi kayıtların işlenmesi ve hasta/öğrenci/asistan eğitimi sağlanması gibi görevlerde KBB uzmanlarına yardımcı olabilir.

YZ teknolojisi gelişmeye devam ettikçe, bu alanlarda daha da heyecan verici gelişmeler beklenebilir! Derlemede bu konulara değinilerek güncel literatür bilgileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, otoloji, odyoloji, işitme.

Abstract

Artificial intelligence (AI) is set to bring significant innovations to both otology and otorhinolaryngology (ORL), significantly improving examination, diagnosis, treatment, and surgical planning. AI-enabled audiometry performs objective hearing tests, reducing the need for human interpretation and improving the accuracy of results. AI algorithms can analyze drug regimens and predict the risk of hearing damage in patients with pre-existing hearing loss or patients undergoing cochlear implants. AI-assisted image analysis can help diagnose conditions such as otosclerosis, ossicular chain defects, detection of endolymphatic hydrops, localization of tinnitus in the brain, and cholesteatoma from CT or MRI scans with high accuracy rates. AI can optimize hearing aid settings according to individual characteristics. It may effectively reduce the risk of complications during surgery of structures such as temporal bone by creating 3D images, creating treatment schemes based on personal characteristics, and using surgical navigation. Rapid diagnosis and accurate treatment planning are made with AI-supported applications on complex issues such as hearing loss expectations and diagnosis and treatment of vestibular disorders.

AI-enabled telemedicine platforms can provide remote consultation and monitoring, speed up access to the health care system for patients in underserved areas, and prevent lost time. Virtual assistants can help ENT specialists with tasks such as scheduling appointments, processing medical records, and providing patient/student/resident education.

As AI technology evolves, even more exciting developments can be expected in similar fields. This review discusses the topics mentioned above and presents information on the current literature.

Keywords: Artificial intelligence, otology, audiology, hearing.



1. Giriş

Yapay zeka (YZ), insan zekasının taklit edilmesi, genişletilmesi ve yaygınlaştırılması için teori, yöntem, teknik ve uygulama sistemini araştırmak ve geliştirmek için bilgisayar teknolojisini kullanan yeni bir teknik disiplin olup insan zekasının yaptıklarını hatta daha fazlasını yapabilmeyi amaçlar. YZ, çeşitli algoritmalar ve kurallar kullanarak farklı veri setlerini analiz eden, makinelerin zekasını geliştirmek için ortak çalışan sayısız teknoloji ve yöntemlerden oluşmaktadır. YZ'yi işletme sürecine ve iş akışına entegre ederken farklı bileşenlerini anlamak, ondan etkin biçimde faydalanmamıza yardımcı olabilir.

YZ, araştırma alanında gelişmiş bir ağa sahip olsa da asıl olarak doğal dil işleme ve makine öğrenmesini içerir. Doğal dil işleme; Google'da sesli arama yapılırken, konuşulan dilin gerçek zamanlı başka bir dile tercümesinde, aranan bilginin farklı kaynaklardan bulunarak süzülmesinde, yazıların işlenmesinde, sesli Siri gibi YZ botlarında, bankalardaki otomatik yanıt sistemlerinde kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi ise geçmiş veriler ya da deneyimlere dayalı yeni bir bilgi oluşturmaya olanak sunan, bir grup matematiksel teknik ve hesaplamalar olarak ifade edilebilir. Makine öğrenmesi; denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olarak incelenebilir.

