



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK
AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ**

Talha ÇÖGEN

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Eyyup KARA**

Odyoloji Anabilim Dalı

Odyoloji, Dil ve Konuşma Bozuklukları, Doktora Programı

Ekim, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Talha ÇÖGEN tarafından, **Dr. Öğr. Üyesi Eyyup KARA** danışmanlığında hazırlanan **NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **22/10/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Dr. Öğr. Üyesi Eyyup Kara İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Odyoloji Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Esra ÖZCEBE İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Odyoloji Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Haydar Murat YENER İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kulak Burun Boğaz Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Ahmet ATAŞ Koç Üniversitesi Kulak Burun Boğaz Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Oğuz YILMAZ İstanbul Medipol Üniversitesi Odyoloji Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Talha ÇÖGEN

(İmza)



Anneme...

BÜTÇE DESTEKLERİ

NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım, klinik süreçlerim ve akademik çalışmalarım boyunca engin bilgi ve deneyimlerini her daim benimle paylaşan ve her zaman desteğini sunan tez danışmanım ve kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eyyup KARA'ya,

Eğitim ve çalışma hayatım boyunca desteğini her zaman hissettiğim değerli Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Esra ÖZCEBE'ye

Eğitim hayatımda ve klinik yaşantımda her daim yol gösteren, bilgi ve tecrübelerinden daima faydalandığım kıymetli hocam Sayın Dr. Ody. Halide ÇETİN KARA'ya,

Eğitim ve çalışma hayatım boyunca bilgilerinden ve desteklerinden daima faydalandığım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ATAŞ'a,

İyi ve kötü günlerimde yanımda olan, desteğini her zaman hissettiğim değerli yol arkadaşım Fatma TELCİ'ye.

Destek ve iş birliğiyle daima yanımda olan değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Dr. Ebru KARA, Arş. Gör. Dr. Züleyha Dilek GÜLMEZ, Arş. Gör. Yeşim ORUÇ, Öğr. Gör. Dr. Melda ACAR, Dr. Ody. Burcu DENİZ, Dr. Ody. Bengi YERLİKAYA, Psk. Işık BALTACI ve Arş. Gör. Nurşah ÖZAL'a,

İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Hastanesi KBB Odyoloji Bölümü'nün kıymetli çalışanlarına,

Doktora eğitimime TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı ile destekte bulunan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na ve TÜBİTAK'a,

Maddi ve manevi destekleri ile üzerimde emekleri olan aileme teşekkür ederim.

Ekim 2024

Talha ÇÖGEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ.....	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xvi
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. PERİFERİK İŞİTME SİSTEMİ ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ	3
2.1.1. Dış Kulak.....	3
2.1.2. Orta Kulak	5
2.1.3. İç Kulak	7
2.1.4. İşitme Siniri	16
2.2. KOKLEA VE İŞİTME SİNİRİ MEKANİKLERİ.....	17
2.2.1. İlerleyen Dalga Teorisi.....	17
2.2.2. Tonotopik Organizasyon	19
2.2.3. Elektromotilite.....	20
2.2.4. Koklear Amplifikasyon	21
2.2.5. Koklear Nonlinearite	23
2.2.6. Faz Kilitleme	25
2.2.7. Yayılım (Volley) Prensibi	25
2.3. SANTRAL İŞİTME SİSTEMİ ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ.....	26
2.4. İŞİTSEL NÖRAL SÜREÇLERLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ KAVRAMLAR	29
2.4.1. Lateral İnhibisyon	29

2.4.2. Spektral ve Temporal Ayıklama	30
2.4.3. Stokastik Rezonans	31
2.5. PSİKOAKUSTİK SÜREÇLER.....	32
2.5.1. Psikoakustik Araştırmaların Tarihçesi	32
2.6. PSİKOAKUSTİKLE İLİŞKİLİ TEMEL KAVRAMLAR	34
2.6.1. Kritik Bant.....	34
2.6.2. İşitsel Filtreler	35
2.6.3. Maskeleye ve Maskeleye Türleri	37
2.6.4. Maskenin Yukarı Yayılımı.....	38
2.6.5. Sinyal Tespit Teorisi	39
2.6.6. Spektral Çözünürlük ve İşitsel Ayar Eğrileri	40
2.7. TEMPORAL İŞİTSEL İŞLEMLEMENİN TEMEL SÜREÇLERİ	41
2.7.1. Temporal Entegrasyon	42
2.7.2. Temporal Keskinlik (Çözünürlük)	42
2.7.3. Sesin Temporal Yapısının Doğru Temsili.....	42
2.7.4. Ötüm Başlangıç Süresi (Voicing Onset Time-VOT).....	43
2.7.5. Aralık Tespit Etme Becerisi	43
2.8. TEMPORAL İŞLEMLEMEDE ADAPTASYON MODELİ	45
2.8.1. Koklear Uyarım ve Sinaptik Süreçler	45
2.8.2. Stimülasyon Sırasında Periferik Adaptasyon	46
2.8.3. İleri Maskeleye ve Adaptasyon.....	46
2.8.4. Sinaptik Depresyon ve Aralık Tespiti	47
2.9. KLASİK ARALIK TESPİT ETME TESTLERİ	48
2.9.1. İşitsel Füzyon Testi	48
2.9.2. Gürültü İçinde Aralık Tespit Etme Testi.....	48
2.9.3. Rastgele Aralık Tespit Etme Testi	48
2.9.4. Adaptif Temporal Çözünürlük Testi	49
2.10. TEMPORAL AYAR EĞRİLERİ	49
3. YÖNTEM	51
3.1. ETİK KURUL İZNİ VE GÖNÜLLÜ KATILIM	51
3.2. KATILIMCILAR.....	51
3.3. ODYOLOJİK DEĞERLENDİRME	52
3.4. AKUSTİK İMMİTANSMETRİK DEĞERLENDİRME	53
3.5. HİPERAKUZİ DEĞERLENDİRMESİ	53

3.6. AUDIO HUB PSİKOAKUSTİK DEĞERLENDİRME MODÜLÜ PROTOTİPİNİN GELİŞTİRİLMESİ	53
3.6.1. Kullanılan Yazılım Dili ve Kütüphaneler	54
3.6.2. Audio Hub Arayüzü	55
3.6.3. Hasta Ekleme Arayüzü.....	55
3.6.4. Saf Ses Odyometri Arayüzü.....	56
3.6.5. Gürültüde Aralık Tespit Etme Modülü (GIN Suite) Arayüzü.....	56
3.6.6. Modifiye Aralık Tespit Etme (GDT Suite) Arayüzü	57
3.7. KULLANILAN UYARANLAR VE KALİBRASYON	59
3.7.1. Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE).....	59
3.7.2. Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE)	60
3.7.3. Kalibrasyon Süreci	64
3.8. DENEY DÜZENEGİ.....	66
3.9. GATE VE MATE TESTLERİNDE TOPLANAN KATILIMCI CEVAPLARININ MODELLENMESİ	70
3.9.1. Weibull Dağılımı.....	71
3.9.2. Lojistik Regresyon Modeli.....	71
3.9.3. Modifiye Lojistik Regresyon Modeli	72
3.10. İSTATİSTİKSEL ANALİZ	73
4. BULGULAR	74
4.1. DEMOGRAFİK VERİLER VE İŞİTME DEĞERLENDİRME BULGULARI	74
4.2. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN EN UYGUN MODELİN BELİRLENMESİ	75
4.3. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KULAK VE CİNSİYET KATEGORİLERİNDE KARŞILAŞTIRILMASI	81
4.4. FARKLI GÜRÜLTÜ DURUMLARINDA DEĞİŞEN UYARAN FREKANSINA GÖRE ELDE EDİLEN ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	85
4.5. FARKLI UYARAN FREKANSLARINDA DEĞİŞEN GÜRÜLTÜ DURUMLARINA GÖRE ELDE EDİLEN ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	92
4.6. MATE TESTİ HİYERARŞİK DOĞRUSAL REGRESYON MODELİ.....	99
5. TARTIŞMA.....	102
5.1. ODYOLOJİK DEĞERLENDİRME	103
5.2. ARALIK TESPİT ETME EŞİĞİ İÇİN MODEL SEÇİMİ	103
5.3. CİNSİYET VE KULAK KARŞILAŞTIRMASI.....	105

5.4. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	105
5.4.1. Gürültü Türüne Göre Aralık Tespit Etme Eşikleri.....	105
5.4.2. Uyaran Frekansına Göre Aralık Tespit Etme Eşikleri	107
5.5. HİYERARŞİK DOĞRUSAL MODEL	108
5.6. BEKLENEN VE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	109
5.7. ÖNGÖRÜLEN TEMPORAL ÇÖZÜNÜRLÜK MODELİ.....	114
5.8. ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI VE İLERİ ÇALIŞMALAR.....	117
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	118
KAYNAKLAR.....	120
EKLER.....	137
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	140
ETİK KURUL İZİN YAZISI	141
KURUM İZNİ YAZILARI.....	142
ÖZGEÇMİŞ	143

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Periferik işitme sistemine ait yapılar (Tellis, 2023a).	3
Şekil 2.2: Aurikulaya ait yapılar (Lass ve Donai, 2023).	4
Şekil 2.3: Orta kulak yapıları ve duvarları. a: Koklea ile arayüz oluşturan orta kulaktaki temel yapıların gösterimi (önden görünüm) b: Orta kulağın yan duvarının görünümü (ön taraf sol, arka taraf sağ) c: Orta kulağın medial duvarının görünümü (posterior solda ve anterior sağda) (Musiek ve Baran, 2020)	7
Şekil 2.4: Kemik ve membranöz labirent (Hain ve Helminski, 2014).	8
Şekil 2.5: Kokleanın bölümleri (Hudspeth, 2013).	9
Şekil 2.6: Modiolus (Tellis, 2023b).	10
Şekil 2.7: Osseöz spiral lamina (Ryzenman ve Kumar, 2015).	11
Şekil 2.8: Kokleaya ait yapılar (Lee, 2012).	12
Şekil 2.9: Tüy hücreleri. a: İTH, b: DTH (Gelfand, 2016).	14
Şekil 2.10: Kokleanın arteriyel kanlanması (Albernaz ve diğ., 2019).	16
Şekil 2.11: Vestibülokoklear sinir anatomisi (A) ve ateşleme örüntüleri (B).	17
Şekil 2.12: İlerleyen dalga (Bell, 2004).	19
Şekil 2.13: Açılmış kokleada tonotopik organizasyon (Lass ve Donai, 2023).	20
Şekil 2.14: Dış tüylü hücrelerde prestin ilişkili elektromotilite (Parker ve diğ., 2022).	21
Şekil 2.15: Canlı kokleada koklear amplifikasyon sayesinde frekans hassasiyetinin artışı (Gelfand ve Calandruccio, 2023).	23
Şekil 2.16: Koklear nonlineerite (Musiek ve Baran, 2020).	24
Şekil 2.17: Yayılım (Volley) prensibi ile yüksek frekanslı uyaranların işlenmesi (Lass ve Donai, 2023).	26
Şekil 2.18: Santral işitme sistemine ait yapılar (Tellis, 2023b).	27
Şekil 2.19: Spektral ve temporal ipuçlarının ayıklanması (glimpsing)	31

Şekil 2.20: Roex modeline göre sıralanmış işitsel filtre bankası.....	36
Şekil 2.21: Farklı maskeleme yöntemleri.....	38
Şekil 2.22: Maskenin yukarı yayılımı.	39
Şekil 2.23: Sinyal Tespit Teorisi (Green ve Swets, 1966).....	40
Şekil 2.24: Gerbiller işitme sinir fibrillerinden elde edilen ayar eğrileri (A) ve insanlardan elde edilen psikoakustik ayar eğrileri (B) (Bidelman ve diğ., 2015;Plack, 2024).	41
Şekil 3.1: Çalışma düzeni ve çalışmaya dahil edilen katılımcılar.	51
Şekil 3.2: Audio hub kullanıcı ara yüzü.	54
Şekil 3.3: Yeni hasta kaydı ve kayıtlı hasta düzenleme modülü.	55
Şekil 3.4: Audio suite modülü kullanıcı ara yüzü.	56
Şekil 3.5: Gürültüde Aralık Tespit Etme Modülü (GIN Suite) kullanıcı ara yüzü.....	57
Şekil 3.6: Modifiye Aralık Tespit Etme Modülü (GDT Suite) arayüzü.	58
Şekil 3.7: Randomize 3 adet 40 ms uzunluğunda aralık içeren beyaz gürültüye ait dalga formu ve spektrogramı.	59
Şekil 3.8: Çentikli gürültü (2000 Hz merkezli) dalga formu ve spektrogramı.....	60
Şekil 3.9: Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testinde kullanılan 2000 Hz frekanslı tonal uyaran.	61
Şekil 3.10: Uyaran süresinin azalması ile 2000 Hz tonal uyaranın frekans cevabındaki değişim.	63
Şekil 3.11: Kalibrasyon düzeneği.....	63
Şekil 3.12: Çalışmada kullanılan Larson Davis Model 824 Ses Düzeyi Ölçer.	65
Şekil 3.13: Deneylerin uygulanması sırasında kullanılan ekipmanlar.	66
Şekil 3.14: MATE testinde kullanılan uyaran dizisi örneği. Sırasıyla 4000 Hz çentikli gürültü ve 16 ms süreli 500 Hz tonal uyaranlar görülmektedir.	68
Şekil 3.15: Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu üzerinde %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri görülmektedir.	70
Şekil 4.1: Weibull CDF modelinden elde edilen %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiklerinin ortalama yöntemi ile hesaplanan aralık tespit etme eşikleri ile karşılaştırılması....	80
Şekil 4.2: Weibull CDF modeli ile belirlenen aralık tespit etme eşiklerinin kulaklar arası uyumunu gösteren Bland-Altman grafiği.	84

Şekil 4.3: Sağ kulak için farklı gürültü durumlarında aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.4: Sol kulak için farklı gürültü durumlarında aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.5: Sağ kulak için farklı gürültü durumlarında, gürültüsüz duruma göre normalize edilen, aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (* işareti en düşük eşiği göstermektedir).....	91
Şekil 4.6: Sol kulak için farklı gürültü durumlarında, gürültüsüz duruma göre normalize edilen, aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (* işareti en düşük eşiği göstermektedir).	91
Şekil 4.7: Sağ kulakta her uyaran frekansı için farklı gürültü durumlarına ait aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (Karşılaştırma gürültüsüz duruma göre istatistiksel anlamlı farklı durumları göstermektedir, *: $p<0,05$, **: $p<0,001$).	93
Şekil 4.8: Sol kulakta her uyaran frekansı için farklı gürültü durumlarına ait aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (Karşılaştırma gürültüsüz duruma göre istatistiksel anlamlı farklı durumları göstermektedir, *: $p<0,05$, **: $p<0,001$).	94
Şekil 4.9: Hiyerarşik Doğrusal Regresyon Modeli ile tahmin edilen ve çalışmada gözlenen değerlerin karşılaştırılması.	100
Şekil 5.1: Psikometrik modellerin gözlenen veriler ile ilişkisi.....	104
Şekil 5.2: Kokleada yer alan teorik işitsel filtreler (Oxenham ve Shera, 2003) ve işitsel filtrelerin çentikli gürültüye maruz kaldıktan sonra işitsel filtrelerin durumu.	112
Şekil 5.3: 2000 Hz çentikli gürültü sonrası sunulan 250 Hz uyarının temporal özelliklerinin frekans dışı işlenmesi.	115
Şekil 5.4: 8000 Hz ilerleyen dalga kokleanın alçak frekans bölgelerinde işlenebilecek düzeyde ipucu oluşturmamaktadır.	116

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: MATE testi seansları ve uyaran parametreleri.....	69
Tablo 4.1 Katılımcıların Demografik Verileri, Khalfa Hiperakuzi Ölçeği (KHÖ) Toplam Skoru ve Saf Ses Ortalaması (dB HL) Karşılaştırmaları.....	74
Tablo 4.2: Sağ kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi.	76
Tablo 4.3: Sağ kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi (Tablo 4.2'nin Devamı).	77
Tablo 4.4: Sol kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi.	78
Tablo 4.5: Sol kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi (Tablo 4.4'ün Devamı).	79
Tablo 4.6: Cinsiyete göre gürültüde ve modifiye aralık tespit etme eşiği kıyaslamaları (Weibull fonksiyonundan elde edilen %50 ve %75 olasılıkla eşikler).....	82
Tablo 4.7: Sağ ve sol kulakların gürültüde ve modifiye aralık tespit etme eşiği kıyaslamaları (Weibull fonksiyonundan elde edilen %50 ve %75 olasılıkla eşikler).....	83
Tablo 4.8: Sağ kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması.....	87
Tablo 4.9: Sağ kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması (Tablo 4.8'in devamı).....	88
Tablo 4.10: Sol kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması.....	89
Tablo 4.11: Sol kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması (Tablo 4.10'un devamı).....	90
Tablo 4.12: Sağ kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması.	95
Tablo 4.13: Sağ kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması (Tablo 4.12'nin devamı).....	96

Tablo 4.14: Sol kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması.	97
Tablo 4.15: Sol kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması (Tablo 4.14'ün devamı).	98
Tablo 4.16: MATE testi için geliştirilen Hiyerarşik Doğrusal Regresyon modeli bulguları. ..	99
Tablo 4.17: MATE testi için geliştirilen Hiyerarşik Doğrusal Regresyon modeli bulguları (Devamı).	101



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
%	: Yüzde
<	: Küçüktür
>	: Büyüktür
d	: Saniye Cinsinden Süre (Gabor Belirsizlik İlkesi)
e	: Euler Sayısı
F	: F İstatistiği (Gruplar Arasındaki Farkların Anlamlılığı)
f_c	: Merkez Frekansı veya Karakteristik Frekans
f_c	: Saf Sesin Merkez Frekansı (Gabor Belirsizlik İlkesi)
f_{n_1}	: Merkez Frekansına Göre Birinci Yayılma Sınırı (Gabor Belirsizlik İlkesi)
g	: Merkez Frekansına Göre Sapma (Roex Modeli)
$\log$	: 10 Tabanında Logaritma
p	: Filtre Eğimi (Roex Modeli)
p	: İstatistiksel Anlam Düzeyi
R^2	: Açıklanan Varyans Oranı
t	: İkinci Eğimin Birinci Eğime Göre Sıgılgı (Roex Modeli)
w	: İkinci Eğimin Göreli Ağırlığı (Roex Modeli)
$W(g)$	: Filtre Ağırlık Fonksiyonu (Roex Modeli)
α	: Alfa Katsayısı (Cronbach'ın Alfa Değeri – İç Tutarlılık Göstergesi)
α	: Ölçek Parametresi (Weibull Fonksiyonu)
β	: Şekil Parametresi (Weibull Fonksiyonu)

Kısaltmalar	Açıklama
AFT-R	: İşitsel Füzyon Testi-Revize – Auditory Fusion Test-Revised - Adaptive Tests of Temporal Resolution
ANF	: İşitme Siniri Lifleri – Auditory Nerve Fiber
ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASSR	: İşitsel Kararlı Durum Yanıtları – Auditory Steady-State Response
ATTR	: Adaptif Temporal Çözünürlük Testi
AVKN	: Anterior-Ventral Koklear Nükleus
BF	: En İyi Frekans Bölgesi – Best Frequency
BG	: Beyaz Gürültü
BW	: Bant Genişliği – Bandwidth
cc	: Santimetre Küp
CDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu – Cumulative Distribution Function
CI	: Güven Aralığı – Confidence Interval
daPa	: Dekapaskal
dB	: Desibel
dba	: A-Ağırlıklandırılmış Filtrelemeli Desibel Seviyesi
DKK	: Dış Kulak Kanalı
DKN	: Dorsal Koklear Nükleus
DNLL	: Lateral Lemniskus'un Dorsal Nükleusu
DTH	: Dış Tüylü Hücre
FS	: Full Skala – Full Scale
GATE	: Gürültüde Aralık Tespit Etme
GDT	: Aralık Tespit Etme Eşiği – Gap Detection Threshold
GIN	: Gürültü İçinde Aralık Tespit Etme – Gaps-in-Noise
HL	: İşitme Seviyesi – Hearing Level
HL-TEST	: Hosmer-Lemeshow Testi
HST	: Hiperpolarizasyon Sonrası Toparlanma
Hz	: Hertz
IC	: Inferior Kollikulus
İTH	: İç Tüylü Hücre
KHÖ	: Khalfa Hiperakuzi Ölçeği
kHz	: Kilo Hertz
KS	: Kranial Sinir

LL	: Lateral Lemniskus
LSO	: Lateral Superior Olivary Çekirdek
M	: Ortalama - Mean
MATE	: Modifiye Aralık Tespit Etme
MEG	: Manyetoensefalografi
MET	: Mekano-Elektrik Transdüksiyon
MLE	: Maksimum Olasılık Tahmini – Maximum Likelihood Estimation
MÖ	: Milattan Önce
ms	: Milisaniye
MSO	: Medial Superior Olivary Çekirdek
N	: Örneklem Sayısı
NN	: Çentikli Gürültü – Notched Noise
peSPL	: Tepe-Eşdeğer Ses Basınç Seviyesi/Peak-Equivalent Sound Pressure Level
PV+	: Parvalbumin-Pozitif Nöronlar
PVKN	: Posterior-Ventral Koklear Nükleus
SD	: Standart Sapma – Standard Deviation
SE	: Standart Hata – Standard Error
SFR	: Spontan Ateşleme Hızı – Spontaneous Firing Rate
SGN	: Spiral Gangliyon Nöronları
SL	: Duyum Seviyesi – Sensation Level
SLM	: Ses Seviyesi Ölçer – Sound Level Meter
SOC	: Superior Olivary Kompleks
SPL	: Ses Basınç Seviyesi – Sound Pressure Level
SR	: Stokastik Rezonans
SSK	: Semisirküler Kanal
SST+	: Somatostatin-Pozitif Nöronlar
STT	: Sinyal Tespit Teorisi
sub-BF	: En İyi Frekans Bölgesi Dışında Kalan Bölge – Sub Best Frequency
TM	: Timpanik Membran
TRP	: Geçici Reseptör Potansiyeli – Transient Receptor Potential
U (%)	: Dağılıma Uymayan Örneklem Yüzdesi
VNLL	: Lateral Lemniskus'un Ventral Nükleusu
VOT	: Ötüm Başlangıç Süresi – Voicing Onset Time

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ]

[Talha ÇÖGEN]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Odyoloji Anabilim Dalı

Odyoloji, Dil ve Konuşma Bozuklukları, Doktora Programı

[Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Eyyup KARA]

[Giriş ve Amaç:

İşitme sistemi, spektral ve temporal bilgileri yüksek çözünürlükte işleyebilmektedir. Tonotopik organizasyon sayesinde işitme sistemi, belirli frekanslardaki uyarılara özelleşmiştir. Spektral tonotopi iyi anlaşılmışken, temporal tonotopik organizasyon ve frekans dışı temporal bilgilerin işlenmesi hakkında bilgiler sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, normal işitmeye sahip bireylerde temporal psikoakustik ayar eğrilerinin varlığını belirlemek ve koklea düzeyinde temporal bilgilerin nasıl işlendiğini araştırmak üzere bir psikoakustik protokol geliştirmektir.