Son yıllarda özellikle sağlık alanındaki verilerin hızla artması ve daha çok ulaşılabilir olması, veri kirliliği ve karmaşıklığına neden olabilmektedir. Başarılı YZ uygulamaları sayesinde bu veriler süzülerek doğru bilgiye ulaşım imkanı artmaktadır. Ayrıca YZ teknolojisi, karmaşık ve büyük verilerin altında saklanan klinik bilgileri kısa sürede ulaşarak doktorların yargı ve karar mekanizmalarında önemli rol oynayabilir. Yeni YZ teknolojisi sayesinde, geleneksel medikal yaklaşımlar değişmektedir. Örneğin, bir hastalığın radyolojik, patolojik, endoskopik, ultrasonografik ve biyokimyasal incelemelere dayalı teşhisi, yüksek doğruluk ve az iş yükü ile etkin olarak desteklenebilmektedir (1). Ayrıca YZ' nin hastalıkların tedavisi, izlenmesi ve sınıflandırılmasında da başarıyla kullanılabilmesinin yanı sıra ilaç, cihaz ve aşı üretimi, tıp eğitimi, sağlık yönetimi, tıbbi tedaviler, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve karma gerçeklik teknolojileri gibi çeşitli alanlarda kullanım imkanı da ortaya çıkmıştır.

YZ' nin sağlık alanında en umut vaat eden tekniği,

derin/yapay sinir ağları yoluyla derin öğrenmedir. Derin öğrenme; asgari bir adet yapay sinir ağının kullanıldığı ve çok sayıda algoritma ile bilgisayarın eldeki bilgilerden yeni veriler elde etmesidir. Nöronlar; giriş, gizli ve çıkış katman denilen katmanlara ayrılır. Giriş katmanı ilk verileri alır ve girişleri gizli katmana gönderir. Gizli katmanlar girdilerin matematiksel hesaplamalarını yapar. Yapay sinir ağları oluşturmadaki zorluklardan biri her bir katman için nöronların sayısının ne kadar olması gerektiği sorunun yanı sıra gizli katmanların miktarına da karar vermektir. Derin öğrenmedeki derin ifadesi birden fazla gizli katmanın olmasını belirtir. Çıktı katmanı, çıktı bilgileri oluşturur.

2. İşitme Cihazları ve Yapay Zeka

İşitme cihazı kullanan hastalar ses kalitesinin düşüklüğü, gürültüde konuşma anlaşılma performansı ve işitme kazanç seviyelerinden şikâyet etmektedirler. İşitme cihazları bir klinisyen tarafından uygun şekilde ayarlanabilir, ancak bu hem klinisyene önemli bir yük getirir hem de tüm kullanıcılar için bir seçenek olamayabilir. İşitme cihazı ayarlarını tahmin eden algoritmalar veya kullanıcıların tercihlerine göre yerleşik makine öğrenimine sahip işitme cihazları, kullanıcılara kolaylık sağlayarak tekrarlayan klinik ziyaretlerini en aza indirebilir.

İşitme cihazındaki algoritmaları iyileştirmeye yönelik ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda başlamıştır ve lineer amplifikasyon ile ilgili formüller (NAL-National Acoustics Laboratories) 1970'lerde geliştirilmiştir (2). 2006'da geliştirilen Siemens Centra®, dahili makine öğrenimi işlevine sahip ilk ticari işitme cihazlarından biri olup bireyin ses kontrolü ayarlarından tercih ettiği kazançları "öğrenir" ve açılıştan varsayılan ayarları kademeli olarak değiştirirdi (3). Keidser ve Alamudi, yeni bir cihaz ile yaptıkları çalışmada katılımcılara makine öğrenmesi ile eğitilmiş ve eğitilmemiş ayarlar sunmuş, katılımcıların eğitilmiş ayarları daha fazla tercih ettiklerini bildirmişlerdir (4). 2016 yılında yapılan bir başka çalışmada makine öğrenmesi yöntemi olarak logistic regression kullanılmış ve kullanıcının tercih ettiği ayarlara göre öğrenebilen bir akıllı telefon uygulamasının geliştirilmesi amaçlanmış, katılımcıların %49,2' si lojistik

regresyon ile eğitilen ayarları tercih ederken, %27,6' si lineer amplifikasyonu tercih etmiş; %23,2' si ise herhangi bir farklılık bildirmemiştir (5).

Konuşma kalitesinin bozulması sorunu, işitme cihazı geliştiricilerinin karşılaştığı en önemli zorluklardan biri olmaya devam etmektedir. Konuşma geliştirme, bozulmuş konuşmanın kalitesini ve anlaşılabilirliğini iyileştirmeye odaklanır. Konuşma geliştirme teknolojileri bir mikrofondan ses sinyallerini alır, sinyalleri temizler ve işlenmiş sesi konuşma tanıma yazılımı gibi bir işlemciye iletir. Arka plan gürültüsünün etkisini azaltmak için önceki yıllarda spektral çıkarma, wiener filtreleme ve minimum ortalama kare hatası gibi çeşitli teknikler kullanılmıştır (6-8). Derin öğrenme tabanlı modeller, geleneksel iyileştirme yöntemlerine kıyasla gürültü azaltma ve konuşma kalitesinin ortalama algısal değerlendirmesinde önemli gelişmeler göstermiştir (9,10). Sinir ağları yöntemi kullanılan çalışmalarda katılımcıların geleneksel yöntemlere göre YZ destekli modelleri tercih ettiği ve bu modellerin konuşma algısında daha iyi sonuçlar elde ettiği bildirilmektedir (9-11). Ayrıca YZ teknolojisi, konuşma tanıma, çeviri, hatırlatıcı ayarlama ve hatta düşme tespiti gibi işlevlerle donatılmış işitme cihazları da sunar.

3. Vestibüler bozukluklar ve yapay zeka

Vestibüler bozukluklar geniş bir yelpazeye sahip olduğu için bu hastalıkların tanı ve tedavisinde kullanılmak üzere geliştirilecek sistemler üzerinde uzun yıllardır çalışılmaktadır. 1990' yapılan bir çalışmada bilgi tabanlı bir uzman sistem ilk adımda girilen verilere dayanarak olası bir tanı önermiş, daha ileri tetkikler istemiş ve ikinci adımda ardından nihai bir tanı önermiştir. Bu sistem, 170 hasta üzerinde uygulandığında, sistemin tasarımında yer alan insan uzmanlarla %97'lik bir tanısal uyum oranı elde etmiştir (12). 1999' da yapılan başka bir çalışmada genetik algoritmalar kullanılmış, geliştirilmek istenen "ONE" isimli vertigo veri tabanı Meniere hastalığı dışındaki tüm vestibüler hastalıklarda %90 oranında doğru teşhise ulaşmıştır (13). Sonraki yıllarda ONE veri tabanı geliştirilerek daha fazla sayıda vestibüler bozukluk (Meniere hastalığı, vestibüler schwannom ve ani işitme kaybını da içeren) sisteme dahil edilmiş, %80 ila %96 aralığında doğru sonuca ulaşılmıştır (14,15).

Bunun yanında YZ modelleri, baş impuls testlerinden (vHIT) elde edilen vestibülo-oküler refleks (VOR) verilerini analiz eder ve geleneksel tanı yöntemleriyle karşılaştırılabilir yüksek doğruluk elde edebilir (16).

Yeni tanı kılavuzları, gelişmiş vestibüler muayeneler ve bilateral vestibülopati için vestibüler implantlar gibi yenilikçi tedaviler araştırılmaktadır. Bu gelişmeler hastalığı iyileştirmek için hem YZ hem de geleneksel klinik yöntemlerden yararlanarak teşhis ve tedaviye yönelik kapsamlı bir yaklaşım sağlayacaktır. YZ, erken ve doğru tespit için gelişmiş araçlar sağlayarak, ayırıcı tanıya yardımcı olarak ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerini destekleyerek vestibüler bozukluk tanı ve tedavisinde etkili rol oynayacaktır.