Yöntem:

Çalışmaya, 18-24 yaş arası 30 kadın ($20,71 \pm 1,48$ yaş) ve 30 erkek ($19,99 \pm 1,19$ yaş) olmak üzere toplam 60 normal işitme eşiklerine sahip genç erişkin dahil edilmiştir. Psikoakustik protokolde, Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE) ve Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Katılımcı yanıtları lojistik fonksiyonlarla

değerlendirilmiş, %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit eşikleri hesaplanmıştır. En uygun fonksiyon Hosmer-Lemeshow testi ile belirlenmiştir. Ardından, %75 olasılıkla aralık tespit eşikleri farklı gruplar ve gürültü koşulları arasında karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen eşiklere etki eden değişkenleri incelemek için Hiyerarşik Lineer Model kullanılmıştır. İstatistiksel anlamlılık $p < 0,05$ olarak belirlenmiştir.

Bulgular:

En uygun model Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu olarak belirlenmiştir. GATE ve MATE testlerinde cinsiyet ve kulak açısından anlamlı fark bulunmamıştır ($p > 0,05$). Beyaz gürültü MATE testinde eşikleri artırırken, çentikli gürültü bazı frekanslarda sessiz durumdan daha düşük eşikler sağlamıştır ($p < 0,001$). MATE testinde farklı uyaran frekansları ve gürültü koşullarında elde edilen eşikler grafiğe dökülerek, temporal ayar eğrileri oluşturulmuştur. GATE ve MATE testinde sessiz durumda elde edilen eşikler literatür ile uyumlu bulunmuştur.

Sonuç:

Bu çalışma, normal işitmeye sahip bireylerde temporal psikoakustik ayar eğrilerinin varlığını desteklemektedir. Çentikli gürültü, beyaz gürültüye kıyasla daha iyi eşikler sağlamakta, hatta bazı frekanslarda sessiz koşullardan daha düşük eşikler elde edilmesine yol açmaktadır. Bulgular, işitme sisteminin zorlu koşullarda etkinliği düşük işitsel filtrelerin hassasiyetini artırarak frekans dışı temporal bilgileri çözümleyebildiğine işaret etmektedir. |

Ekim 2024 , |165| sayfa.

Anahtar kelimeler: | Temporal Çözünürlük, Aralık Tespit Etme, Psikoakustik Ayar Eğrileri, Tonotopik Organizasyon, Çentikli Gürültü |

ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

**[REVEALING THE TEMPORAL PSYCHOACOUSTIC TUNING CURVES IN
NORMAL HEARING INDIVIDUALS]**

[Talha ÇÖGEN]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Audiology

Audiology, Speech and Language Disorders, Ph.D. Programme

[Supervisor : Assist. Prof. Dr. Eyyup KARA]

[Background and Aim:

The auditory system is capable of processing spectral and temporal information at high resolution. Through tonotopic organization, the auditory system is specialized to stimuli at specific frequencies. While spectral tonotopy is well understood, there is limited knowledge about temporal tonotopic organization and the processing of off-frequency temporal information. This study aimed to determine the presence of temporal psychoacoustic tuning curves in individuals with normal hearing and to develop a psychoacoustic protocol to investigate how temporal information is processed at the cochlea level.

Method:

A total of 60 young adults aged 18-24 years, 30 females (20.71±1.48 years) and 30 males (19.99±1.19 years) with normal hearing thresholds were included in the study. In the psychoacoustic protocol, Noise Interval Detection (NID) and Modified Interval Detection

(MID) tests were developed and administered. Participant responses were evaluated with logistic functions and gap detection thresholds were calculated with 50% and 75% probability. The most appropriate function was determined by using the Hosmer-Lemeshow test. Then, the 75% probability gap detection thresholds were compared between different groups and noise conditions. A Hierarchical Linear Model was used to examine the variables affecting the thresholds obtained in the study. Statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results:

The Weibull cumulative distribution function was found to be the most appropriate model. There were no significant differences in NID and MID tests in terms of gender and ear ($p < 0.05$). White noise increased thresholds in the MATE test, while notched noise provided lower thresholds than silent conditions at some frequencies ($p < 0.001$). In the MID test, thresholds obtained at different stimulus frequencies and noise conditions were graphed, and temporal tuning curves were created. The thresholds obtained in the noiseless condition of the NID and MID tests were found to be consistent with the literature.

Conclusion:

This study supports the existence of temporal psychoacoustic tuning curves in individuals with normal hearing. Notched noise provides better thresholds compared to white noise, even leading to lower thresholds than in noiseless conditions at some frequencies. The findings suggest that the auditory system can resolve temporal off-frequency information in challenging conditions by increasing the sensitivity of underactivated auditory filters. |

October 2024, |165| pages.

Keywords: | Temporal Resolution, Gap Detection, Psychoacoustic Tuning Curves, Tonotopic Organization, Notched Noise |

1. GİRİŞ

Kokleanın temel işlevlerinden biri, farklı frekanslarda seslerin kokleanın belirli bölgelerinde işlenmesi ilkesine dayanan tonotopik organizasyondur (Békésy ve Wever, 1960). Tonotopik organizasyon, alçak frekanslı seslerin baziler membranın apikal bölgesinde, yüksek frekanslı seslerin ise bazal bölgesinde işlenmesini sağlar. Ancak, işitsel sistemin bu tonotopik yapıdaki bölgesel seçiciliği, yalnızca karakteristik frekansları kapsamaz. Yapılan psikoakustik çalışmalar, kokleada belirli frekanslara yanıt veren karakteristik bölgelerin, komşu frekanslardaki uyarılara da tepki verdiğini göstermiştir (Evans, 1972; Johnstone ve Boyle, 1967) Bu durum, kokleanın frekans çözünürlüğü olarak da adlandırılan spektral çözünürlüğüyle ilişkilendirilir ve psikoakustik spektral ayar eğrileriyle haritalandırılabilmiştir (Moore ve diğ., 1984; Musiek ve Chermak, 2015).

İşitsel sistem, yalnızca frekans bilgilerini değil, aynı zamanda sesin zaman içindeki özelliklerini de işler. Temporal işitsel işleme, kısa süreler içinde sesin zamanla değişen özelliklerinin algılanmasını sağlar (Musiek ve diğ., 2005). Temporal çözünürlük, işitsel sistemin küçük ve ani değişiklikleri algılama kapasitesini ifade eder ve bu özellik seslerin ayırt edilebilirliğini büyük ölçüde etkiler (Kumar ve diğ., 2016). Temporal işleme ve çözünürlük, seslerin konuşma gibi karmaşık işitsel sinyallerdeki ayrıntıların algılanması için kritik öneme sahiptir. Temporal çözünürlüğü ölçmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir ve Musiek ve Chermak (2015), bu yöntemleri dört temel başlık altında sıralamıştır: temporal sıralama, temporal sumasyon, temporal çözünürlük ve temporal maskeleme.

Bu testler arasında temporal sıralama, bireylerin farklı frekans ve süre paternlerini algılama becerisini ölçer. Ancak bu testler, işitsel işleme süreçlerinin santral düzeydeki bileşenlerini içerdiğinden, periferik temporal çözünürlük becerilerini tam olarak değerlendiremez (Musiek ve Chermak, 2015). Temporal maskeleme, iki uyarandan birinin diğerini örtmesi anlamına gelir ve Nelson ve diğ. (2001) tarafından geliştirilen yöntemle kokleanın non-lineer yapısı değerlendirilmiştir. Temporal maskeleme testlerinin koklear kompresyon etkisini de ölçtüğü bilinmektedir (Fereczkowski ve diğ., 2021).

Psikoakustik alanında, spektral çözünürlüğü anlamaya yönelik geniş çaplı araştırmalar olmasına karşın, temporal çözünürlüğün psikoakustik temellerini anlamaya yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu durum, işitme sisteminin yalnızca frekans spektrumundaki ayırt ediciliğini değil, aynı zamanda zaman içinde değişen işitsel bilgilerin nasıl işlendiğini de kapsamaktadır. Temporal çözünürlükle ilgili testlerin çoğu kortikal düzeyde işleme süreçleriyle ilişkilendirilmiştir. Örneğin, rastgele aralık tespit etme ve gürültüde boşluk testleri, sıklıkla santral işitsel işlemlerin etkilerini ortaya koyan testlerdir (Musiek ve Chermak, 2015). Bununla birlikte, temporal süreçlerin koklear düzeyde nasıl işlendiği ve periferik işitsel sistemde hangi mekanizmaların bu işlemeyi yönlendirdiği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, temporal işitsel işlemeyi spektral çözünürlükle paralel olarak incelemek için bir psikoakustik yaklaşım önerilmektedir. Koklea düzeyindeki spektral tonotopik organizasyona benzer bir temporal tonotopik organizasyonun var olabileceği hipotezi öne sürülmüştür. Temporal psikoakustik ayar eğrilerinin belirlenmesi, işitme sisteminin zamansal bilgileri nasıl işlediğini anlamak için önemli bir adım olarak görülmektedir. Mevcut literatürde, bu alana dair kapsamlı bir çalışma bulunmamakta, bu da işitsel işleme süreçlerinin daha iyi anlaşılması için bir boşluk oluşturmaktadır.

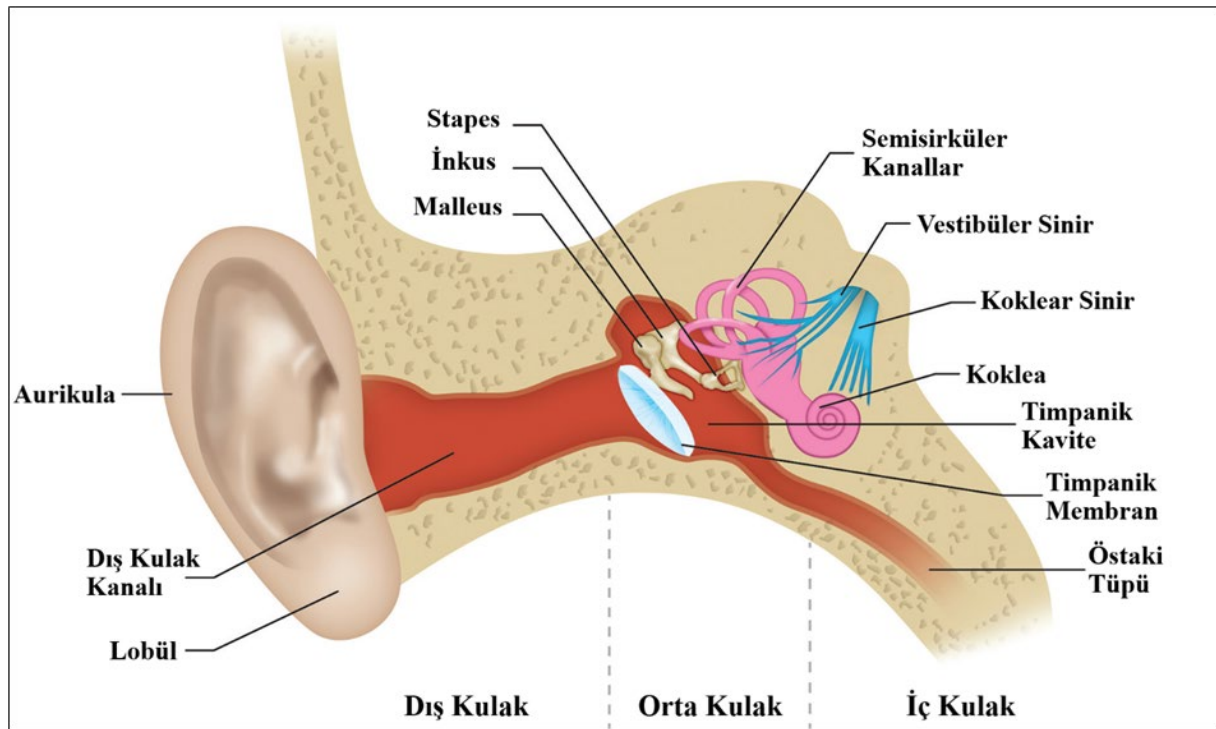
Çalışmamız, normal işiten bireylerde temporal psikoakustik ayar eğrilerini belirlemeyi ve bu ayar eğrilerinin koklea düzeyinde nasıl ortaya çıktığını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu süreçte, ileri maskeleye yöntemi kullanılarak temporal çözünürlük testleri uygulanacaktır. Çalışmanın temel amacı, kokleanın sadece spektral değil, aynı zamanda temporal bilgileri de organize eden bir yapı olup olmadığını ortaya koymak ve psikoakustik açıdan temporal ayar eğrilerini haritalandırmaktır. Bu bağlamda, çalışma, işitme sisteminin temel mekanizmaları hakkında yeni bilgiler sunarak işitme kaybı ve diğer işitsel bozukluklarla ilgili ileri araştırmalara zemin hazırlayacaktır.

Sonuç olarak, bu araştırmanın literatüre anlamlı bir katkı sunması beklenmektedir. Kokleanın zamansal bilgi işleme kapasiteleri ve psikoakustik düzeyde temporal tonotopik organizasyonun varlığına yönelik bulgular, işitme sistemine dair mevcut teorilere yeni bir perspektif kazandırabilir. Çalışmamız, hem normal işitme yetisine sahip bireyler için işitme modellerini genişletecek hem de işitme bozukluklarına dair tedavi ve rehabilitasyon süreçleri için yeni yaklaşımlar geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. PERİFERİK İŞİTME SİSTEMİ ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ

Periferik işitme sistemi, dış kulak, orta kulak, iç kulak ve işitme sinirinden meydana gelmektedir. Şekil 2.1’de bu sistemin yapısal bileşenleri gösterilmiştir.



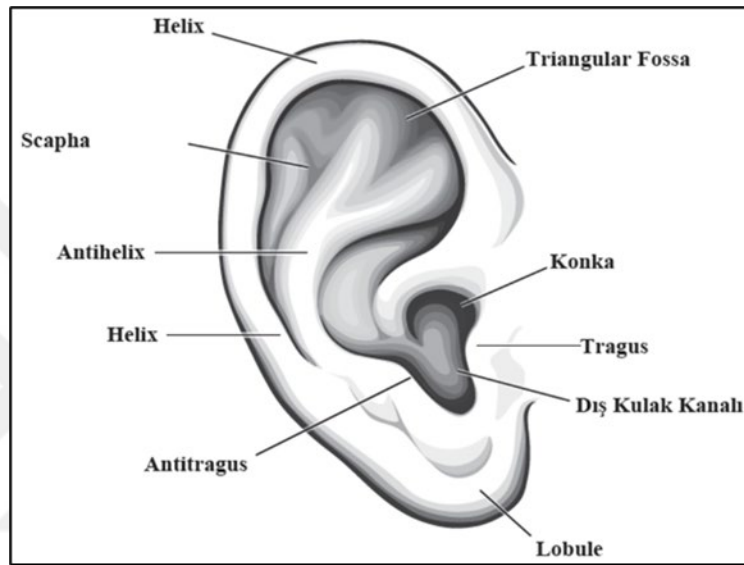
Şekil 2.1: Periferik işitme sistemine ait yapılar (Tellis, 2023a).

2.1.1. Dış Kulak

Dış kulak, aurikula (veya kulak kepçesi) ve dış kulak kanalı (DKK) olmak üzere iki ana bileşenden oluşur ve timpanik membranda (TM) sonlanır. Her bir bileşen, işitme için önemli olan anatomik ve fizyolojik özelliklere sahiptir. Genel olarak, dış kulağın anatomisi ve fizyolojisi, ses dalgalarını toplamak, güçlendirmek ve işitme sistemine etkin bir şekilde yönlendirmek üzere tasarlanmıştır.

Aurikula (pinna, kulak kepçesi), dış kulağın görünen kısmıdır. Esas olarak, deri, kıllar ve yağ bezleriyle kaplı aurikular kıkırdaktan oluşur. Bu özellikler, kulak kanalına yabancı maddelerin girmesini önlemeye yardımcı olur (Afolabi, 2020). Aurikulanın karmaşık şekli,

çeşitli girinti ve çıkıntılarıyla birlikte, sesi lokalize etmek ve güçlendirmek için işlev görür. Aurikuladaki en derin girinti olan konka, ses dalgalarını DKK'ye yönlendirir (Naumann, 2007). Aurikula içindeki ana yapılar arasında antiheliks, heliks ve tragus bulunur. Antiheliks, konkanın sınırlarını belirler ve iki kola ayrılarak triangüler fossayı oluşturur. Heliks en dıştaki kenardır. Tragus ve antitragus, kulak kanalının girişini çerçeveler ve en alt kısmı ise bağ dokusundan oluşan kulak memesi (lobül) oluşturur (Kaushal ve Kaushal, 2011). Aurikulaya ait yapılar Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Aurikulaya ait yapılar (Lass ve Donai, 2023).

Aurikular kıkırdak, aurikulanın şeklini koruyan sürekli bir fibrokartilaj parçasıdır. Sinir hücreleri ve kan damarları içermez (Constantian, 1982). Aurikular kaslar, insanlarda büyük ölçüde kalıntı olan dış ve iç kaslar olarak sınıflandırılır. Dış kaslar, aurikulayı başa bağlarken, iç kaslar aurikulanın çeşitli kısımlarını birbirine bağlar. Bu kaslar, VII. kranial sinir (KS) dalları tarafından innerve edilir ve yüzeyel temporal, posterior aurikular ve oksipital arterlerden kan akışı alır (Liugan ve diğ., 2017).

DKK, konka ile TM arasında uzanan 2,5 cm uzunluğunda S şeklinde bir tüptür (Şekil 2.1). Dış üçte birlik kısım kıkırdaklıdır ve kıllar ile serümen üreten seruminöz bezleri içerir. Serümen, yabancı partiküllere ve enfeksiyonlara karşı koruma sağlar. İçteki üçte ikilik kısım kemiklidir ve daha dar olup deri ile kaplıdır (Alvord ve Farmer, 1997). DKK'nin rezonans frekansı, 2500-5000 Hz civarındaki sesleri güçlendirir (Melloui ve diğ., 2020; Zhou ve diğ., 2022a).

TM, diğerk adıyla kulak zarı, dış ve orta kulağın sınırını oluşturur. DKK'de 55°'lik bir açıyla yerleşmiş ince, konkav bir yapıdır ve üç katmandan oluşur: dıştaki kutiküler katman, fibröz orta katman ve içteki mukozal katman. TM, DKK'de bir kemik oluğunda yer alır ve yaklaşık 10 mm çapındadır. İnce olmasına rağmen, TM dayanıklıdır ve yırtılmaya karşı dirençlidir. TM'nin içbükeyliği, otoskop ışığının yansıması olan "ışık konisi"ni oluşturur. Bu özellik, orta kulağın sağlıklı olup olmadığını teşhis etmek için kullanılır çünkü orta kulak düzgün havalanamadığında ve TM içe doğru yer değiştirdiğinde bu yansıma görülmez (Gelfand ve Calandruccio, 2023).

2.1.2. Orta Kulak

Orta kulak, temporal kemiğin petroz kısmında yer alan, düzensiz şekilli ve hava dolu bir boşluktur. Yaklaşık 2 ila 4 mm genişliğinde ve 15 mm yüksekliğinde olup, yaklaşık 2 cm³ hacminindedir. Bu boşluğun, tüm kenarları kemikle çevrilidir ve yalnızca lateral duvarında TM bulunur (Luers ve Hüttenbrink, 2016).

Orta kulakta üç ossikül (kemikçik) bulunur: malleus, inkus ve stapes. Bu küçük kemikler, birlikte ossiküler zincir olarak adlandırılır ve vücuttaki en küçük kemiklerdir. Ses titreşimlerini TM'den iç kulağa iletmekte kritik bir rol oynarlar (Kamrava ve Roehm, 2017; Mocanu ve diğ., 2023). Ossiküllerin en büyüğü olan malleus, bağ dokusu lifleri aracılığıyla TM'ye bağlıdır. Bir baş, boyun ve üç çıkıntıdan oluşur: manubrium, anterior çıkıntı ve lateral çıkıntı. Manubrium, TM'nin arkasında görülebilen malleolar stria olarak bilinen opak bir çizgi oluşturur. Malleus, epitympanik reses içinde inkus ile eklem yapar (Mocanu ve diğ., 2023). İnkus, bir örs şeklindedir ve bir gövde ve iki çıkıntıdan (kol/proses) oluşur. Kısa çıkıntı geriye doğru, uzun çıkıntı ise malleusun manubriumu ile paralel olarak dikey yönde uzanır. Uzun çıkıntının alt kısmı, lentiküler çıkıntı olarak bilinen bir bölgeye doğru bükülür; burada stapes ile eklem yapar (Noussios ve diğ., 2016). En küçük ve en hafif kemik olan stapes ise bir baş, bir boyun, iki crus (bacak) ve bir tabandan oluşur. Tabanı oval pencereye oturarak ses titreşimlerini iç kulağa iletir. Stapes'in başı inkus ile incudostapedial eklemde birleşir (Luers ve Hüttenbrink, 2016; Mocanu ve diğ., 2023).

Ossiküler zincir, altı ligament ve iki tendon tarafından desteklenir ve dengelenir, bu sayede sesin orta kulaktan iç kulağa verimli bir şekilde iletilmesi sağlanır. Malleusun superior, anterior ve lateral ligamentleri, inkusun posterior ve superior ligamentleri ile stapes tabanını oval pencereye tutan annüler ligament bu yapıların ana bileşenleridir. Ayrıca, tensor timpani ve

stapedius kaslarının tendonları sırasıyla malleus ve stapese bağlanarak bu süreçte önemli bir rol oynar (Burford ve Mason, 2016).

İki çizgili kas, stapedius ve tensor tympani, ossiküllere bağlanır. Stapedius, vücuttaki en küçük kastır ve piramidal çıkıntının tepesinden başlayıp stapesin boynuna bağlanır. Fasiyal sinirin (VII. KS) stapelial dalı tarafından innerve edilir ve yüksek seslere maruz kaldığında kasılarak stapesi geriye çeker (Rönnblom ve diğ., 2023). Tensor tympani, stapediustan daha büyük olup yaklaşık 25 mm uzunluğundadır. Bu kas, östaki tüpünün kıkırdağından ve sfenoid kemikten başlar ve malleusun manubriumuna bağlanır. Trigeminal sinir (V. Kraniyal Sinir) tarafından innerve edilir ve çiğneme ve yutma sırasında titreşimleri azaltmak için malleusu medyal ve anterior yönde hareket ettirir (Marchioni ve diğ., 2021; Rönnblom ve diğ., 2023).

Orta kulak boşluğundaki ana yapılar:

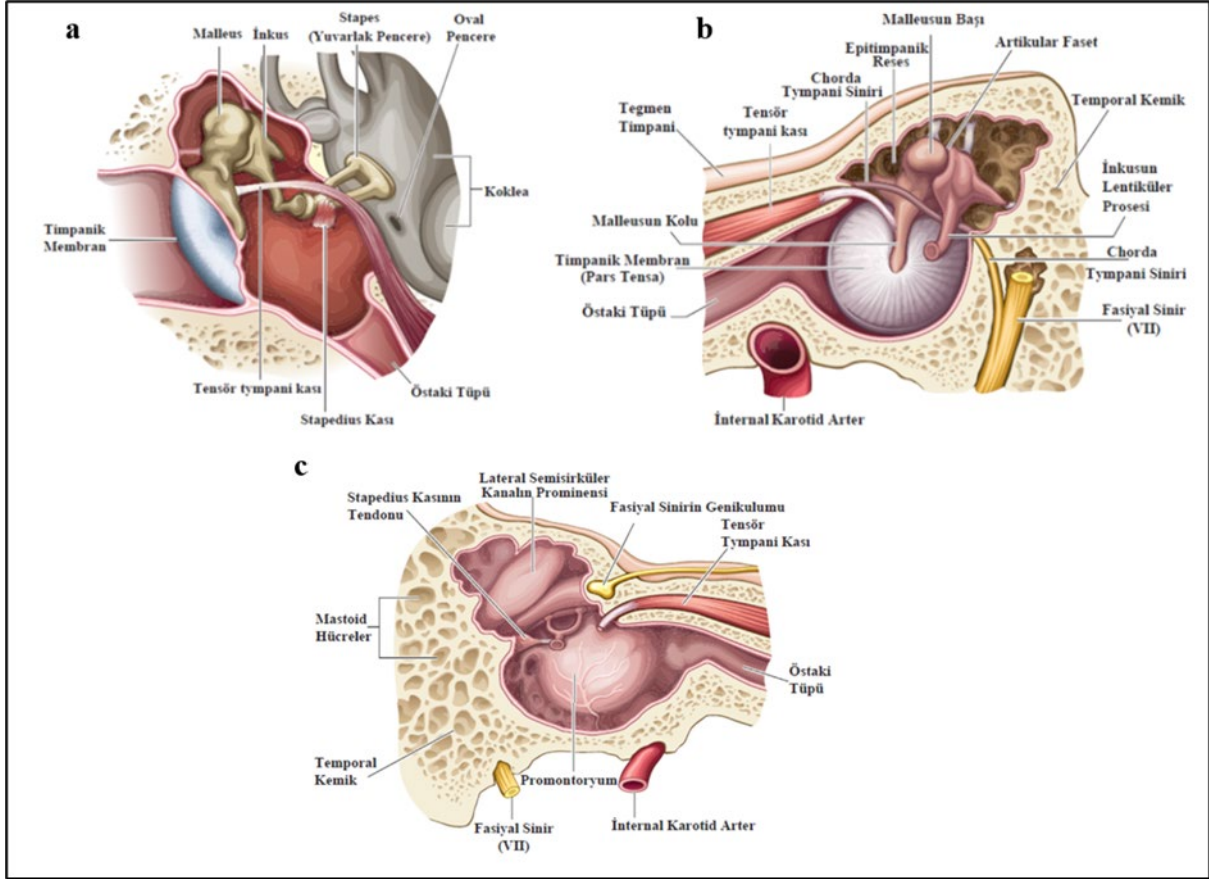
Medial Duvar: İç kulağa bağlı yapıları içerir. Üzerinde yer alan oval pencere (fenestra vestibuli) ve yuvarlak pencere (fenestra cochlea), orta kulak ile iç kulağı bağlar. Promontoryum, kokleanın bazal dönüşü tarafından şekillendirilen ve bu iki fenestra arasında kalan yuvarlak bir çıkıntıdır (Luers ve Hüttenbrink, 2016; Wojciechowski, 2023).

Anterior Duvar: Östaki tüpünün açıklığını ve karotid kanalını içerir. Yaklaşık 36 mm uzunluğundaki Östaki tüpü, orta kulağı havalandırır ve nazofarenkse sıvı drenajı sağlar (Wojciechowski, 2023).

Posterior Duvar: Epitimpanik resese yakın bir bölgeden başlayan antrumun açıklığını içerir ve mastoid hava hücrelerine geçiş sağlar. Stapedius kasının tendonu ve chorda tympani bu duvar boyunca uzanır (Wojciechowski, 2023).

Taban: Inferior veya jugular duvar olarak da bilinir ve orta kulak ile jugular fossayı ayırır (Anschuetz ve diğ., 2018; Wojciechowski, 2023).

Üst Duvar: Tavan veya tegmental duvar olarak adlandırılır ve ince bir kemik tabakası olup, orta kulağı kraniyal boşluktan ayırır (Anschuetz ve diğ., 2018; Wojciechowski, 2023). Orta kulak yapıları ve duvarları Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



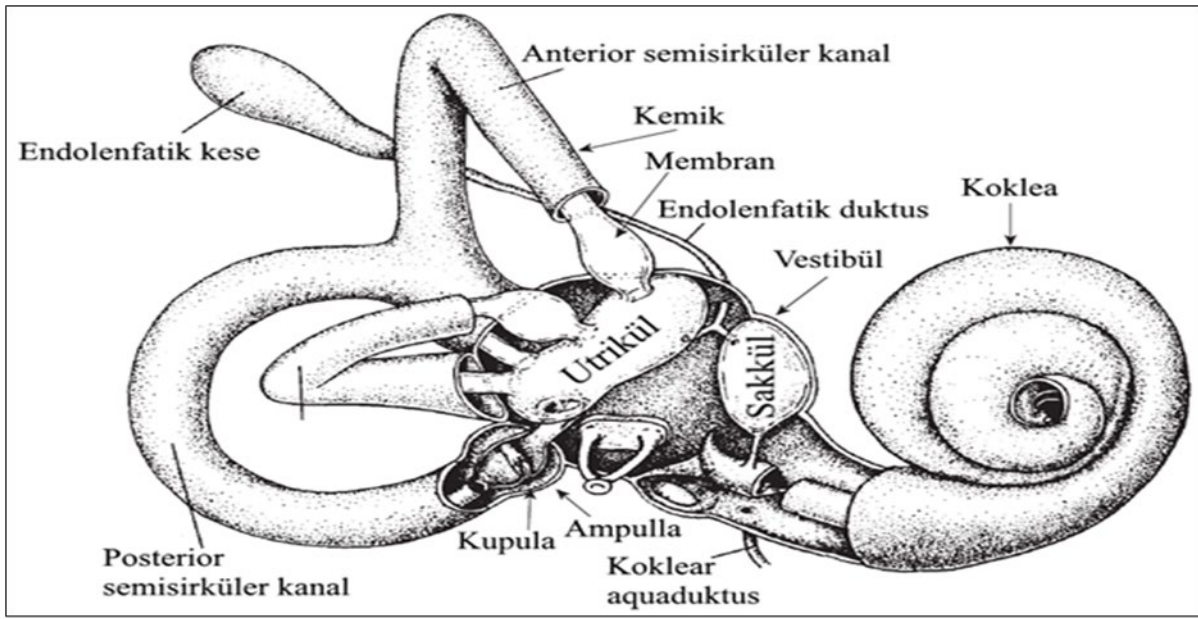
Şekil 2.3: Orta kulak yapıları ve duvarları. a: Koklea ile arayüz oluşturan orta kulaktaki temel yapıların gösterimi (önden görünüm) b: Orta kulağın yan duvarının görünümü (ön taraf sol, arka taraf sağ) c: Orta kulağın medial duvarının görünümü (posterior solda ve anterior sağda) (Musiek ve Baran, 2020)

2.1.3. İç Kulak

İç kulak, karmaşık ve labirent benzeri düzeniyle hem işitsel hem de vestibüler sistemlerin önemli bir bileşenidir. Kafatasının derinliklerinde, temporal kemiğin petroz kısmında bulunur. Labirent, iki ana yapısal kısımdan oluşur: kemik (osseöz) labirent ve onun içinde bulunan membranöz labirent. Bu karmaşık, sıvı dolu kanal ve odacık ağı, işitme ve denge işlevlerinde hayati roller oynar (Atkinson ve diğ., 2015; Ekdale, 2016).

Kemik labirent, iç kulağın dış, sert kısmıdır ve perilenf adı verilen bir sıvı ile doludur. Perilenf, sodyum iyon konsantrasyonu yüksek ve potasyum iyon seviyeleri düşük olan beyin omurilik sıvısına benzer bileşimde olup (Gagov ve diğ., 2018), üç ana bileşenden oluşur: koklea, vestibül ve üç semisirküler kanal (SSK). Membranöz labirent, kemik labirent içinde bulunan sürekli bir kanal ve kesecik serisidir. Koklear ductus (skala media), utrikül, sakkül ve semisirküler kanalların membranöz bölümlerini içerir ve hepsi endolenf ile doludur (Ekdale, 2016) (Şekil 2.4).

Vestibül, hem kokleanın hem de semisirküler kanalların giriş kısmı olan oval şekilli bir merkezi boşluktur. Vestibül, doğrusal ivmeleri ve yerçekimine göre baş pozisyonlarını algılamada önemli olan utrikül ve sakkülü içerir. Vestibülün lateral duvarında, stapesin tabanının yerleştiği oval pencere bulunur ve bu pencere orta kulaktan iç kulağa titreşimlerin iletilmesini sağlar (Mancheño ve diğ., 2017). Vestibülün vestibüler sistemdeki rolü, baş pozisyonu ve hareketi hakkındaki bilgileri beyne ileterek denge ve mekansal yönelimi sağlamaktır (Fetter, 2010; Mancheño ve diğ., 2017).



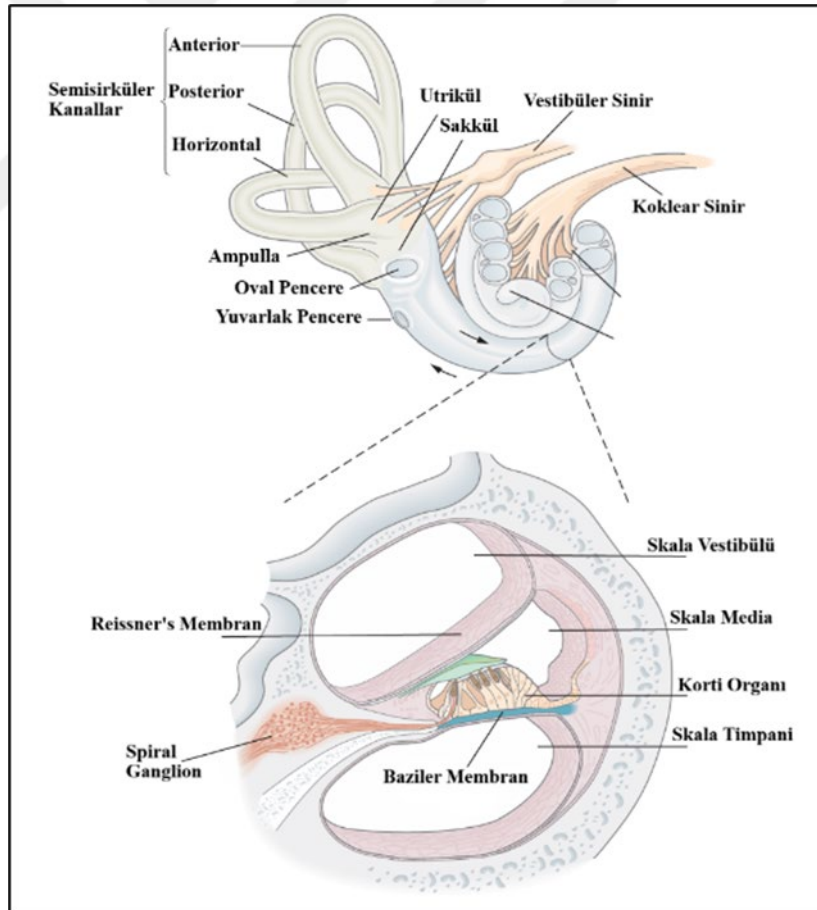
Şekil 2.4: Kemik ve membranöz labirent (Hain ve Helminski, 2014).

Üç semisirküler kanal – superior, lateral ve posterior – birbirine dik olarak konumlanmıştır ve hareketin üç düzlemine karşılık gelir. Bu kanallar endolenf ile doludur ve başın döner hareketlerini algılar. Her kanal, crista ampullaris adı verilen tüylü hücrelerle donatılmış bir duyu yapı içeren ampulla adı verilen genişlemiş bir bölgeye sahiptir. Kanallardaki endolenf hareketi, tüylü hücrelerin stereosilyalarını mekanik olarak hareket ettirerek hücrelerin uyarılmasına ve akustik sinyallerin VIII. KS üzerinden elektrik sinyallerine dönüştürülerek işitme sisteminin nöral yapıları boyunca kortekse iletilmesini sağlar (Rabbitt, 2019).

Utrikül ve sakkül, vestibüler sistemin bir parçasıdır ve doğrusal ivmeleri ve statik baş pozisyonlarını algılamaktan sorumludur. Bu yapılar, bir jelatin tabakaya gömülü tüylü hücrelerle dolu makulalar içerir ve bunların üstünde otolitler (kalsiyum karbonat kristalleri) bulunur. Baş hareketi, otolitlerin yer değiştirmesine neden olarak stereosilyaların bükülmesine

ve VIII. KS'nin vestibüler dalında ateşlemelere neden olur. Oluşan eksitasyon/inhibisyon paternleri daha üst merkezlerde değerlendirilerek doğrusal ivmeli hareketlerin algılanması sağlanır (Ekdale, 2016; Rabbitt, 2019).

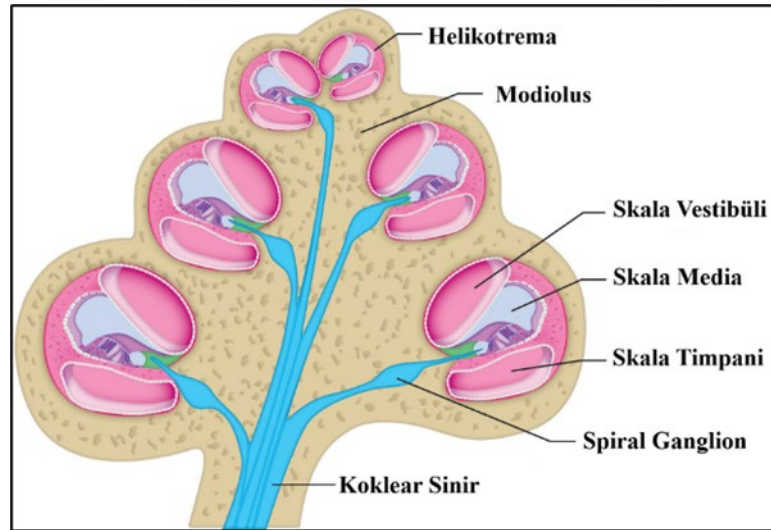
Koklea, spiral şekli nedeniyle Yunanca "salyangoz" anlamına gelen "cochlos" kelimesinden türemiştir ve işitsel sistemin temelidir. Yaklaşık 35 mm uzunluğunda ve tabanında yaklaşık 9 mm genişliğinde olup, tabandan tepeye doğru 2,5 kez kıvrılır (Ekdale, 2016). Koklea, üç paralel, sıvı dolu kanal olan skala vestibuli, skala timpani ve skala mediaya ayrılır. Skala vestibuli ve skala timpani, kemik labirentin bir parçasıdır ve perilenf ile doludur. Skala vestibuli, orta kulak ile iç kulak arasında iletişimi sağlayan oval pencerede başlar. Skala timpani ise iç kulak ile orta kulak arasında iletişimi sağlayan yuvarlak pencerede sona erer. Bu iki kanal, perilenfin akmasına izin veren helicotrema adı verilen küçük bir açıklıkla kokleanın tepesinde sürekli haldedir (Ekdale, 2016). Şekil 2.5'te kokleanın bölümleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Kokleanın bölümleri (Hudspeth, 2013)

Skala media veya koklear ductus, membranöz labirentin bir parçasıdır ve potasyum iyon konsantrasyonu yüksek, sodyum iyon konsantrasyonu düşük endolenf ile doludur (Eckhard ve diğ., 2012; Gagov ve diğ., 2018). Skala vestibuli ve skala timpaninin arasında skala media yer alır. Skala media bu iki kanaldan sırasıyla Reissner membranı ve baziler membran ile ayrılır. Baziler membranın genişliği ve sertliği boyunca değişir; tabanda daha dar ve gergin, tepeye doğru daha geniş ve gevşektir. Bu, işitmede frekans ayrımı için kritik olan bir gradyan oluşturur. Koklear ductus, koklea içindeki membranöz labirentin bir parçasıdır ve Korti organını barındırır. Skala media, yüksek potasyum konsantrasyonuna sahip endolenf ile doludur ve tüylü hücre işlevi için gerekli olan elektrokimyasal gradyanlar için kritik öneme sahiptir (Ekdale, 2016; Gagov ve diğ., 2018).