Meniere hastalığı (MH), tekrarlayan vertigo atakları, işitme kaybı, işitsel dolgunluk ve kulak çınlaması gibi dalgalanan işitsel semptomlarla karakterize, etyolojisi halen net olarak belirlenememiş bir iç kulak hastalığıdır. Postmortem temporal kemik çalışmalarında, patognomonik olmasa da histolojik olarak endolenfatik hidrops (EH) dikkat çekmektedir (17). MH'nin tanı kriterlerine bakıldığında tek objektif test odyometridir. YZ tabanlı son araştırmalar, objektif belirteçleri tanımlamaya ve MH için teşhis doğruluğunu artırmaya odaklanmıştır. Makine öğrenimi modelleri gibi teknikler, vestibüler fonksiyon testlerini ve odyometrik modelleri analiz etmek için araştırılmaktadır. Endolenfatik kesenin gadolinyumlu manyetik rezonans ile görüntülenmesi de hastalığın tanısında faydalı olabilmektedir (18). En son gelişmeler, endolenfatik alanın tam otomatik 3D segmentasyonuna ve hacimsel kantifikasyonuna bile izin vermekte, bu da görüntülemeye EH değerlendirmesinin otomatizasyonu ve standardizasyonu için önemli bir adım gibi görünmektedir (19). Yapılan bir çalışmada, geleneksel manyetik rezonans taramalarında MH'li hastalar ve kontroller arasındaki görüntü özelliklerindeki farklılıkları tespit ederek MH tanısında radyomiklerin (kantitatif görüntü özelliklerini çıkararak ve bunları klinik sonuçlarla ilişkilendirerek tıbbi görüntüleri elde edip yüksek boyutlu verilere dönüştürme süreci) olası değerini gösterilmiş, MH olan hastaları belirlemede kesin ve yüksek tanısal performans sağladığı bildirilmiştir (20).

4. İşitme kaybı tahminleri ve yapay zeka

Çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinin otoakustik emisyon ve odyometrik saf ton eşiklerinde yüksek sensitivite ve spesifiteyle işitme oranlarını tahmin ettiği bildirilmektedir (21-23). Son zamanlarda, makine öğrenme tekniklerini karşılaştıran tahmin modelleri geliştirmiş ve farklı algoritmalar arasında oldukça tutarlı doğruluk elde etmiştir (24,25). Bu nedenle, orta ve ileri derecede sensörinöral işitme kaybının objektif tanısı için makine öğrenimi tekniklerinin geliştirilmesine ilgi duyulmaktadır ancak tek bir makine öğrenimi algoritmasının tutarlı bir şekilde en iyi tahmin yeteneğine sahip olduğu tespit edilmemiştir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü tipik olarak hiçbir algoritma diğerinden kesin olarak daha iyi değildir, bunun yerine belirli bir veri setinin boyutuna ve kalitesine bağlı olarak optimize edilmelidir (3). Yapılan iki farklı çalışmada çelik fabrikasında, gürültüye maruziyeti olan işçilerin işitme kayıplarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır ve farklı makine öğrenmesi yöntemleri ile yüksek doğruluk oranlarıyla işitme kaybı eşikleri saptanmıştır (25,26). İşitme eşikleri ile işitme kaybı semptomları arasındaki korelasyonun araştırıldığı bir çalışmada hibrit makine öğrenmesi kullanılmış ve işitme kaybı semptomlarını tanımlamadaki performansının küçük bir hata oranıyla verimli olduğu gösterilmiştir (27).

Objektif olarak işitme değerlendirilmesini sağlayan işitsel beyin sapı cevaplarının (İBSC) sınıflaması için de YZ çalışmaları yapılmaktadır. İBSC değerlendirmelerinde klinisyenin tecrübesi önemlidir ve klinisyenin öznel görüşüne dayandığı için tutarsız sonuçlar elde edilmesi olasıdır. YZ sayesinde bu sorun aşılabılır hem de daha kısa sürede sonuca ulaşılabilir. McKearney ve MacKinnon; İBSC'leri "kesin yanıt", "kesin olmayan yanıt" ve sonuç yok" şeklinde eşleştirerek %90' ın üzerinde doğruluk, sensitivite ve spesifite elde ettiklerini bildirmişlerdir (28). Farklı çalışmalarda da İBSC sınıflamasında yüksek doğruluk oranları bildirilmektedir (29,30).

5. KBB alanında görüntü işleme teknolojileri ve yapay zeka

Görüntü işleme, genellikle görüntü iyileştirme (kontrast ve parlaklık ayarları gibi), görüntü restorasyonu

(bulanık görüntülerin netleştirilmesi gibi) ve görüntü segmentasyonu (görüntüyü anlamlı parçalara ayırma) gibi temel teknikleri içerir. Bu adımlar, bilgisayarların görüntüleri daha anlamlı ve analiz edilebilir hale getirmesini sağlar. Segmentasyon, nesne tespiti ve tanıma gibi daha karmaşık görevler için temel oluşturur. Çalışmalar, YZ algoritmalarının, özellikle de derin öğrenme modellerinin, timpanik membran görüntülerini %99,16'ya ulaşan oranlarda yüksek tanısal doğrulukla sınıflandırabildiğini göstermiştir (31). Böylece YZ destekli görüntüleme sistemleri sağlık alanındaki öğrenci ve asistan eğitimlerinde kullanılabilir, KBB dışı branşlarda (acil servis, aile hekimi, pratisyen ve pediatri gibi) teşhislerin güvenilirliğini artırır ve özellikle sağlık birimine erişimin zor olduğu bölgelerde teletıp ve birinci basamak uygulamalarını destekleyebilir. Timpanik membranın tarafı ve perforasyon varlığının araştırıldığı bir başka çalışmada perforasyon %91 doğrulukla belirlenmişken, timpanik membranın tarafı ise %97.9 oranında doğru tahmin edilmiştir (32).

YZ kullanılarak otolojik cerrahi planlama yapılabilir. Temporal kemik BT' sindeki kritik yapılar analiz edilerek simülasyon için ayrıntılı 3D modeller oluşturulur ve otolojik cerrahi kolaylaştırılabilir. Ayrıca koklear implantasyonda sinyal işlemenin artırılması, ameliyat mekaniğinin geliştirilmesi ve koklear implant performansını artırmaya yönelik kişiselleştirilmiş yaklaşımlar makine öğrenmesi yöntemleriyle yapılabilir (33).

6. Tinnitus ve yapay zeka

Subjektif tinnitus, dışarıdan herhangi bir ses gelmediği halde kulaklarda gürültü veya çınlama algılanmasıyla karakterize yaygın bir durumdur. Tinnitus tanısında ve şiddetini belirlemede objektif bir test olmayıp hastalığın kesin bir tedavisi de yoktur. Hem hayvan hem de insan çalışmaları, merkezi sinir sisteminde tinnitus ile ilişkili değişiklikler olduğunu göstermiş, tinnitus ile ilgili beyin bölgelerini lokalize etmek için ise farklı fonksiyonel görüntüleme teknikleri kullanılmıştır (34,35). Jedrzejczak ve ark. Chatbot'ların tinnitus saptayabilmesi için 10 soruluk bir anket hazırlamışlar ancak Chatbot'ların ciddi uygulamalarda kullanması için henüz yeterince hazır olmadığını bildirmişlerdir (36). Shoushtarian

ve ark. fNIRS sinyallerine istatistiksel ve makine öğrenimi algoritmaları uygulayarak tinnituslu bireyleri kontrollerden ayırt etmek için bir çalışma tasarlamışlar, tinnitus hastalarını kontrollerden ayıran görsel ve işitsel uyarılmış yanıt ve dinlenme durumu bağlantı özelliklerini ve tinnitus hastalarını düşük ve yüksek şiddet seviyesine göre sınıflandıran temporal-okspital bağlantı özelliklerini belirlemişlerdir (37).

Tinnitus ile YZ ilişkili az sayıdaki çalışmadan da anlaşılmaktadır ki bu alanda çok daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