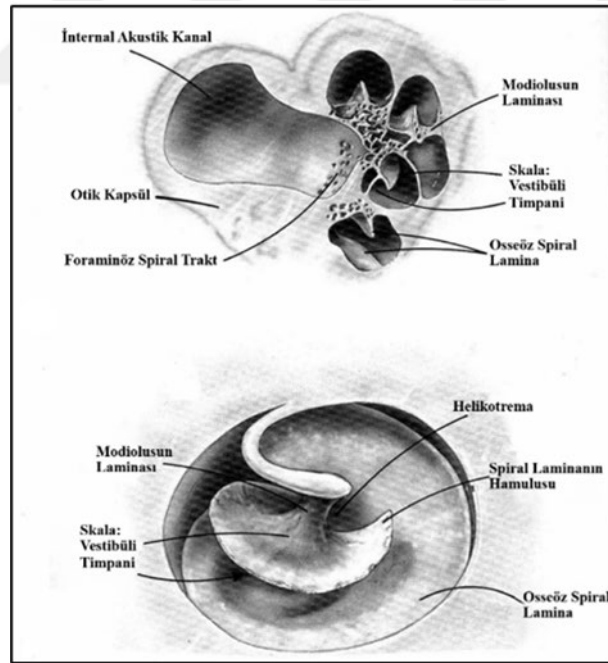
Modiolus, kokleanın etrafında kıvrıldığı kemik yapıdır. Geniş bir tabana sahiptir ve temporal kemikte internal akustik kanalın dibinde yer alır. VIII. KS internal akustik kanal içinde seyredir. Modiolus, kan damarları ve VIII. KS sinir liflerinin geçtiği küçük deliklere sahiptir (Şekil 2.6). Bu yapı damarları ve sinir liflerini korur. Modiolus ayrıca kokleadan kortekse işitsel uyarıyı ileten VIII. KS'e ait nöronlardan oluşan spiral gangliyon ev sahipliği yapar (Atkinson ve diğ., 2015).



Şekil 2.6: Modiolus (Tellis, 2023b).

Osseöz spiral lamina, modiolustan dışa doğru uzanan iki kemik plakadan oluşur (Eggink ve diğ., 2022). Bu iki plaka arasındaki boşluk, habenula perforata olarak bilinir; sinir lifleri buradan geçer. Skala media, spiral lamina'ya tutunur. Osseöz spiral lamina, apekse doğru kademeli olarak küçülür. Kokleanın şekline uygun olarak, spiral lamina modiolus etrafında

yaklaşık 2,5 kez kıvrılır ve kokleayı skala vestibuli ve skala timpani adında iki farklı skalaya böler (Eggink ve diğ., 2022; Ekdale, 2016). Şekil 2.7’de osseöz spiral lamina yapısı gösterilmektedir. Superior kanal, oval pencerede başlar ve skala vestibuli olarak bilinir; oval pencere, skala vestibuli ile orta kulak arasında iletişimi sağlar. Inferior kanal, skala timpani olarak bilinir. Skala timpani, skala timpani ile orta kulak arasında iletişimi sağlayan yuvarlak pencerede sona erer. Kokleanın bazal kısmında skala vestibuli başlangıcında, yuvarlak pencere yakınında ve skala timpani ile beyin-omurilik sıvısı arasında küçük bir açıklık olarak yer alan koklear akuaduktus seyrederek (Eggink ve diğ., 2022). Spiral laminanın iki skalasının apikal kısmında, skala vestibuli ve skala timpaninin bu noktada iletişim kurduğu helicotrema adı verilen küçük bir açıklık bulunur. Skala timpani ve skala vestibuli, perilenf adı verilen bir sıvı ile doludur. Helicotrema, perilenfin bu kanallar arasında akmasına izin verir. Perilenfin bileşimi, sodyum iyonu ve kalsiyum iyonu açısından yüksektir ve potasyum iyonu açısından düşüktür (Eckhard ve diğ., 2012). Perilenf ayrıca vestibüler sistemin membranöz labirenti ile kemik labirent duvarı arasındaki perilenfatik boşlukta bulunur (Eggink ve diğ., 2022; Gagov ve diğ., 2018).



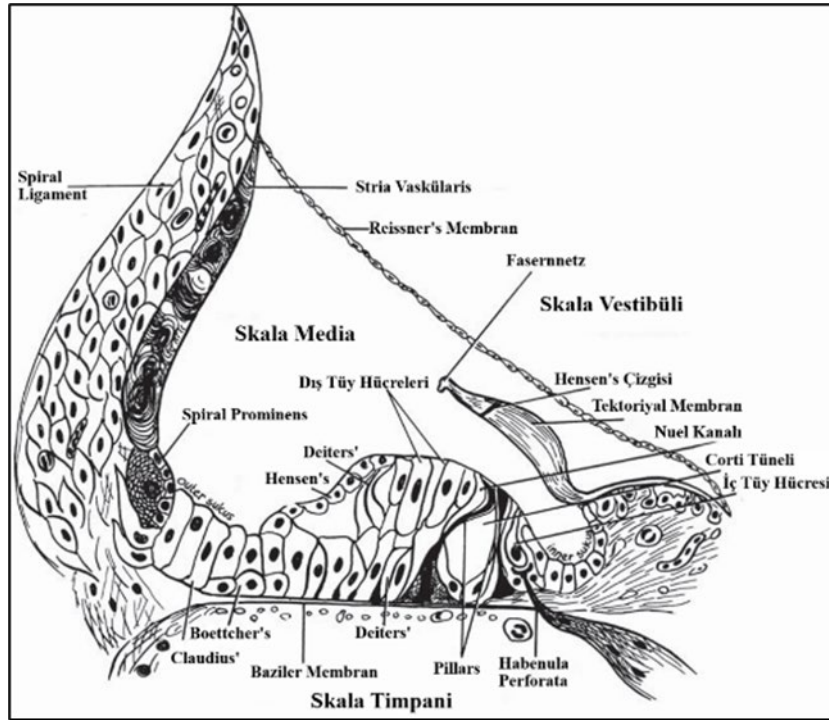
Şekil 2.7: Osseöz spiral lamina (Ryzenman ve Kumar, 2015).

Reissner membranı, aynı zamanda vestibüler membran olarak da bilinir, skala media'nın tavanını oluşturur ve bu nedenle skala vestibuli ile skala media'yı ayırır (Ekdale, 2016; Johnsson, 1971). İnce, epitel astarlı bir membrandır. Skala media'nın tabanı, skala media'yı skala timpani'den ayıran ince, fibroz bir membran olan baziler membran tarafından oluşturulur.

Baziler membranının genişliği tepeye doğru daha geniş ve tabanda daha dardır. Bu nedenle, tabanda daha gergin ve tepeye doğru daha gevşektir (Ekdale, 2016; Zweig, 1976). Spiral ligament, baziler membranı osseöz spiral laminanın lateral duvarına bağlar (Henson ve diğ., 1984).

Stria vascularis, Reissner membranından baziler membrana kadar uzanan ve skala media'nın lateral duvarı boyunca spiral ligamente bağlı vasküler epitel tabakasıdır. Stria vascularis, Claudius ve Boettcher hücreleri olarak bilinen sütunlu ve küboid hücrelerden oluşur; skala medianın endolenfine potasyum iyonları sağlar. Endolenf üretiminde, K iyon döngüsünde ve iç kulak homeostasisinin sağlanmasında aktif görev alır (Thulasiram ve diğ., 2022).

İlk kez İtalyan anatomist Alfonso Corti tarafından 1851'de tanımlanan Korti organı, aynı zamanda spiral organ olarak da bilinir. Skala media içinde baziler membran üzerinde yer alır. Orta kulaktan gelen mekanik enerjinin sinir impulslarına dönüşümünden sorumlu olduğu için iç kulakta işitmenin temel organıdır. Korti organı, iki tür duyuşal hücre (İTH ve DTH) ve çeşitli destek hücreleri içerir (Atkinson ve diğ., 2015; Driver ve Kelley, 2020; Gelfand ve Calandruccio, 2023; Meenderink ve Dong, 2022). Kokleaya ait yapılar Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Kokleaya ait yapılar (Lee, 2012).

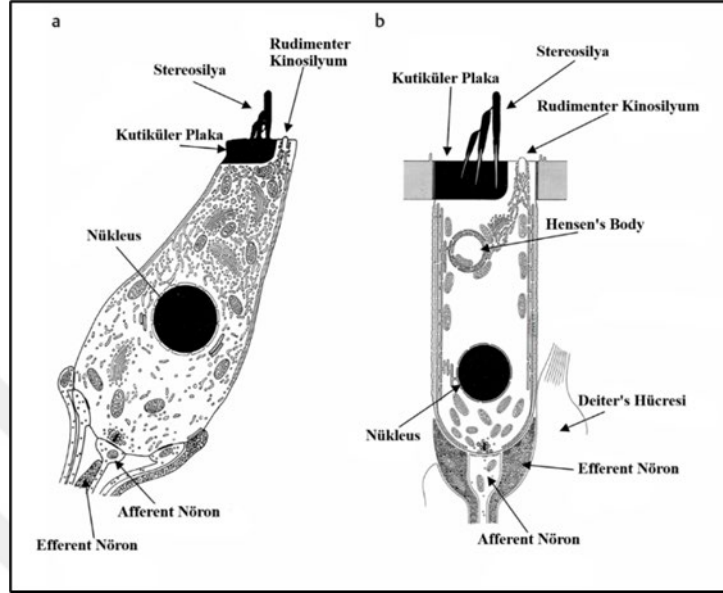
İç tüylü hücreler (İTH), korti organının modiolar (medial) tarafında tek sıra halinde yaklaşık 3.500 İTH bulunur. İTH'ler, tabanda daha geniş ve boyunları dar olup gözyaşı damlası şeklindedir. Falanj hücreleri tabanlarını destekler. İTH'ler, ses titreşimlerini elektrik sinyallerine dönüştürmekten sorumludur (Faran ve Furst, 2023; Gelfand ve Calandruccio, 2023). Dış tüylü hücreler (DTH), korti organının lateral tarafında yaklaşık 12.000 ila 13.500 silindirik şekilli DTH, üç sıra halinde düzenlenmiştir. DTH'lerin uzunluğu, baziler membran boyunca oturduğu yere bağlıdır – apekse doğru tüylü hücreler daha uzun, bazalda daha kısadır. Deiters hücreleri olarak bilinen destek hücrelerinin tabanında otururlar (Zhou ve diğ., 2022b) ve baziler membrana gömülüdürler. Deiters hücrelerinin son sırasına hemen bitişik olarak, DTH'leri ve tektoriyel membranı destekleyen, beş ila altı sıra Hensen hücresi (Cloes ve diğ., 2013) bulunur. DTH'ler, ses titreşimlerini amplifiye etmekten sorumludur (Ashmore, 2008; He ve diğ., 2022).

Claudius ve Boettcher hücreleri, stria vascularis tarafından oluşturulan bu hücreler, destek hücreleri olarak kabul edilir (Cloes ve diğ., 2013; Wagner ve Shin, 2019). Pillar hücreler, iç tüylü hücrelerin tek sırasını dış tüylü hücrelerin üç sırasından ayıran Korti tünelini oluşturur. Korti tüneli, kortilenf adı verilen sıvı içerir. Kortilenf iyon derişiminde farklar olmakla birlikte perilenfe benzer bir yapıya sahiptir (Cho ve diğ., 2022; Eckhard ve diğ., 2012; Engstrom, 1960). Pillar hücrelerin geniş tabanı da baziler membrana gömülüdür (Wagner ve Shin, 2019).

İTH'ler ve DTH'ler üzerindeki duyuşal tüyler, stereosilya olarak bilinir. Her İTH üzerinde yaklaşık 50 stereosilya, U şeklinde bir desenle düzenlenmişken, her DTH üzerinde W ve V şekillerinde kümelenmiş yaklaşık 65 ila 150 stereosilya bulunur (Gelfand ve Calandruccio, 2023). Stereosilyalar, hem İTH'ler hem de DTH'ler için, kokleanın apikalinde daha uzun ve bazalda daha az sayıda bulunur. Stereosilyalar, falanks hücrelerinden (Deiters hücreleri) yapılmış kırılğan bir retiküler membran (veya lamina) üzerinden çıkar. Tüylü hücrelerin bazal ucu, VIII. KS liflerine bağlanır (Galeano-Naranjo ve diğ., 2021).

Tektoriyel membran, spiral limbus adı verilen ve Reissner membranına bağlanan bir bağ dokusu koleksiyonundan köken alır. Tektoriyel membran, tüylü hücrelerin stereosilyalarının üzerinde durur; protein ve kolajenden oluşur (Osmotherly ve Rivett, 2020, Sellon ve diğ., 2019). Tektoriyel membran ile baziler membran arasındaki boşluk, endolenf ile doludur. Tektoriyel membran, DTH'lerin stereosilyaları üzerinde kesme kuvveti sağlamak için hizmet eder; bu stereosilyaların en uzun sırası bu tektoriyel membran içinde gömülüdür. İTH'ler, tektoriyel

membran içine gömülü değildir, ancak yakın mesafede bulunurlar (Sellon ve diğ., 2019). İTH'ler ve DTH'ler, hem afferent hem de efferent liflerle innervasyona sahiptir: İTH'lerin ve DTH'lerinin yapısı Şekil 2.9'da görülmektedir.



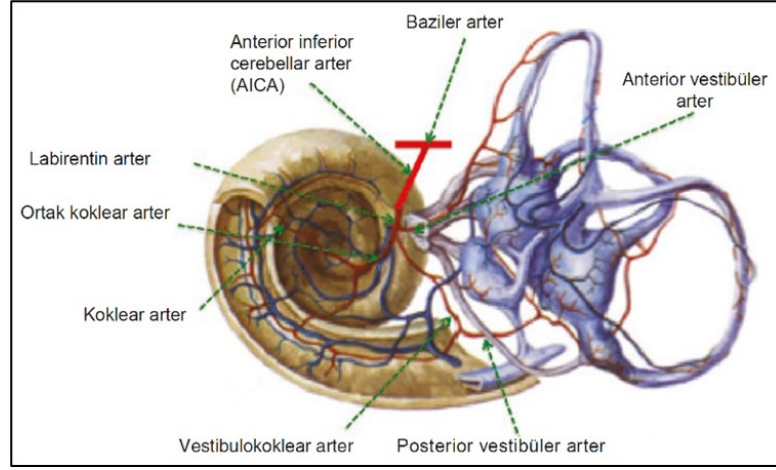
Şekil 2.9: Tüy hücreleri. a: İTH, b: DTH (Gelfand, 2016).

Afferent Lifler: İşitsel tüy hücrelerinin afferent innervasyonu, öncelikle tip I ve tip II spiral ganglion nöronları (SGN) tarafından gerçekleştirilir (Carricondo ve Romero-Gómez, 2019). Tip I SGN'ler miyelinli olup koklear sinir liflerinin yaklaşık %95'ini oluşturur ve İTH'leri innerve eder, bu da kesin işitsel bilgilerin beyne iletilmesinden sorumludur (Atkinson ve diğ., 2015; Delacroix ve Malgrange, 2015). Her bir İTH, birden fazla tip I afferent lif tarafından temas edilir, bu da yüksek sadakatli sinyal iletimini sağlar. Öte yandan, tip II SGN'ler miyelinsiz olup DTH'leri daha yaygın bir şekilde innerve eder (Delacroix ve Malgrange, 2015; Fuchs ve Lauer, 2019). Tip II afferentlerin tam rolü daha az anlaşılmış olmakla birlikte, koklear amplifikatör işlevlerinin modülasyonunda ve akustik aşırı maruz kalmaya karşı koruyucu tepkilerde yer aldığı düşünülmektedir (Fuchs ve Lauer, 2019). Tüy hücreleri ve afferent nöronlar arasındaki sinaptik bağlantılar, öncelikle tüy hücrelerinden glutamat salınımını ve SGN'lerdeki AMPA reseptörlerinin aktivasyonunu içeren karmaşık nörotransmitter etkileşimlerini içerir (Carricondo ve Romero-Gómez, 2019; Siebald ve diğ., 2023). Bu karmaşık afferent ağ, işitsel sinyallerin kokleadan merkezi işitsel yollara etkili bir şekilde iletilmesini sağlar ve bu da sesin işlenmesi ve algılanması ile sonuçlanır (Eggermont, 2019; Siebald ve diğ., 2023). Afferent lifler, VIII. kranial sinirden (vestibulokoklear sinir) kaynaklanır ve tip I lifler büyük, miyelin kaplıdır ve İTH'lerin innervasyonundan sorumludur; tip II lifler

ise daha küçük, miyelinli veya miyelinsiz olabilir ve DTH'lerin innervasyonundan sorumludur (Carricondo ve Romero-Gómez, 2019; Liu ve diğ., 2015). Tek bir İTH, 10 farklı VIII. kranial sinir lifine kadar bağlanabilirken, tek bir VIII. kranial sinir lifi, 10 farklı DTH'yi innerve edebilir (Atkinson ve diğ., 2015; Carricondo ve Romero-Gómez, 2019; Delacroix ve Malgrange, 2015).

Efferent Lifler: Tüy hücrelerinin efferent innervasyonu işitsel hassasiyeti modüle etmede ve akustik travmalardan korumada kritik bir rol oynar. Bu nöronlar, sinapslarında asetilkolin (ACh) salgılar ve kalsiyum bağımlı potasyum kanallarını aktive ederek tüy hücrelerinin aktivitesini inhibe eder. Özellikle medial olivokoklear efferent nöronlar, dış tüy hücreleri (DTH) ile sinaps yapar ve bunların elektromotilitesini azaltarak baziler membran hareketinin amplifikasyonunu düşürür. Bu eylem, kokleanın yüksek seslere verdiği yanıtları azaltmaya ve işitsel işleme sırasında frekans seçiciliğini keskinleştirmeye yardımcı olur. Ayrıca, lateral olivokoklear efferent nöronlar, iç tüy hücrelerinin (İTH) afferent dendritleri ile sinaps yapar ve tip I afferent liflerin aktivitesini modüle eder. Efferent geri bildirim mekanizması, ses lokalizasyonunun iyileştirilmesine, gürültüde ayırt etmenin iyileştirilmesine ve değişen akustik ortamlar içinde işitsel hassasiyetin dinamik olarak düzenlenmesine katkıda bulunur. Son araştırmalar, medial olivokoklear sisteminin aktivasyonunun karmaşık dinleme koşullarında sinyal-gürültü oranını iyileştirebileceğini ve gürültülü ortamlarda sesin daha net algılanmasını sağlayabileceğini öne sürmektedir (Eggermont, 2019; Fuchs ve Lauer, 2019; Rabbitt ve Brownell, 2011).