7. Sonuç

YZ algoritmaları işitme kaybı teşhisi, konuşma tanıma, kulak sağlığı izleme, kişiselleştirilmiş tedavi, hastalıkların teşhisi ve cerrahi planlama gibi otoloji ve odyolojinin çeşitli alanlarında giderek artan kullanım alanı bulmaktadır. Gelecekte YZ büyük veri kümelelerini analiz ederek ve insanların gözden kaçırabileceği kalıpları belirleyerek teşhis doğruluğunu ve tedavi sonuçlarını iyileştirmeye devam edecektir. YZ destekli giyilebilir cihazlar yaygın hale gelecek, sağlık ölçümlerinin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayacak ve daha erken müdahalelere olanak tanıyacaktır. Teletıp daha yaygın hale gelerek hastaların sağlık uzmanlarına uzaktan danışmasına ve zamanında bakım almasına olanak tanıyacaktır. YZ destekli implante edilebilir cihazlar işitme rehabilitasyonu ve denge düzenleme gibi işlevleri iyileştirecektir. YZ destekli kişiselleştirilmiş tanı ve tedavi şemaları yaygın hale gelecek ve bireysel genetik profillere ve sağlık verilerine dayalı özel tedavilere olanak sağlayacaktır.

Kaynaklar

1. Liu PR, Lu L, Zhang JY, Huo TT, Liu SX, Ye ZW. Application of artificial intelligence in medicine: An overview. *Curr Med Sci*. 2021 Dec;41(6):1105-1115.
2. Kates JM. On the feasibility of using neural nets to derive hearing-aid prescriptive procedures. *J Acoust Soc Am* 1995;98:172-180.
3. You E, Lin V, Mijovic T, Eskander A, Crowson MG. Artificial Intelligence Applications in Otolaryngology: A State of the Art Review. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2020 Dec;163(6):1123-1133.
4. Keidser G, Alamudi K. Real-life efficacy and reliability of training a hearing aid. *Ear Hear*. 2013 Sep;34(5):619-29.
5. Aldaz G, Puria S, Leifer LJ. Smartphone-based system for learning and inferring hearing aid settings. *J Am Acad Audiol*. 2016;27:732-749.
6. Boll S. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction. *IEEE Trans Acoust*. 1979;27:113-120.
7. Lim JS, Oppenheim AV. Enhancement and bandwidth compression of noisy speech. *Proc IEEE*. 1979;67:1586-1604.
8. Ephraim Y, Malah D. Speech enhancement using a minimum mean square error short-time spectral amplitude estimator. *IEEE Trans Acoust*. 1984;32:1109-1121.
9. Xu Y, Du J, Dai L, Lee C. A regression approach to speech enhancement based on deep neural networks. *IEEE-ACM T Audio SPE*. 2015;23:7-19.
10. Kumar A, Florencio D. Speech enhancement in multiple-noise conditions using deep neural networks. *arXiv preprint arXiv*. 2016;160502427.
11. Kates JM, Arehart KH, Souza PE. Integrating cognitive and peripheral factors in predicting hearing-aid processing effectiveness. *J Acoust Soc Am*. 2013;134:4458.
12. Gavila'n C, Gallego J, Gavila'n J. 'Carnisel': an expert system for vestibular diagnosis. *Acta Otolaryngol*. 1990;110:161-167. 23.
13. Kentala E, Auramo Y, Pyykko' I, Juhola M. Otoneurological expert system. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1996;105:654-658.
14. Laurikkala JPS, Kentala EL, Juhola M, Pyykko' IV. A novel machine learning program applied to discover otological diagnoses. *Scand Audiol*. 2001;30:100-102.
15. Siermala M, Juhola M, Kentala E. Neural network classification of otoneurological data and its visualization. *Comput Biol Med*. 2008;38:858-866.
16. Pathirana MB, Szmulewicz DJ. Machine Learning Based Diagnosis of Vertigo using Video Head Impulse Test. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2023 Jul;2023:1-5.
17. Sando I, Orita Y, Hirsch BE. Pathology and pathophysiology of Meniere's disease. *Otolaryngol Clin North Am*. 2002 Jun;35(3):517-28.
18. Boegle R, Gerb J, Kierig E, Becker-Bense S, Ertl-Wagner B, Dieterich M, et al. Intravenous delayed gadolinium-enhanced MR imaging of the endolymphatic space: A methodological comparative study. *Front Neurol*. 2021 Apr 22;12:647296.
19. Cho YS, Cho K, Park CJ, Chung MJ, Kim JH, Kim K, et al. Automated measurement of hydrops ratio from MRI in patients with Ménière's disease using CNN-based segmentation. *Sci Rep*. 2020 Apr 24;10(1):7003.
20. van der Lubbe MFJA, Vaidyanathan A, de Wit M, van den Burg EL, Postma AA, Brountjes TD, Bilderbeek-Beckers MAL, et al. A non-invasive, automated diagnosis of Meniere's disease using radiomics