Arteriyel Kanlanma: Kokleanın arteriyel kanlanması, vertebrobaziler arter sisteminden türetilir ve vertebral arterlerden dallanır. Kokleadaki primer arter yapıları, tüylü hücre işlevi için gerekli olan endolenfatik potasyum iyonlarını sağlayan stria vascularis ve korti organına besin sağlayan baziler membranın altındaki arter ağını içerir (Şekil 2.10). Bu arter sistemleri, koklea yapıları ile doğrudan temas etmez, bu da intrakoklear sıvılar yoluyla ara bir transfer sistemi gerektirir (Angelborg ve diğ., 1977; Atkinson ve diğ., 2015; Nuttall, 1988).



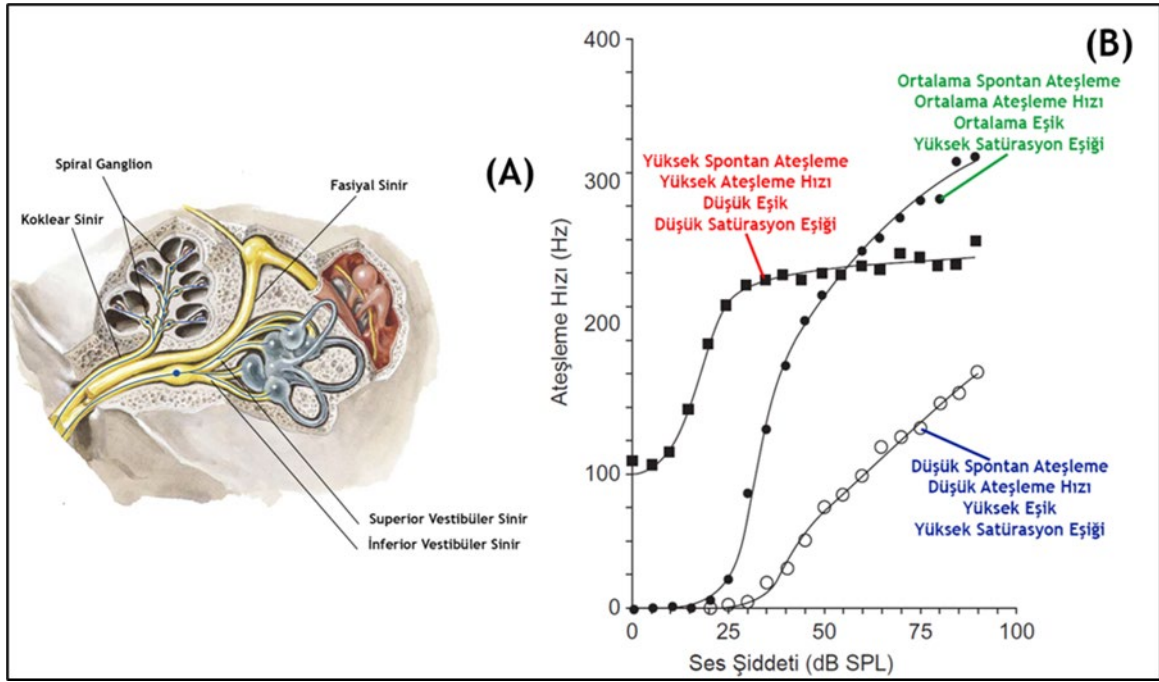
Şekil 2.10: Kokleanın arteriyel kanlanması (Albernaz ve diğ., 2019).

2.1.4. İşitme Siniri

Sekizinci kraniyal sinir olarak da bilinen vestibulokoklear sinir, insanlarda işitme ve denge fonksiyonları için gereklidir. İki ayrı bölümden oluşur: işitmeden sorumlu olan koklear sinir (işitme siniri) ve dengeyi yöneten vestibüler sinir. Koklear sinir lifleri, iç kulakta koklea içindeki spiral ganglion hücrelerinden kaynaklanır ve işitsel bilgiyi beyin sapında koklear çekirdeklere iletir (Grisold ve diğ., 2023; Spoendlin, 1972). Vestibüler sinir lifleri, internal akustik meatusta bulunan vestibüler gangliondan çıkar ve duyuşal bilgiyi yarım daire kanalları, utrikül ve sakkülden beyin sapındaki vestibüler çekirdeklere iletir (da Costa Monsanto ve diğ., 2023). Bu yapılar sesin algılanmasını ve dengenin korunmasında görev almaktadır (da Costa Monsanto ve diğ., 2023; Grisold ve diğ., 2023; Spoendlin, 1972).

İşitme siniri lifleri Korti organının modiolar kenarı boyunca spiral ganglionu oluşturan hücre gövdelerine sahiptir. Koklear sinir afferentlerinin %90-95'ini oluşturan Tip I afferentler tek bir iç tüy hücresine (İTH) bağlanır ancak her İTH birden fazla tip I afferente bağlanarak sesin paralel olarak işlenmesini kolaylaştırır (Grisold ve diğ., 2023; Liberman, 1982; Spoendlin, 1969). Bu tip I nöronlar, pre ve postomatik segmentlerin miyelinden yoksun olduğu insanlar dışındaki memelilerde miyelinlidir (Grisold ve diğ., 2023; Ota ve Kimura, 1980). Tip II afferentler miyelinsiz sinir lifleridir ve birden fazla dış tüy hücresi (DTH) ile sinaps yaparlar. Bu afferentler muhtemelen DTH'lerin motor durumlarını izler ve gürültüye bağlı doku hasarını tespit edebilirler (Grisold ve diğ., 2023; Liberman, 1982; Spoendlin, 1969). Memeli işitme siniri liflerinden alınan aksiyon potansiyeli kayıtlarının çoğu tip I nöronlardan alınmıştır. Bu nöronlar saniyede 5'ten az ila yaklaşık 100 arasında değişen hızlarda spontan ateşlemeye sahiptir (Grisold ve diğ., 2023; Ota ve Kimura, 1980). Yüksek spontan ateşleme hızına (Spontaneous

Firing Rate - SFR) sahip nöronların eşikleri düşüktür ve ateşlemeleri düşük ses basınç seviyelerinde (SPL) doyuma ulaşırken, orta ve düşük SFR nöronlarının eşikleri daha yüksektir ve doyuma ulaşmazlar, bu da gürültülü ortamlarda konuşmanın algılanmasına yardımcı olur. Düşük SFR nöronlarının kaybı, normal periferik işitmeye rağmen konuşmayı anlamada azalmaya neden olabilir (Flores ve diğ., 2015; Liberman, 1982; Tyler ve diğ., 2014). Fasiyal sinir ile birlikte seyreden vestibülokoklear sinirin anatomisi ile işitme sinirinin spontan ve uyaran varlığından ateşleme örüntüleri Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11: Vestibülokoklear sinir anatomisi (A) ve ateşleme örüntüleri (B).

2.2. KOKLEA VE İŞİTME SİNİRİ MEKANİKLERİ

2.2.1. İlerleyen Dalga Teorisi

İlerleyen dalga teorisi, Von Békésy (1928) tarafından ortaya atılan ve kokleadaki frekansların yerleşimini açıklayan temel bir teoridir. Bu teoriye göre, kokleada bulunan baziler membran, ses dalgalarının kokleada ilerleyişine yol açan bir mekanizma sunar (Alberts ve Puria, 2023; Von Békésy, 1928). Baziler membran, bazal kısımda daha sert ve dar, apeks tarafında ise daha esnek ve geniştir (Alenzi ve Lineton, 2021; Robles ve Ruggero, 2001). Bu sertlik ve genişlik gradyanı, kokleaya iletilen ses dalgalarının bazaldan apeks yönüne doğru belirli bir frekansta ilerlemesine ve baziler membran üzerinde spesifik bir bölgede maksimum genliğe ulaşmasına neden olur (Alberts ve Puria, 2023; Alenzi ve Lineton, 2021; Robles ve Ruggero, 2001; Von Békésy, 1928). Bu ilerleyen dalga hareketi sırasında, dalga baziler

membran boyunca ilerlerken belirli bir noktada maksimum genliğe ulaşır ve bu noktadan sonra hızla sönümlenir (Shera ve Altoè, 2023; Von Békésy, 1928). Bu maksimum genliğe ulaşan nokta, işitsel sistemdeki tonotopik organizasyonu belirler: Yüksek frekanslar kokleanın bazal kısmında, alçak frekanslar ise apeks kısmında temsil edilir (Goodman ve diğ., 2020; Von Békésy, 1928). Ses dalgasının bu hareketi, baziler membran ve tektorial membran arasındaki kesme kuvvetini artırarak stereosilyaların modiolus yönüne doğru bükülmesine neden olur (Shera ve Altoè, 2023). Bu bükülme, tüy hücrelerinin iyon kanallarını açarak elektriksel potansiyeller oluşturur ve bu potansiyeller işitme sınırı aracılığıyla santral işitme sistemi boyunca iletilir (Alberts ve Puria, 2023; Shera ve Altoè, 2023). Kokleada ilerleyen dalga modeli Şekil 2.12’de görülmektedir.

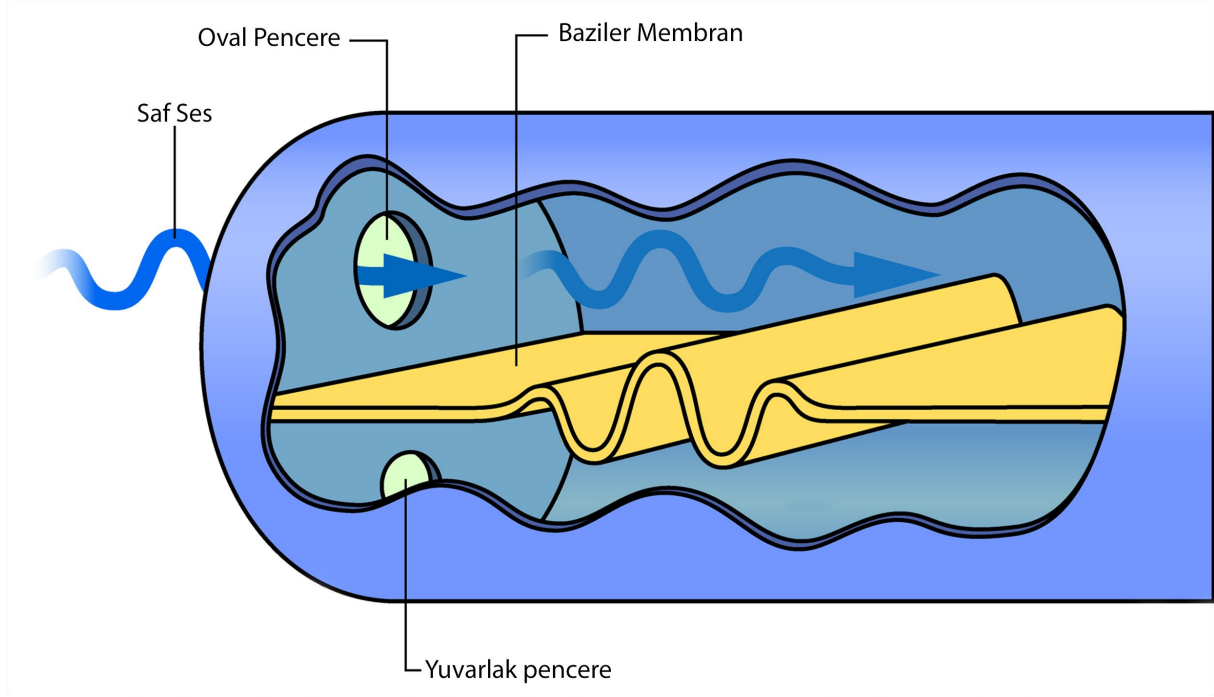
Bu teorinin sunduğu temel mekanizma, kokleanın tonotopik organizasyonunu anlamada büyük bir adım olsa da, ilerleyen dalga teorisi bazı önemli eksikliklere sahiptir. Bu eksiklikler nedeniyle teori, kokleada gözlemlenen tüm işitsel fenomenleri tam olarak açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliklerden iyi bilinen birkaçı aşağıda sıralanmıştır:

Tepe Noktasının Keskinliği: İlerleyen dalga teorisi, kokleada oluşan dalganın geniş bir tepe noktası oluşturacağını öngörür. Ancak, deneysel çalışmalar baziler membranın yanıtının çok daha keskin olduğunu ortaya koymuştur (Nilsen ve Russell, 2000; Ren, 2002). Ayrıca Altoè ve Charaziak (2023) kokleada meydana gelen amplifikasyon sürecinin dalganın tepe noktasındaki keskinliği ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Mevcut teori bu hususları açıklayamamaktadır.

Yetersiz Sertlik Gradyanı: Kokleanın geniş bir frekans aralığını algılayabilmesi için baziler membrandaki sertlik gradyanının yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Ancak çalışmalar, baziler membranın sertlik değişiminin teoride gerekli olan seviyede olmadığını göstermektedir (Naidu ve Mountain, 1998; Rabbitt ve Bidone, 2023; Richter ve diğ., 2007). Bu nedenle teori, kokleanın farklı frekansları nasıl bu kadar hassas bir şekilde ayırt edebildiğini açıklayamamaktadır. Wen ve Meaud (2022) kokleanın sertlik ve sönümleme özelliklerinin, frekans seçiciliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve geleneksel ilerleyen dalga modelinin bu etkileri tam olarak açıklayamadığını ortaya koymuştur.

Geri Yayılım Dalgası: İlerleyen dalga teorisinin bir diğer önemli eksikliği, otoakustik emisyonları açıklamakta yetersiz kalmasıdır. Modern koklea modelleri, sadece ileri yönde ilerleyen bir dalganın varlığını değil, aynı zamanda geri yönde hareket eden bir dalganın da

(backpropagating wave) varlığını öngörmektedir (Chen ve diğ., 2018; Hsiao ve diğ., 2021; Shera ve Zweig, 1992). Chen ve diğ. (2018) geri yönde hareket eden bu dalgaları deneysel olarak gözlemlemiştir. Ancak, klasik ilerleyen dalga teorisi bu geri yayılım dalgasını hesaba katmamaktadır.



Şekil 2.12: İlerleyen dalga (Bell, 2004)

2.2.2. Tonotopik Organizasyon

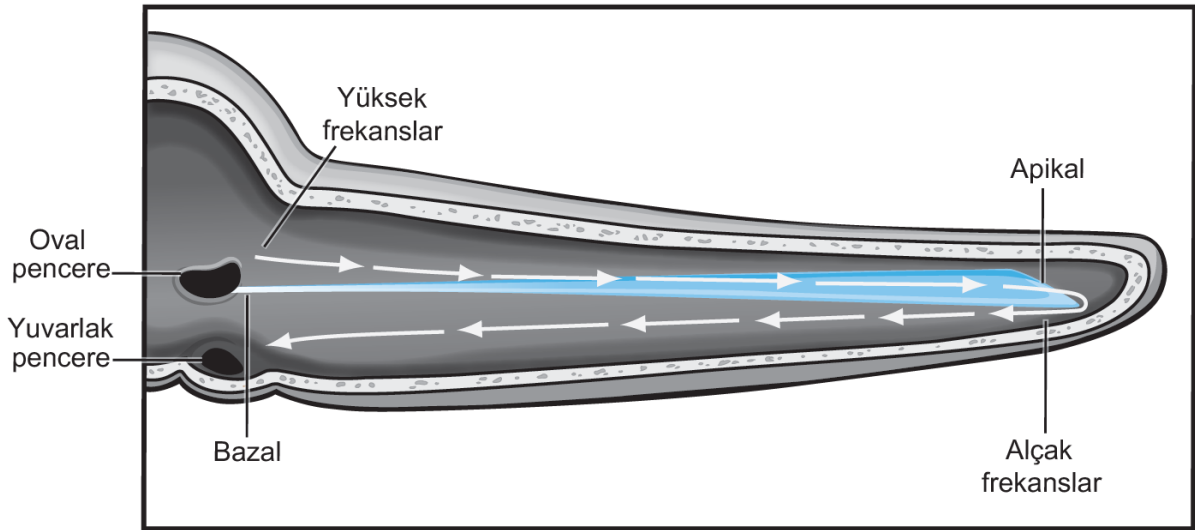
Tonotopik organizasyon, kokleanın farklı bölgelerinde frekanslara göre sesleri ayırt edebilme yeteneğini açıklayan temel bir kavramdır. Kokleanın bazal kısmı yüksek frekanslı sesleri, apikal kısmı ise alçak frekanslı sesleri algılar (Recio-Spinoso ve diğ., 2023). Bu organizasyon, baziler membranın fiziksel özellikleri ve mekanik rezonans özellikleriyle ilişkilidir (Ashmore, 2020). Helmholtz (1877) bu organizasyonun temelini atarak ses frekanslarının koklea boyunca nasıl dağıldığını matematiksel olarak açıklamıştır. Békésy ve Wever (1960) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ise bu teoriyi desteklemiş ve kokleanın mekanik tonotopik yapısını ortaya koymuştur.

Kokleada tonotopik organizasyon, baziler membranın fiziksel özelliklerine dayalı mekanik rezonans prensipleri üzerine kuruludur. Şekil 2.13’de görüldüğü üzere bazal membran, yüksek frekanslı seslere karşı daha duyarlıdır ve bu bölge daha kalın-dar bir yapı gösterirken, apikal membran alçak frekanslı sesleri algılar ve bu bölge daha ince-genişdir (Ashmore, 2020).

Bu yapısal farklılıklar, ses dalgalarının koklea boyunca yayılma şeklini belirler ve tonotopik organizasyonu oluşturur (Mao ve diğ., 2020).

Tonotopik organizasyon, yalnızca kokleada değil, tüm işitsel yollar boyunca, beyin sapı ve kortekse kadar devam eder (Allen ve diğ., 2022). Kokleada başlayan frekans-yer kodlaması, işitsel sinyalin işlenmesi sırasında beyin sapındaki işitsel çekirdeklerde ve son olarak işitsel kortekste de korunur (Mao ve diğ., 2020). Bu, işitsel sistemin tüm seviyelerinde uyaran frekanslarına duyarlı hücre gruplarının bulunduğu anlamına gelir (Ashmore, 2020).

Tonotopik organizasyonun gelişimi, koklear gelişim sırasında hücresel farklılaşma ve mekanoelektriksel transdüksiyon kanalları gibi moleküler mekanizmalar tarafından yönlendirilir (Shepard ve diğ., 2019). Bu süreçte, DTH uzunlukları ve mekanoelektriksel transdüksiyon kanallarının iletkenlikleri tonotopik eksen boyunca değişir; bazal hücrelerde bu iletkenlik daha yüksek, apikal hücrelerde ise daha düşüktür (Hoshino ve diğ., 2021). Bu farklılıklar, tonotopik organizasyonun hassas ayarını sağlar ve seslerin doğru bir şekilde işlenmesine katkıda bulunur (Fettiplace, 2023).



Şekil 2.13: Açılmış kokleada tonotopik organizasyon (Lass ve Donai, 2023).

2.2.3. Elektromotilite

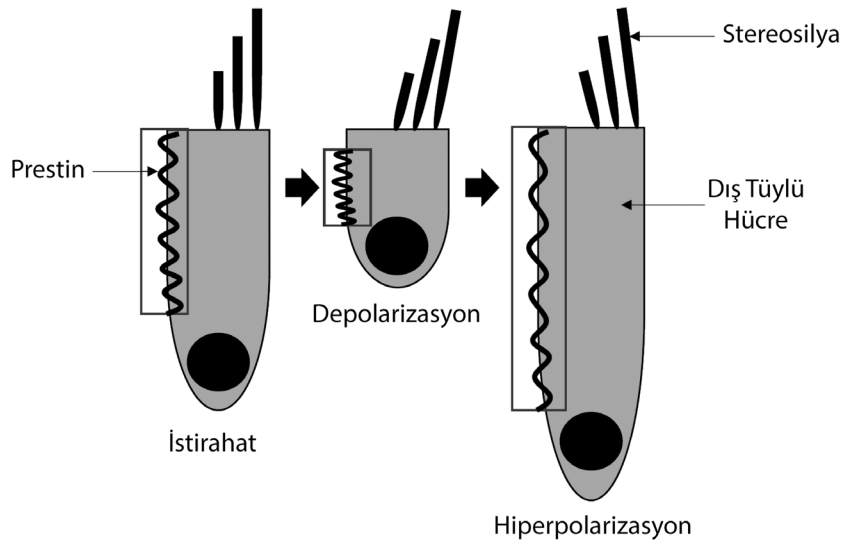
Elektromotilite, DTH transmembran gerilimindeki değişikliklere yanıt olarak uzunlamasına hareket etmesi anlamına gelir ve bu hareket, prestin adı verilen motor proteini sayesinde gerçekleşir (Ashmore, 2008; Brownell ve diğ., 1985; Zheng ve diğ., 2000). Prestin, transmembran potansiyelindeki değişikliklerle DTH'lerin uzunluğunda hızlı değişimlere yol

açar, bu da kokleanın duyarlılığını ve frekans seçiciliğini artırır (Bavi ve diğ., 2021). Uyarılma durumuna göre DTH’de prestin elektromotilitesi Şekil 2.14’te görülmektedir.

DTH'lerin elektromotilitesi, koklear amplifikasyonun temel bileşeni olup, mekanik enerjiyi kokleaya geri ileterek ses sinyallerinin hassas algılanmasına olanak tanır (Ashmore, 1987; Bavi ve diğ., 2021; Dallos, 2008). Bu hareketin yüksek frekanslarda bile etkin olması, prestin’in gerilim bağımlı hareketiyle sağlanır (Frank ve diğ., 1999; Johnson ve diğ., 2011).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, prestin’in sadece motor işlevleriyle değil, aynı zamanda anion taşıma kapasitesiyle de elektromotilitenin oluşumunda kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Bai ve diğ., 2017; Santos-Sacchi ve diğ., 2017). Bu çift yönlü işlevsellik, DTH'lerin hücre içi gerilimlerini ve mekanik özelliklerini düzenleyerek, frekans seçiciliğini optimize eder ve işitsel bilgi işleme kapasitesini artırır (Ge ve diğ., 2021).

Elektromotilitenin ve prestin’in kokleada oynadığı bu merkezi rol, kokleanın genel işlevselliği için kritik öneme sahiptir. Bu mekanizmanın bozulması, koklear amplifikasyon kaybına ve işitme duyarlılığının azalmasına neden olabilir, prestin mutasyonları ise ciddi işitme kayıplarına yol açabilir (Lieberman ve diğ., 2002; Matsunaga ve Morimoto, 2016).

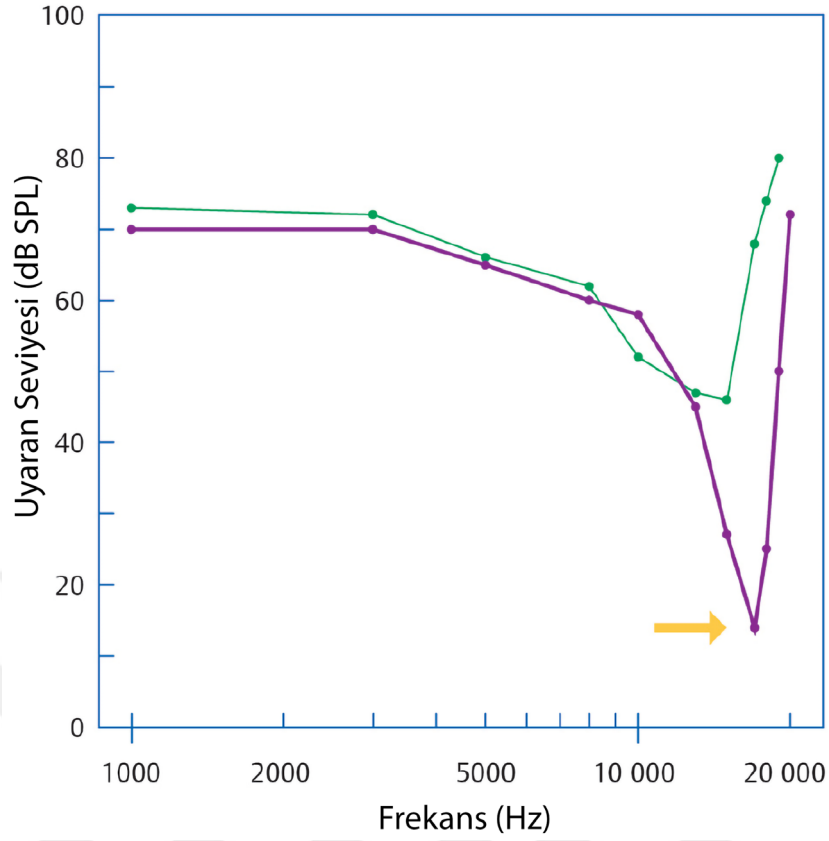


Şekil 2.14: Dış tüylü hücrelerde prestin ilişkili elektromotilite (Parker ve diğ., 2022).

2.2.4. Koklear Amplifikasyon

Koklear amplifikasyon, DTH’lerin aktif mekanik hareketleriyle karakterize edilen ve işitme duyusunun hassasiyetini ve frekans seçiciliğini artıran bir süreçtir (Dewey ve diğ., 2019).

Bu hücreler, tektorial membrana doğrudan bağlı olup, olivokoklear demetten sinyaller alarak prestin adlı motor proteini sayesinde somatik hareket kabiliyetine sahiptir (Dewey ve diğ., 2019; Santos-Sacchi ve Tan, 2018). Prestin, hücre membranındaki gerilim değişikliklerine yanıt olarak hücre uzunluğunu hızla değiştirir, bu da ses sinyallerin amplifikasyonuna yol açar (Santos-Sacchi ve diğ., 2019). Bu amplifikasyon mekanizması, özellikle düşük şiddetli seslerin algılanmasında ve frekans seçiciliğinin keskinleştirilmesinde kritik bir rol oynar (Dewey ve diğ., 2019; Jabeen ve diğ., 2020; Santos-Sacchi ve diğ., 2019; Santos-Sacchi ve Tan, 2018). Dış tüy hücrelerinin bu hareketleri, kokleadaki biyomekanik süreçlerin önemli bir parçasıdır ve hücrelerin mekanik özellikleri sayesinde ses sinyallerinin enerjisi artırılır (Jabeen ve diğ., 2020; Santos-Sacchi ve diğ., 2019; Santos-Sacchi ve Tan, 2018). Bu durum, frekansın hassas bir şekilde seçilmesine ve iç tüy hücrelerinin düşük seviyeli seslere bile yanıt vermesine olanak tanır (Zhou ve diğ., 2022b). Şekil 2.15'te görüldüğü üzere canlı koklea (mor) postmortem kokleaya göre (yeşil) çok daha keskin frekans cevabına sahiptir. Bu süreç, aynı zamanda, kokleanın metabolik enerjisini sağlayan stria vaskülarisin işlevselliğine de sıkı sıkıya bağlıdır. Stria vaskülaris, endolenfin iyonik bileşimini ve hücrelerin istirahat potansiyelini düzenleyerek, prestin aracılığıyla gerçekleştirilen bu amplifikasyonun sürdürülebilirliğini sağlar (Keithley, 2020; Korrapati ve diğ., 2019; Spicer ve Schulte, 1996; Thulasiram ve diğ., 2022). Ayrıca, Koklear amplifikasyon, otoakustik emisyonların üretimi ile doğrudan ilişkilidir. Dış tüy hücrelerinin bu aktif hareketleri, iç kulaktan yayılan ve hassas mikrofonlarla ölçülebilen otoakustik emisyonları oluşturur, bu da hem amplifikasyonun varlığını hem de hücrelerin sağlıklı işlevini gösterir (Goodman ve diğ., 2024; Kemp, 1978). Son yıllarda yapılan çalışmalar, prestin ve DTH'lerin işlevlerinin, kokleanın hem duyarlılığı hem de frekans seçiciliği üzerindeki etkilerini daha da ayrıntılı olarak açıklamış ve bu süreçlerin işitme hassasiyetini nasıl optimize ettiğini ortaya koymuştur (Ashmore, 2008; Dallos, 2008; Santos-Sacchi ve diğ., 2023; Takahashi ve diğ., 2023).



Şekil 2.15: Canlı kokleada koklear amplifikasyon sayesinde frekans hassasiyetinin artışı (Gelfand ve Calandruccio, 2023).

2.2.5. Koklear Nonlineerite

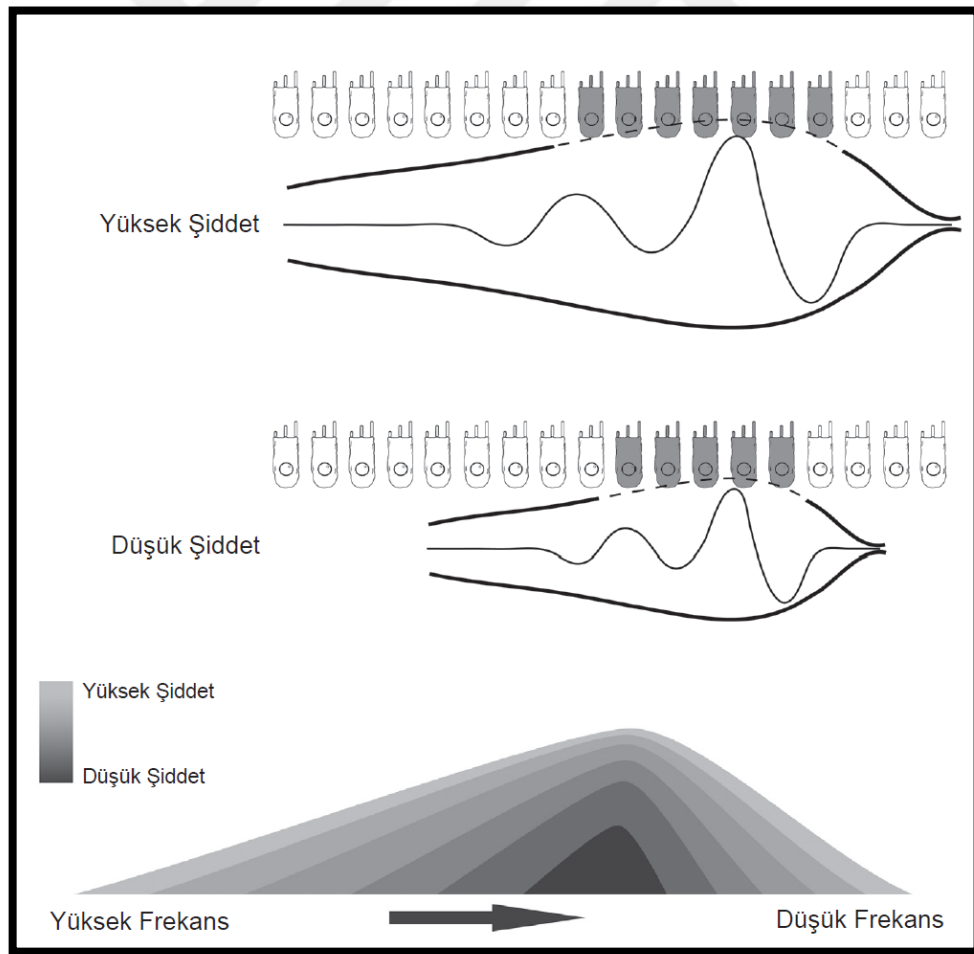
Koklear nonlinearite, işitme sisteminin düşük şiddetli sesleri güçlendirme ve yüksek şiddetli seslere karşı kompresif bir yanıt verme kapasitesini açıklayan kritik bir özelliktir. Bu özellik, özellikle DTH'lerin mekanik ve elektriksel tepkileri ile yakından ilişkilidir. DTH'lerin prestin aracılığıyla gerçekleştirdiği elektromotilite, baziler membran hareketlerine katkıda bulunur ve bu süreçte kokleanın belirli frekanslarda daha hassas ve seçici yanıt vermesini sağlar (Brownell ve diğ., 1985; Santos-Sacchi, 1993).

Koklear nonlinearite, iki ana frekans bölgesinde farklı şekillerde ortaya çıkar: en iyi frekans (BF) bölgesi ve BF altı (sub-BF) bölgesi. BF bölgesinde, DTH'lerin elektromotilitesi, kokleanın ilerleyen dalgasına enerji enjekte ederek dalganın büyümesini ve koklea boyunca daha ileriye gitmesini sağlar. Bu süreç, koklear amplifikasyon olarak bilinir ve düşük şiddetli seslerin güçlendirilmesinde kritik bir rol oynar (Dong ve Olson, 2008; Fallah ve diğ., 2019). BF bölgesinde gözlemlenen nonlinearite, ses seviyesinin artmasıyla birlikte kompresif hale

gelir, bu da yüksek şiddetli seslerin baskılanmasına ve kokleada daha düşük bir yerel tepe oluşmasına neden olur (Olson, 1999).

Sub-BF bölgesinde ise nonlinearite, DTH'lerin elektromekanik yanıtlarının bir sonucudur, ancak bu yanıtlar BF bölgesindeki gibi güçlendirici bir etki göstermez (Strimbu ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2019). Sub-BF bölgesinde, DTH'lerin oluşturduğu kuvvetler, ilerleyen dalgaya enerji eklenmek yerine, DTH'lerin kendi hareketleriyle sınırlı kalır (Strimbu ve diğ., 2020). Bu nedenle, sub-BF bölgesi, amplifikasyon sağlamayan bir nonlinearite olarak tanımlanır (Fallah ve diğ., 2019; Strimbu ve diğ., 2020).

Bu çift yönlü mekanizma, koklear nonlinearitenin hem güçlendirici hem de sınırlayıcı yanıtlar üretebilme kapasitesini ortaya koyar ve işitme sisteminin geniş bir dinamik aralıkta etkili çalışmasını sağlar (Cooper ve diğ., 2018). Koklear nonlinearite basitleştirilmiş haliyle Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16: Koklear nonlinearite (Musiek ve Baran, 2020)

2.2.6. Faz Kilitleme

Faz kilitleme, işitme siniri liflerinin (ANF) alçak frekanslı ses uyarılarına karşı verdiği tepkide, aksiyon potansiyellerinin (spike) ses dalgasının belirli bir fazında tekrarlanması fenomenidir (Joris, 2018; Peterson ve Heil, 2019). Bu özellik, işitsel sistemin temporal hassasiyetini gösterir (Rutherford ve diğ., 2021; Verschooten ve diğ., 2019). İTH'lerin membran potansiyelindeki değişiklikler, ANF'lerde aksiyon potansiyellerini tetikler ve bu potansiyeller alçak frekanslı seslerle uyarıldığında belirli bir faza kilitlenir (Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021). Bu fenomen, özellikle alçak frekanslarda ses dalgasının tepe noktalarına kilitlenen ANF'lerde belirgindir (Joris, 2018; Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021; Verschooten ve diğ., 2019).

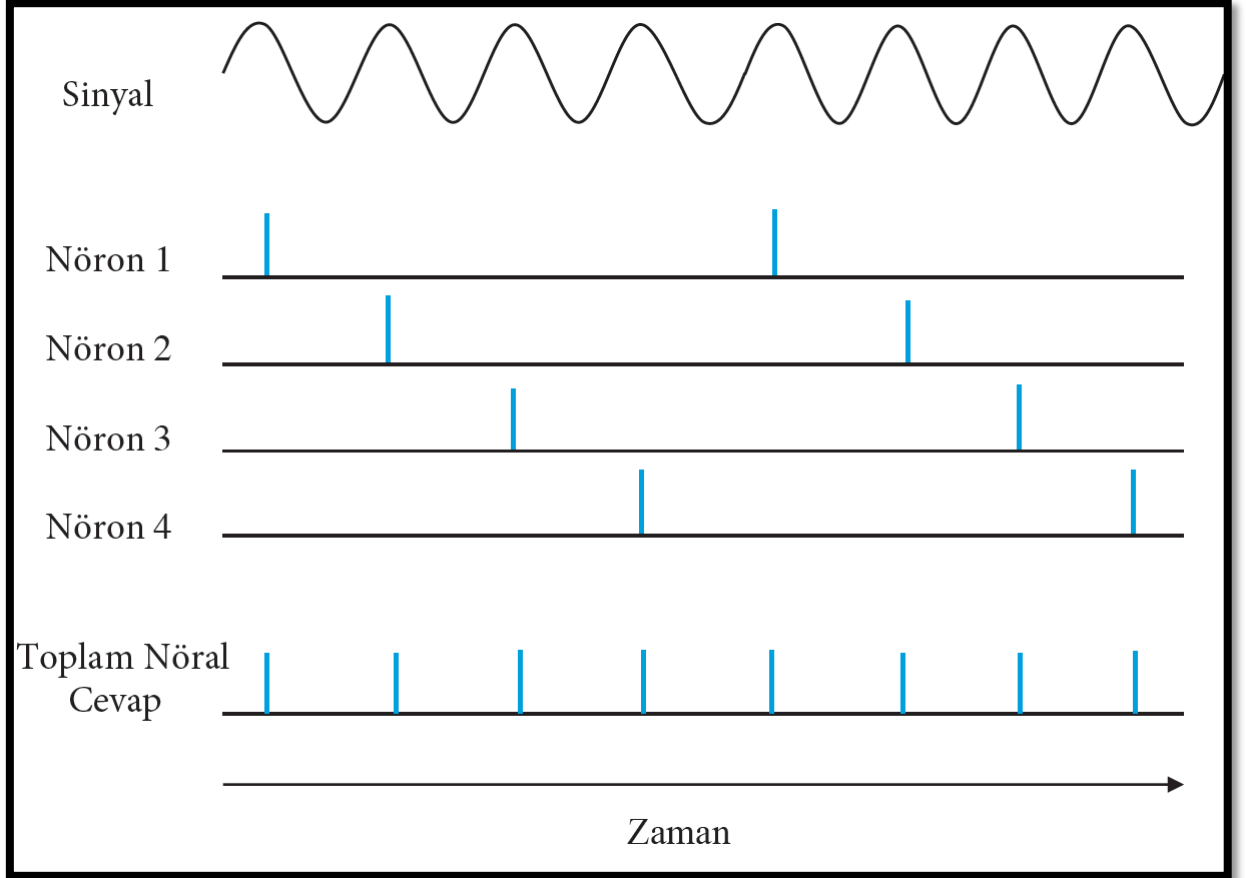
Faz kilitleme, frekansa ve uyarı şiddetine bağlı olarak değişir (Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021; Verschooten ve diğ., 2019). Alçak frekanslarda ve yüksek ses şiddetlerinde faz kilitleme daha güçlüdür, bu da ANF'lerin temporal kodlama kapasitesinin bir göstergesidir (Joris, 2018; Palmer ve Russell, 1986; Peterson ve Heil, 2019). Ancak, frekans arttıkça faz kilitleme azalır, çünkü yüksek frekanslar ANF'lerin bu kapasitesini aşar (Joris, 2018; Verschooten ve diğ., 2019). İnsanlarda faz kilitleme 1500 Hz'den sonra oldukça zorlaşır, fakat monaural faz kilitlemenin üst sınırı tartışma konusudur (Brughera ve diğ., 2013). Araştırmacılar, insanlarda monaural faz kilitlemenin üst sınırı için 1500 Hz ile 10.000 Hz arasında değişen farklı limitler bildirmiştir (Verschooten ve diğ., 2019). Bununla birlikte, işitme sinirleri yüksek frekanslı uyarıların, alçak frekanslı zarflarına da faz kilitleme yapabilmek yeteneğine sahiptir (Dreyer ve Delgutte, 2006; Easwar ve diğ., 2018).

Faz kilitlemenin işitsel sistemdeki önemi, konuşma algısı ve müzik gibi karmaşık akustik sinyallerin işlenmesinde belirgindir (Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021). Bu fenomen, seslerin zamanlamasını doğru bir şekilde kodlayarak santral işitsel yollara iletilmesini sağlar, böylece seslerin algılanması ve ayrıştırılması mümkün olur (Joris, 2018; Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021; Verschooten ve diğ., 2019).