- and machine learning on conventional magnetic resonance imaging: A multicentric, case-controlled feasibility study. *Radiol Med*. 2022 Jan;127(1):72-82.
21. Kimberley BP, Kimberley BM, Roth L. A neural network approach to the prediction of pure tone thresholds with distortion product emissions. *Ear Nose Throat J*. 1994;73:812-813.
22. Buller G, Lutman ME. Automatic classification of transiently evoked otoacoustic emissions using an artificial neural network. *Br J Audiol*. 1998;32:235-247.
23. de Waal R, Hugo R, Soer M, Kruiger JJ. Predicting hearing loss from otoacoustic emissions using an artificial neural network. *S Afr J Commun Disord*. 2002;49:28-39.
24. Bing D, Ying J, Miao J, Lan L, Wang D, Zhao L, et al. Predicting the hearing outcome in sudden sensorineural hearing loss via machine learning models. *Clin Otolaryngol*. 2018;43:868-874.
25. Zhao Y, Li J, Zhang M, Lu Y, Xie H, Tian Y, et al. Machine learning models for the hearing impairment prediction in workers exposed to complex industrial noise: a pilot study. *Ear Hear*. 2019;40:690-699.
26. Aliabadi M, Farhadian M, Darvishi E. Prediction of hearing loss among the noise-exposed workers in a steel factory using artificial intelligence approach. *Int Arch Occup Environ Health*. 2015;88:779-787.
27. Abd Ghani MK, Noma NG, Mohammed MA, Abdulkareem KH, Garcia-Zapirain B, Maashi MS, et al. Innovative Artificial Intelligence Approach for Hearing-Loss Symptoms Identification Model Using Machine Learning Techniques. *Sustainability*. 2021; 13(10):5406.
28. McKearney RM, MacKinnon RC. Objective auditory brainstem response classification using machine learning. *Int J Audiol*. 2019;58:224-230.
29. Davey R, McCullagh P, Lightbody G, McAllister G. Auditory brainstem response classification: A hybrid model using time and frequency features. *Artif Intell Med*. 2007;40:1-14.
30. Dass S, Holi MS, Soundararajan K. Classification of brainstem auditory evoked potentials using artificial neural network based on time and frequency domain features. *J Clin Eng*. 2016;41:72-82.
31. Song D, Kim T, Lee Y, Kim J. Image-Based Artificial Intelligence Technology for Diagnosing Middle Ear Diseases: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*. 2023; 12(18):5831.
32. Lee JY, Choi S-H, Chung JW. Automated classification of the tympanic membrane using a convolutional neural network. *Appl Sci*. 2019;9:1827.
33. Crowson MG, Lin V, Chen JM, Chan TCY. Machine Learning and Cochlear Implantation-A Structured Review of Opportunities and Challenges. *Otol Neurotol*. 2020 Jan;41(1):e36-e45.
34. Elgoyhen AB, Langguth B, De Ridder D, Vanneste S. Tinnitus: perspectives from human neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*. 2015;16:632
35. Lanting CP, de Kleine E, van Dijk P. Neural activity underlying tinnitus generation: results from PET and fMRI. *Hear Res*. 2009;255(1-2):1-13.
36. Jedrzejczak WW, Skarzynski PH, Raj-Kozia D, Sanfins MD, Hatzopoulos S, Kochanek K. ChatGPT for Tinnitus Information and Support: Response Accuracy and Retest after Three and Six Months. *Brain Sci*. 2024 May 7;14(5):465.
37. Shoushtarian M, Alizadehsani R, Khosravi A, Acevedo N, McKay CM, Nahavandi S, et al. Objective measurement of tinnitus using functional near-infrared spectroscopy and machine learning. *PLoS One*. 2020 Nov 18;15(11):e0241695.