2.2.7. Yayılım (Volley) Prensibi

Faz kilitlemenin mümkün olmadığı yüksek frekanslı seslerde, yayılım (volley) prensibi devreye girer (Wever ve Bray, 1937). Bu ilkeye göre, tek bir ANF, her ses döngüsüne kilitlenemese de, farklı ANF'ler sırayla ateşleyerek her döngüde bir aksiyon potansiyeli oluşturur (Joris, 2018; Joris ve Smith, 2008; Wever ve Bray, 1937). Böylece, sinir lifleri belirli

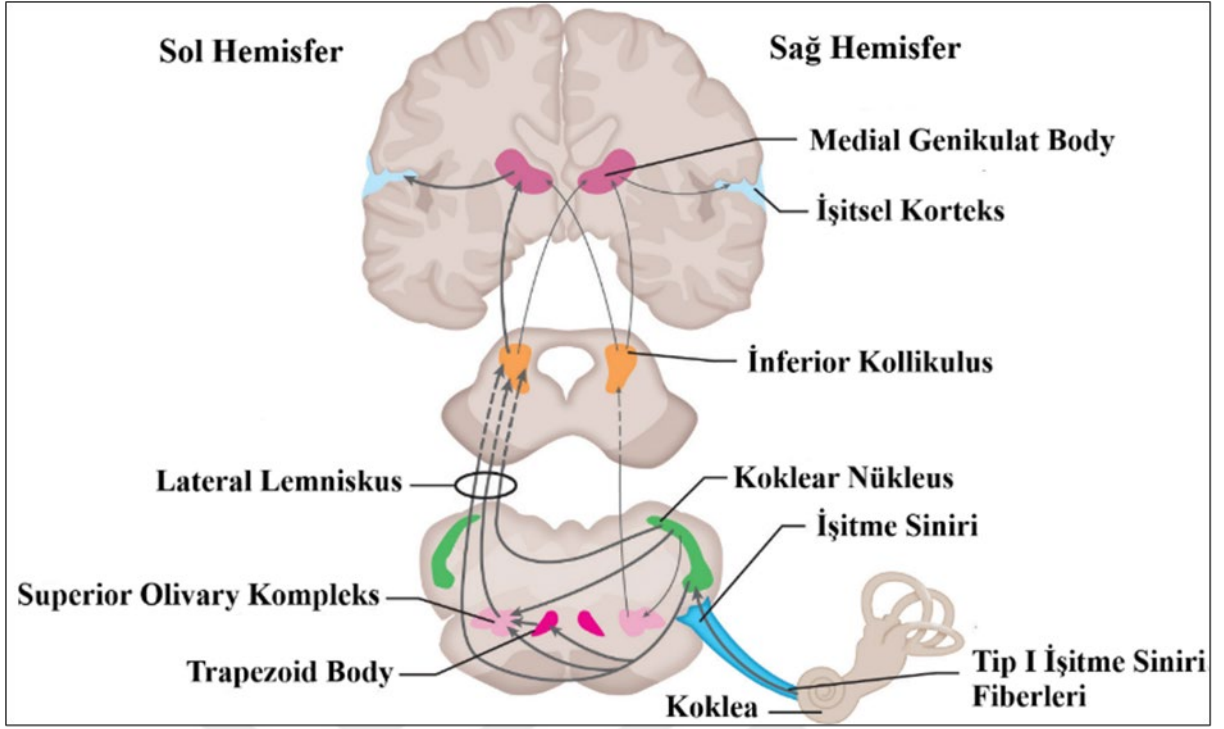
bir frekansta aşırı yüklenmeden birlikte çalışarak, yüksek frekanslı seslerin kodlanmasını sağlar (Şekil 2.17). Bu mekanizma, ANF'lerin bireysel sınırlamalarını aşarak, işitsel sistemin yüksek frekansları doğru bir şekilde işleyebilmesine olanak tanır ve hem yer hem de temporal kodlama süreçleriyle yüksek frekansların algılanmasını mümkün kılar ve daha geniş bir frekans aralığının algılanabilmesi sağlanır (Joris, 2018; Peterson ve Heil, 2019; Rutherford ve diğ., 2021; Verschooten ve diğ., 2019).



Şekil 2.17: Yayılım (Volley) prensibi ile yüksek frekanslı uyarıların işlenmesi (Lass ve Donai, 2023)

2.3. SANTRAL İŞİTME SİSTEMİ ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ

Santral işitme sistemi, koklear nükleus, superior olivary kompleks, lateral lemniskus, inferior kollikulus, medial genikulat cisim ve işitsel korteksten oluşur. Şekil 2.18’de bu yapılar gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Santral işitme sistemine ait yapılar (Tellis, 2023b).

Koklear nükleus (KN), santral işitme sisteminin ilk ve en önemli yapılarından biri olarak, sesin beyne iletilmesinde kritik bir rol oynar. Kaudal ponsun latero-posterior bölümünde yerleşik olan bu yapı, üç ana bölümden oluşur: dorsal koklear nükleus (DKN), posterior ventral koklear nükleus (PVKN) ve anterior ventral koklear nükleus (AVKN). Her bir bölüm, işitsel bilgiyi işleyip beyin sapının diğer bölgelerine iletmek üzere özelleşmiş çeşitli hücre tiplerini barındırır. KN kompleksinde yer alan hücre türleri arasında piramidal, oktopus, globular, multipolar ve sferik hücreler dikkat çekmektedir (Osen, 1969; Pfeiffer, 1966). İşitme sinirinin her bir lifi koklear nükleusa girerken dallanır ve bir dalı rostral, diğerini kaudal olarak gönderir. Rostral veya anterior dal ventral binaural ses lokalizasyon için bilgi taşır ve AVKN'yi innerve eder. Kaudal veya posterior dal hem ses tanımlama hem de ses lokalizasyonu için bilgi taşır ve PVKN ile DKN'yi innerve eder. Kokleanın farklı bölgelerinden gelen ve farklı frekanslara duyarlı lifler, tonotopik organizasyon oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Bu organizasyon, innerve ettikleri nöronların karakteristik frekanslarının da düzenli bir şekilde sıralanmasını sağlar. Her bir nüklesta, alçak frekanslar anterior ve ventral olarak, yüksek frekanslar ise posterior ve dorsal olarak temsil edilme eğilimindedir (Nayagam ve diğ., 2011).

Superior olivary kompleks (SOC), kaudal ponsun işitsel bölgesinde yoğun nöral bağlantılarıyla öne çıkan, işitsel bilgilerin entegrasyonunda kritik bir rol oynayan ve çeşitli nükleus gruplarından oluşan önemli bir yapıdır. Bu gruplar arasında lateral superior olivary

nükleus (LSO), medial superior olivary nükleus (MSO) ve trapezoid cismin medial nükleusu yer alır. Ayrıca, bu nükleuslar, pre-olivary ve periolivary nükleuslar olarak bilinen ve diğer olivary çekirdeklere bağlantılar sağlayan nükleuslarla çevrilidir (Pickles, 2012). KN'de olduğu gibi, SOC'da da tonotopik organizasyon görülür. LSO'da yüksek frekanslar medialde, alçak frekanslar ise lateralde yer alır. MSO'da ise yüksek frekanslar ventral uca doğru, alçak frekanslar ise dorsal uca doğru temsil edilir (Pickles, 2012; Pickles, 2015). SOC, işitsel sistemde monaural akustik girdinin bilateral olarak temsil edildiği ilk yapıdır. Bu binaural temsil, SOC'a gelen ipsilateral ve kontralateral girdilerin hassas karşılaştırılmasıyla sağlanır. Özellikle zaman ve şiddet farklarını değerlendirerek, SOC, füzyon, lateralizasyon ve lokalizasyon gibi işitsel işlevlerin temelini oluşturur. SOC, interaural zaman ve şiddet farklılıklarına karşı yüksek hassasiyet gösteren nöronlar barındırır. Bu nöronlar, sol ve sağ girdilerin karşılaştırılmasında ve işitsel alanların tanımlanmasında kilit rol oynar. Ayrıca, SOC'daki nöronlar uyarıcı, inhibe edici ya da belirli girdilere duyarsız olarak çeşitlilik gösterir, bu da işitsel bilgi işlemede karmaşık bir ağ yapısını destekler (Musiek ve Baran, 2020).

Lateral lemniskus (LL), SOC'dan çıkan ve inferior kollikulusa uzanan liflerin, KN ile SOC'u inferior kollikulusa bağlayan bir kanal içinde ilerlediği yapıdır. Bu yol içerisinde LL'nin dorsal nükleusu (DNLL) ve ventral nükleusu (VNLL) olarak bilinen iki ana nükleusu bulunmaktadır (Pickles, 2015). DNLL, lokalizasyon bilgisinin doğruluğunu, kontrastını ve dinamik aralığını artıran bir yapı olarak görev yapar. Girdilerini ipsilateral MSO, bilateral LSO ve kontralateral KN'den alır. DNLL, her iki tarafın inferior kollikuluslarına ve kontralateral DNLL'ye büyük ölçüde inhibitör projeksiyonlar gönderir. Bu çapraz inhibitör girdiler, farklı yönlerdeki ses kaynaklarına verilen nöral yanıtlar arasındaki kontrastı artırır (Pecka ve diğ., 2010; Pickles, 2015). VNLL, monaural patern tanımlama ile ilgilidir, Girdisini kontralateral ventral KN'den ve ipsilateral trapezoid cismin medial nükleusundan alır (Kelly ve diğ., 2009).

Inferior kollikulus, mezensefalonun her iki tarafında yer alan ve işitme sisteminde önemli işlevler üstlenen bir yapıdır. Üç ana bölgeye ayrılır: merkezi nükleus, lateral nükleus ve dorsal nükleus (Oliver ve Morest, 1984). Merkezi nükleus, tamamen işitsel liflerden meydana gelir ve alt beyin sapından kaynaklanan çeşitli afferent liflerle bağlantı kurarak işitsel bilgilerin işlenmesinde kritik bir rol oynar. Lateral ve dorsal nükleuslar ise hem işitsel hem de somatosensoriyel lifleri içerir. Alt beyin sapından gelen bilgileri lateral lemniskus'tan alıp, aksonlarla bu bilgilerin ön beyindeki medial genikulat cisme ve işitme korteksine iletilmesinde önemli bir rol oynayan inferior kollikulus yer ve yön ayırımında da görev alır (Pickles, 2012;

Pickles, 2015). Ayrıca, inferior kollikulusun tonotopik organizasyonu, bu yapı içinde frekansların belirli bir düzen içinde işlenmesini sağlar. Alçak ve yüksek frekanslar için sırasıyla dorsolateralden ventromediale doğru işleme gerçekleşir (Stiebler ve Ehret, 1985).

Medial genikulat cisim, inferior kollikulustan afferentler alır ve serebral kortekse projeksiyon yapar. Ayrıca, korteksten gelen bağlantıları da bulunmaktadır. Önemli bir yapı olan medial genikulat cisim, lokalizasyon ve lateralizasyon görevlerinde aktif rol oynar (Musiek ve Baran, 2020).

İşitsel korteks, işitsel bilgilerin detaylı bir şekilde işlenmesi ve algısal deneyimlerin oluşturulmasında rol oynayan kritik bir beyin bölgesidir. Medial genikulat cisimden gelen liflerin ana hedefi olan bu yapı, işitme yolundaki sinyallerin işlendiği yerdir ve bu nedenle konuşma, müzik ve diğer çevresel seslerin tanınmasında önemli bir yere sahiptir (Fitzpatrick ve Mooney, 2018). İşitsel korteksin fonksiyonları arasında seslerin lokalizasyonu ve frekanslarının ayırt edilmesi gibi karmaşık işitsel işlemler de bulunmaktadır. Bu bölge, seslerin mekansal konumlarını belirleyerek, hangi yönden geldiğini algılamamıza ve bu sayede çevremizdeki ses kaynaklarını doğru bir şekilde tanımlamamıza olanak tanımaktadır (Pickles, 2015).

2.4. İŞİTSEL NÖRAL SÜREÇLERLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ KAVRAMLAR

2.4.1. Lateral İnhibisyon

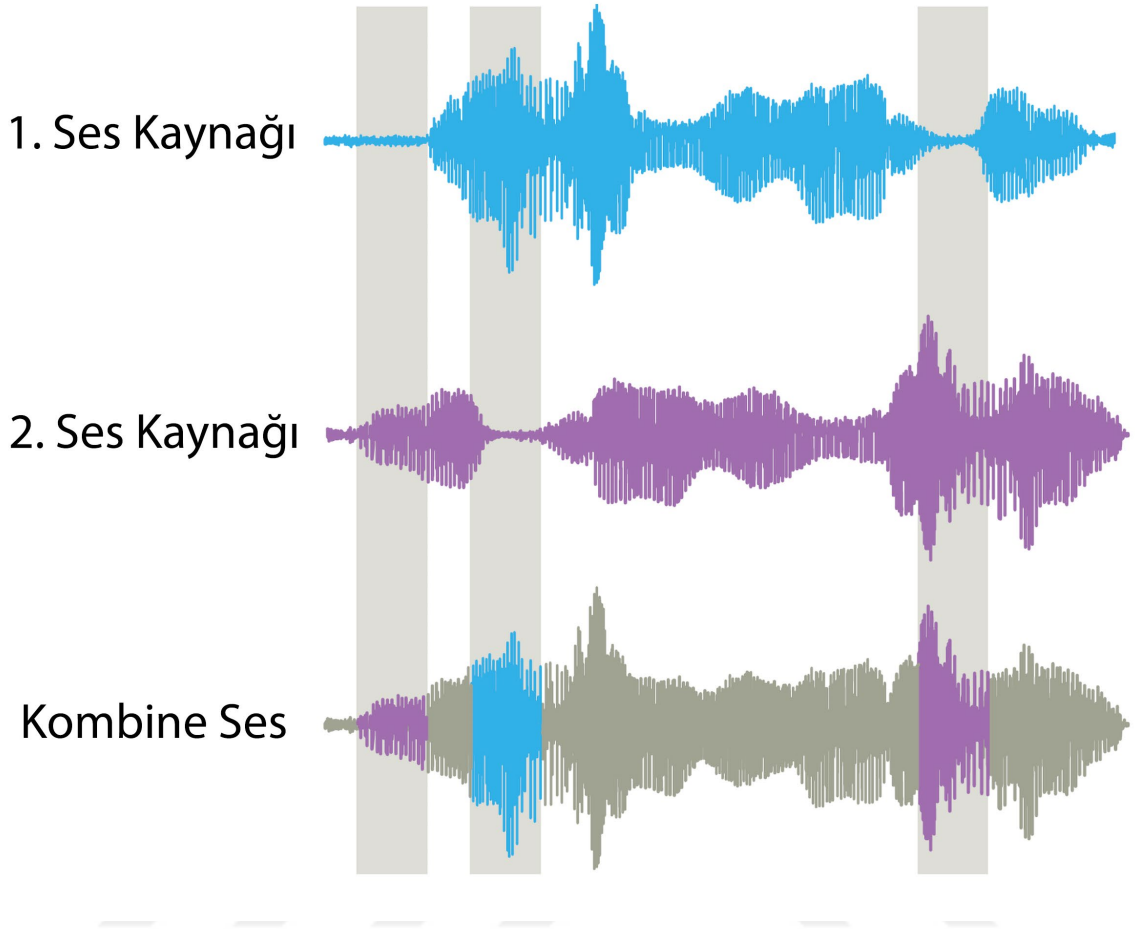
Lateral inhibisyon, işitme sisteminde seslerin daha net algılanmasını sağlamak için kritik bir rol oynar. Bu mekanizma, özellikle işitsel korteks (AC) seviyesinde olmakla birlikte, işitsel nöral yollar boyunca belirli frekansları öne çıkarırken diğerlerini baskılayarak frekans ayırımını keskinleştirir. İnhibitör internöronlar, özellikle parvalbumin-pozitif (PV+) ve somatostatin-pozitif (SST+) nöronlar, bu süreçte önemli bir rol oynar (Studer ve Barkat, 2022).

PV+ internöronlar, hızlı sinyal iletimi sağlayarak ve afferent iletilen işitsel sinyaller sırasında komşu eksitator nöronların aktivitesini baskılayarak, sadece belirli bir frekansa yanıt verilmesini sağlar. Böylelikle frekans seçiciliği artırılır (Aizenberg ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2015). SST+ internöronlar daha geniş bir inhibisyon sağlayarak daha fazla frekansı baskılar. Bu, PV+ nöronların lokal inhibisyonuna ek olarak geniş çaplı bir baskı mekanizması sunar (Kato ve diğ., 2015; Profant ve diğ., 2020). Bu iki nöral grup, birlikte çalışarak işitsel sistemdeki hassasiyetin ve doğruluğun korunmasına yardımcı olur.

Lateral inhibisyon, uyarılmış (Meşgul) nöronların boşta olan nöronları baskılaması olarak özetlenebilir. Lateral inhibisyonun uyumsuzluk negatifliği (Mismatch-Negativity – MMN) gibi işitsel olay-ilişkili potansiyellerde önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir (Gu ve diğ., 2018). Lateral inhibisyon, tinnitus patofizyolojisinde de önemli bir rol oynar. Eggermont (2003), tinnitusta işitsel kortekste bozulan lateral inhibisyonun, belirli frekansların aşırı temsiline ve nöral hiperaktiviteye yol açabileceğini öne sürmüştür. Normalde lateral inhibisyon, gereksiz frekansları baskılayarak bu hiperaktiviteyi önlerken, tinnitusta bu mekanizma zayıflar ve sürekli olarak bir ses algısına yol açabilir.

2.4.2. Spektral ve Temporal Ayıklama

Spektral ve temporal ayıklama (glimpsing), işitme sisteminin gürültü içinde hedef sesleri yakalama becerisini iki farklı açıdan ele alır (Bonferroni, 1936; Buss ve diğ., 2009; Cooke, 2006). Temporal ayıklama, arka plan gürültüsünün zarfında oluşan kısa süreli boşluklarda hedef sinyallerin zamansal ipuçlarını yakalamayı ifade eder (Buss ve diğ., 2009; Cooke, 2006; Fogerty ve diğ., 2018). Spektral ayıklama ise arka plan gürültüsünün boşluklarında veya zayıf kaldığı frekans bantlarında hedef sinyalin frekans bilgilerinin işitme sistemi tarafından algılanmasını ifade eder (Steinmetzger ve Rosen, 2023). Fenomenin orijinal adında geçen "glimpsing", Türkçe'ye "bakış" olarak çevrilmekte olup, fenomenin tam karşılığını verememektedir. Bu nedenle "bakış" ifadesi yerine, çalışmamızda bu beceriyi daha iyi açıklamak için "ayıklama" terimi tercih edilmiştir. Literatürde bu iki fenomen sıklıkla bir arada değerlendirilerek spektro-temporal ayıklama olarak adlandırılmakta ve ayrıca, dip dinleme (dip-listening) ve konuşma ayıklama (speech glimpsing) gibi kavramlarla aynı süreci ifade etmektedir (Buus, 1985; Fogerty ve diğ., 2018; Fogerty ve diğ., 2020). Çalışmamızda spektral ve temporal ayıklamanın ayrı ayrı etkileri gözlemlendiği için, bu kavramlar spektral ve temporal özelliklerine göre ayrılarak ele alınmıştır. Bu kavramlar ayrıca işitsel sahne analizine de katkı sağlar. Özellikle, uzaysal olarak ayrılan uyarı-gürültü kombinasyonlarında, uyarana daha yakın olan kulaktan gelen bilgi ("better-ear glimpsing") devreye girer. Böylece spektro-temporal ayıklama, binaural ipuçları sayesinde daha etkili bir şekilde gerçekleşir. Bu süreç, Şekil 2.19'da görselleştirilmiştir.



Şekil 2.19: Spektral ve temporal ipuçlarının ayıklanması (glimpsing)

2.4.3. Stokastik Rezonans

Stokastik Rezonans (SR), bir sisteme optimum düzeyde rastgele gürültü eklenmesinin zayıf sinyallerin algılanmasını veya iletilmesini artırdığı bir fenomendir (McDonnell ve Abbott, 2009). İlk olarak Benzi ve diğ. (1981) tarafından iklim sistemleri bağlamında tanımlanan SR, o zamandan beri işitme gibi duyuşal işleme mekanizmaları da dahil olmak üzere çeşitli biyolojik sistemlerde geniş çapta araştırılmıştır (Ehrenberger ve diğ., 1999; Krauss ve diğ., 2016; Moss ve diğ., 2004; Noda ve Takahashi, 2023; Sanayi ve diğ., 2021). İşitme sisteminde SR, nöral bağlantılarda bulunan doğal gürültüyü modüle ederek sinyal iletimini artırabilir ve böylece işitsel uyaranların algılanmasını iyileştirebilir (Noda ve Takahashi, 2023; Veronesi ve Milotti, 2022).

İşitme sisteminde SR, işitsel sinyal iletiminin doğrusal olmayan dinamikleri sayesinde zayıf sinyallerin algılanmasını iyileştirir. Koklea, doğal bir içsel gürültüye sahiptir. Ehrenberger ve arkadaşları (1999), iç kulak sıvılarının brown hareketi ile doğal bir içsel gürültüye sahip

olduğunu göstermiştir. Bu minimal gürültünün de işitsel uyaranların fark edilebilirliğini artırdığını önermiştir.

SR'nin santral işitsel yollarda da etkileri bulunmaktadır. Manyetoensefalografi (MEG) ile yapılan çalışmalar, beyaz gürültünün eklenmesiyle zayıf amplitüd modülasyonlu saf seslerin işitsel kararlı durum yanıtlarında (Auditory Steady-State Response - ASSR) faz tutarlılığını artırdığını göstermiştir. Bu bulgular, SR'nin sadece kokleada değil, daha üst işitsel merkezler de de gerçekleşebileceğine işaret etmektedir (Tanaka ve diğ., 2010).

Stokastik rezonans, özellikle sinyal-gürültü oranının düşük olduğu ortamlarda, işitsel sistemde bilgi aktarımının optimize edilmesinde önemli bir rol oynar (Krauss ve diğ., 2017; Krauss ve diğ., 2018; Mitaim ve Kosko, 2004; Shukla ve Bidelman, 2021). Bu mekanizma, zayıf sinyalleri güçlendirmek için gürültüden yararlanarak zorlu dinleme koşullarında işitsel hassasiyetin artırılmasını sağlar (Ward ve diğ., 2006). Ayrıca SR, tinnitus ve Zwicker sesi gibi adaptif işitsel fenomenlerle de ilişkilendirilmektedir. Örneğin, işitme kaybıyla azalmış işitsel girdiye karşılık olarak artan içsel gürültü, DKN'deki nöronal hiperaktiviteyi tetikleyebilir ve bu durum tinnitus olarak algılanabilir (Krauss ve diğ., 2016; Tang ve Trussell, 2015). Benzer şekilde çentikli bir gürültü sunumu sonrası dinleyici gürültü içinde olmayan çentikli gürültü merkez frekansında bir saf ses (Zwicker Sesi) duyar (Hullfish ve diğ., 2019; Noreña ve Eggermont, 2003; Veronesi ve Milotti, 2022). Bu fenomen de SR ile ilişkilendirilmiştir.

SR'nin işitsel işleme üzerindeki etkileri önemlidir. Araştırmalar, SR mekanizmalarının anlaşılmasının, kontrollü gürültü ekleme yoluyla işitsel sinyallerin kodlanmasını iyileştirerek amplifikasyon yöntemlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunabileceğini önermektedir (Chapeau-Blondeau ve Rousseau, 2002; Kawaguchi ve diğ., 2011; Lugo ve diğ., 2008). Tinnitus gibi işitsel bozukluklar bağlamında, SR'nin modüle edilmesi, işitsel yollardaki nöral gürültü dinamiklerini değiştirerek semptomları hafifletmek için terapötik yollar da sunabilir (Gao ve diğ., 2016).

2.5. PSİKOAKUSTİK SÜREÇLER

2.5.1. Psikoakustik Araştırmaların Tarihçesi

Akustik uyaranlar ve işitsel algı arasındaki ilişkiyi araştıran psikoakustik disiplini, fizik ve psikolojinin kesiştiği zengin bir geçmişe sahiptir. Bu geçmiş sesin doğasına ilişkin ilk felsefi sorgulamalardan başlayarak titiz bir bilimsel disiplin haline gelene kadar birkaç yüzyılı

kapsamaktadır. Psikoakustiği şekillendiren temel tarihsel gelişmelere genel bir bakış sunarak işitsel algının anlaşılmasıyla olan ilgisini şu şekilde özetleyebiliriz.

2.5.1.1. Başlangıç: Antik Çağ ve Rönesans Düşüncesinin Temelleri

Psikoakustiğin ilk kökleri, Pisagor gibi filozofların müzikal uyumun altında yatan matematiksel ilkeleri anlamaya çalıştığı Antik Yunan'a kadar uzanmaktadır. "Psikoakustik" terimi henüz kullanılmıyor olsa da Yunanlılar fiziksel ses özellikleri ile insan algısı arasındaki ilişkileri araştırmakla meşguldü. Aristoteles (MÖ 350 civarı) sesin hava hareketiyle taşındığını öne sürerek önemli katkılarda bulunmuş ve ses iletiminin doğasına ilişkin gelecekteki araştırmalara zemin hazırlamıştır (Yost, 2015).

Rönesans döneminde Leonardo da Vinci ve Galileo Galilei gibi isimler sesin anlaşılmasını daha da ilerletmiştir. Da Vinci, 1500 yılı civarında, sesin dalgalar halinde hareket ettiğini fark etmiştir; bu kavram daha sonra Galileo'nun titreşen nesnelerle yaptığı deneylerle genişletilmiş ve frekans ile perde arasındaki ilişkiye dair görüşlere öncülük etmiştir (Yost, 2015). Bu öncü gözlemler, takip eden yüzyıllarda daha sistematik çalışmalara zemin hazırlamıştır.

2.5.1.2. 19. Yüzyıl: Psikoakustiğin Bilimsel Bir Disiplin Olarak Ortaya Çıkışı

19. yüzyıl, özellikle Hermann von Helmholtz'un katkılarıyla psikoakustik tarihinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. Helmholtz (1877) tarafından kaleme alınan çığır açıcı çalışma "On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music", işitsel algıda yer alan fizyolojik ve psikolojik süreçleri anlamak için kapsamlı bir altyapı oluşturmuştur. Helmholtz'un iç kulağın perde algısını üretmek için frekansları nasıl analiz ettiğini açıklayan rezonans teorisi, psikoakustik teorisinin temel taşlarından biri haline gelmiştir (Helmholtz, 1877).

Bu dönemin bir diğer önemli şahsiyeti, psikoakustiğin içinde yer aldığı daha geniş bir disiplin olan psikofizik alanının kurucusu olarak anılan Gustav Fechner'dir. Fechner'in çalışmaları, özellikle de 1860 tarihli *Elemente der Psychophysik* adlı yayını, fiziksel uyaranlar ile algısal deneyimler arasındaki ilişkiyi ölçmek için yöntemler sunmuş ve böylece işitsel algı çalışmalarını resmileştirmiştir (Burt, 1960).

2.5.1.3. 20. Yüzyıl: Teknoloji ve Teorideki Gelişmeler

20. yüzyıl psikoakustiğin hem teorik anlayışında hem de teknolojik imkanlarında hızlı ilerlemelere sahne olmuştur. Bell Laboratuvarları'nda Harvey Fletcher gibi araştırmacılar, kritik

bant ve eş gürlük konturları da dahil olmak üzere modern psikoakustiğin temel kavramlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Fletcher ve Munson, 1933). Bu kavramlar özellikle işitme sisteminin karmaşık sesleri zaman içinde nasıl işlediğinin incelenmesiyle ilgilidir.

Bu dönemdeki bir diğer önemli gelişme de 1950'lerde David Green ve John Swets tarafından ortaya atılan Sinyal Tespit Teorisi (STT) olmuştur. STT, birçok psikoakustik deneyin merkezinde yer alan bir kavram olarak, dinleyicilerin gürültünün içindeki işitsel uyaranları nasıl algıladıklarını anlamak için bir altyapı sağlamıştır (Green ve Swets, 1966). Licklider'in perde algısı ve binaural işitme üzerine çalışmaları, işitsel sistemin zamansal bilgiyi nasıl işlediğinin anlaşılmasına katkıda bulunarak işitsel sahne analizi ve psikoakustik alanındaki çağdaş çalışmalara öncülük etmiştir (Licklider, 1951).

2.5.1.4. Çağdaş Psikoakustik: Karmaşık Seslere ve Zamansal İşlemeye Odaklanma

Psikoakustik, 20. yüzyılın ikinci yarısında ve 21. yüzyılda karmaşık seslerin algılanmasına ve işitsel işlemlenin zamansal yönlerine giderek daha fazla odaklanmıştır. Bregman tarafından 1990 yılında ortaya atılan işitsel sahne analizi kavramı, işitsel sistemin dinamik bir ortamda farklı kaynaklardan gelen sesleri nasıl ayrıştırdığını ve bütünleştirdiğini vurgulayarak psikoakustikte oldukça önemli bir tema haline gelmiştir (Bregman, 1990).

Zamansal işlemeyi anlamaya yönelik bu değişim, psikoakustik alanında devam eden araştırmalarla doğrudan ilgilidir. Viemeister'in zamansal modülasyon transfer fonksiyonu (TMTF) üzerine yaptığı çalışma, işitsel sistemin zamansal bilgiyi nasıl kodladığına dair anlayışımızı derinleştiren ve bugün hala canlı bir araştırma alanı olan araştırma türüne örnek teşkil etmektedir (Viemeister ve Plack, 1993).

2.6. PSİKOAKUSTİKLE İLİŞKİLİ TEMEL KAVRAMLAR

2.6.1. Kritik Bant

Fletcher (1940) tarafından ortaya atılan kritik bant kavramı, işitsel algıda hem maskeleme hem de ses gürlüğünün anlaşılmasında temel bir öneme sahiptir. Fletcher'ın deneyleri, sinüzoidal bir sinyalin tespit edilme eşiğinin, maskeleme gürültüsünün bant genişliği ile birlikte arttığını, ancak belirli bir noktadan sonra bu eşiğin stabilize olduğunu göstermiştir. Bu noktada stabil hale gelen bant genişliği, frekans bileşenlerinin güçlü bir şekilde etkileşime girdiği ve maskelemeye katkıda bulunduğu aralık olarak tanımlanmış ve "kritik bant" olarak adlandırılmıştır. Maskeleme, özellikle maskeleyici ve sinyalin frekanslarının yakın olduğu

durumlarda en etkili şekilde gerçekleşir. (Wegel ve Lane, 1924) ile Fletcher (1940) çalışmaları ile bunu doğrulamıştır. Ek olarak Fletcher (1940), işitsel sistemi farklı frekanslar etrafında merkezlenen, örtüşen bant geçiren filtrelerden oluşan bir model olarak ele almış ve bu filtrelerin bant genişliğini "kritik bant" olarak tanımlamıştır (Şekil 2.20). Her ne kadar Fletcher bu filtreleri başlangıçta dikdörtgen şekillerle basitleştirmiş olsa da önerdiği model çeşitli psikoakustik fenomenleri doğru bir şekilde açıklamayı başarmıştır (Ben ve diğ., 2011; Lyon, 2017).

Ses gürlüğü açısından da kritik bant önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar, toplam enerji sabit tutularak dar bir gürültü bandı genişletildiğinde, bant genişliği kritik bandı aşana kadar algılanan ses gürlüğü'nün sabit kaldığını ve bu eşiğin ötesinde ses gürlüğü'nün arttığını göstermiştir. Bu, "ses gürlüğü için kritik bant genişliği" olarak adlandırılmıştır ve maskeleme ile belirlenen kritik bant genişliğinden farklıdır. Bu durum, işitsel filtrelemenin çok yönlü doğasını ortaya koymaktadır (Lyon, 2017).

2.6.2. İşitsel Filtreler

Fletcher (1940) tarafından ortaya atılan işitsel filtre teorisinden sonra yapılan çalışmalar, kokleanın çalışma mekanizmasını bir işitsel filtre bankası olarak tanımlamış ve bu model, birçok işitsel fenomeni başarılı bir şekilde açıklamıştır. İşitsel sistem, frekanslara duyarlı bir dizi örtüşen filtre aracılığıyla çalışır ve bu filtreler, maskeleme gibi psikoakustik fenomenlerin anlaşılmasında kritik bir rol oynar.

Geliştirilen modeller arasında gammatone filtreler öne çıkar. Bu filtreler, kokleanın farklı frekanslara verdiği tepkileri modellemek için kullanılır ve işitsel sistemin frekans seçiciliğini anlamada önemli bir araçtır (Ben ve diğ., 2011; Lyon, 2017).

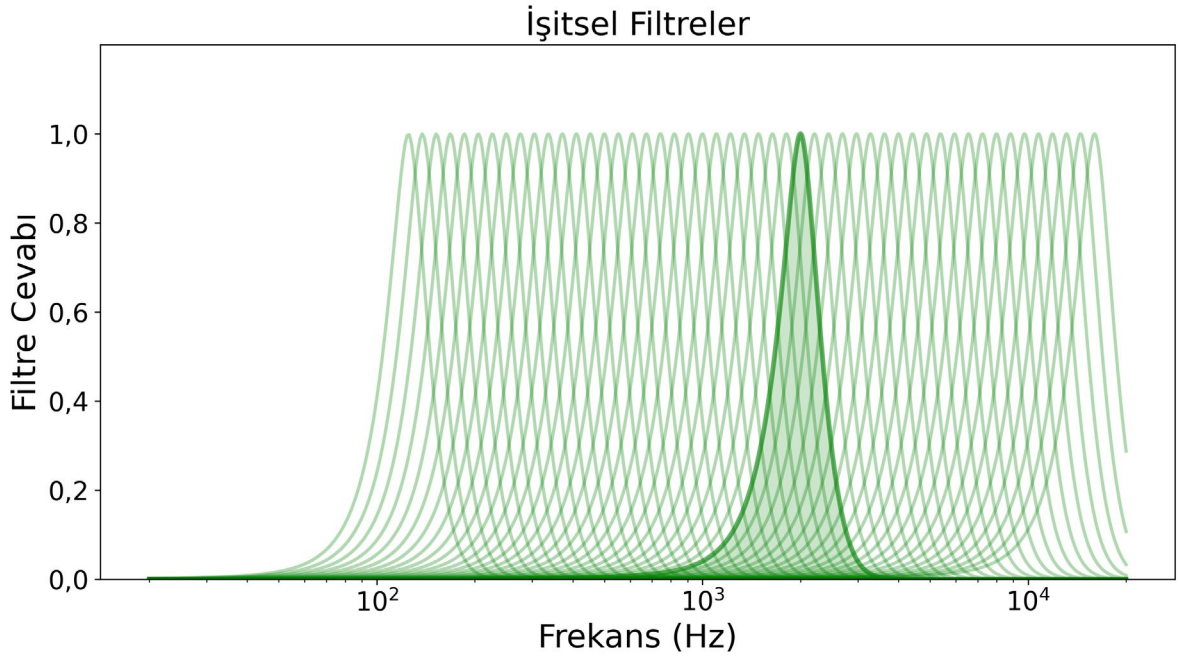
Bunun yanı sıra, işitsel filtrelerin daha karmaşık bir şekilde modellenmesi için en sık roex (yuvarlamalı üstel - rounded exponential) filtreler geliştirilmiştir. Roex modeli, işitsel filtrelerin frekans seçiciliğini ve maskeleme etkilerini daha hassas bir şekilde açıklayabilmek amacıyla kullanılır. Oxenham ve Shera (2003) tarafından yapılan çalışmada, roex modelinin çeşitli versiyonları kullanılarak işitsel filtrelerin şekilleri daha detaylı bir şekilde modellenmiştir.

Roex modeli için kullanılan temel denklem şu şekildedir (2.1):

$$W(g) = (1 - w)(1 + pg)e^{-pg} + w(1 + pg/t)e^{-pg/t} \quad (2.1)$$

Bu denklemde:

- $W(g)$, filtre ağırlık fonksiyonunu,
- g , merkez frekansına göre sapmayı,
- p , filtrenin eğimini,
- w , ikinci eğimin göreceli ağırlığını,
- t ise ikinci eğimin, birinci eğime göre ne kadar sığ olduğunu belirler.



Şekil 2.20: Roex modeline göre sıralanmış işitsel filtre bankası.

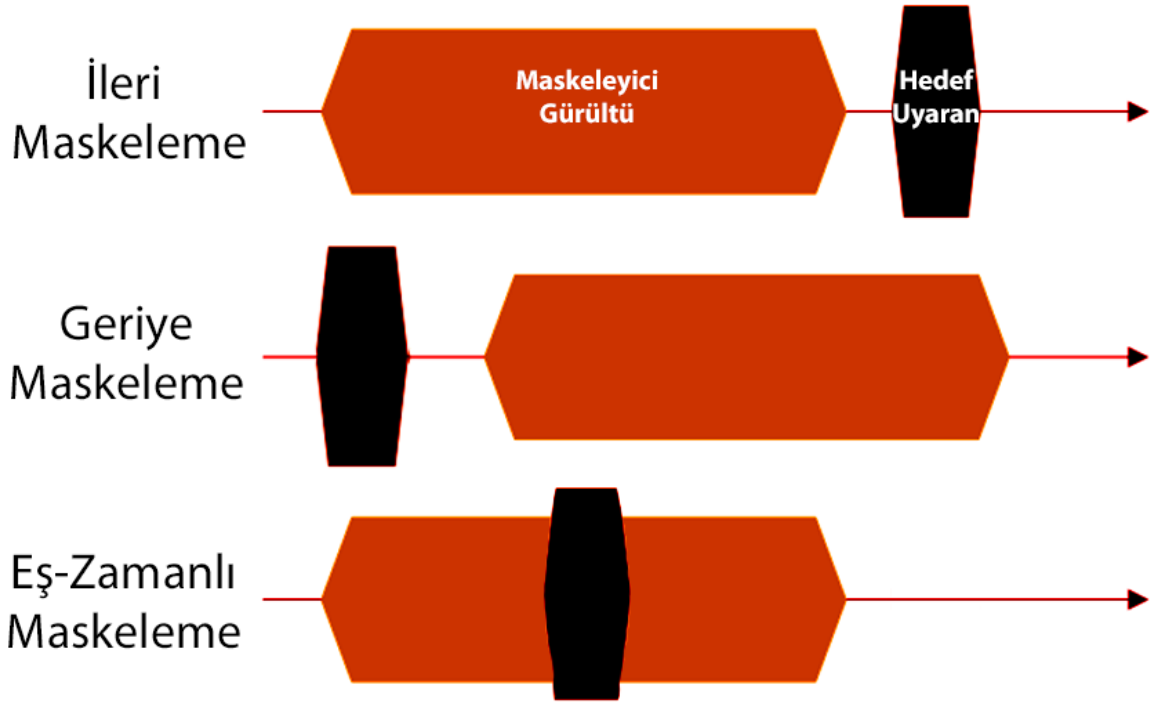
Oxenham ve Shera (2003) çalışmasında, bu roex modelini kullanarak işitsel filtrelerin frekans seçiciliği daha ayrıntılı bir şekilde incelemiş ve çalışmada filtrelerin genişliği ve keskinliği gibi parametreler hesaplanmıştır. Bu model, kokleanın frekans seçiciliğini anlamada ve işitsel filtrelerin asimetrik yapılarını ortaya koymada önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.20’de de görüldüğü üzere işitsel filtrelerin hassasiyetleri merkez frekanslarından uzaklaştıkça azalmaktadır.

2.6.3. Maskeleme ve Maskeleme Türleri

Eş zamanlı maskeleme, bir sesin (hedef) aynı anda sunulan başka bir ses (maskeleyici) tarafından duyulmasının engellenmesi durumudur (Lass ve Donai, 2023). Bu, maskeleyici sesin varlığı nedeniyle hedef sesin duyulma eşiğinin yükselmesi anlamına gelir. Eş zamanlı maskeleme genellikle maskeleyici ve hedef seslerin frekanslarının birbirine yakın olduğu durumlarda en etkili olur (Calandruccio ve diğ., 2019). Bu durum, işitsel sistemin aynı anda birden fazla sesi ayırt etme kapasitesini sınırlar ve özellikle yoğun gürültülü ortamlarda belirgin hale gelir (Lass ve Donai, 2023).

Temporal maskeleme ise, maskeleyici ve hedef seslerin ardışık olarak sunulması durumunda ortaya çıkar ve iki türü vardır: ileri maskeleme ve geriye maskeleme (Lass ve Donai, 2023). İleri maskeleme, maskeleyici sesin hedef sestten önce sunulduğu ve hedef sesin algılanabilirliğini azalttığı durumdur. İleri maskeleme, daha çok koklea düzeyinde gerçekleşen süreçlerle ilişkilidir, baziler membranın hareketlerine dayalı olarak meydana gelir ve maskeleyici sesin baziler membran üzerinde oluşturduğu titreşimler hemen ardından gelen hedef sesin algılanmasını zorlaştırır (Hodge ve diğ., 2018; Li ve diğ., 2021). İleri maskeleme temporal çözünürlükle de ilişkilidir. Temporal çözünürlük düşükse hedef ses maskeden uzak olsa bile maskelenir, tam tersine temporal çözünürlük yüksekse maske hedef uyarana çok yakın olsa bile maske etkisine sahip olur (Jennings ve Chen, 2020; Leite Filho ve diğ., 2023; Sanayi ve diğ., 2021).

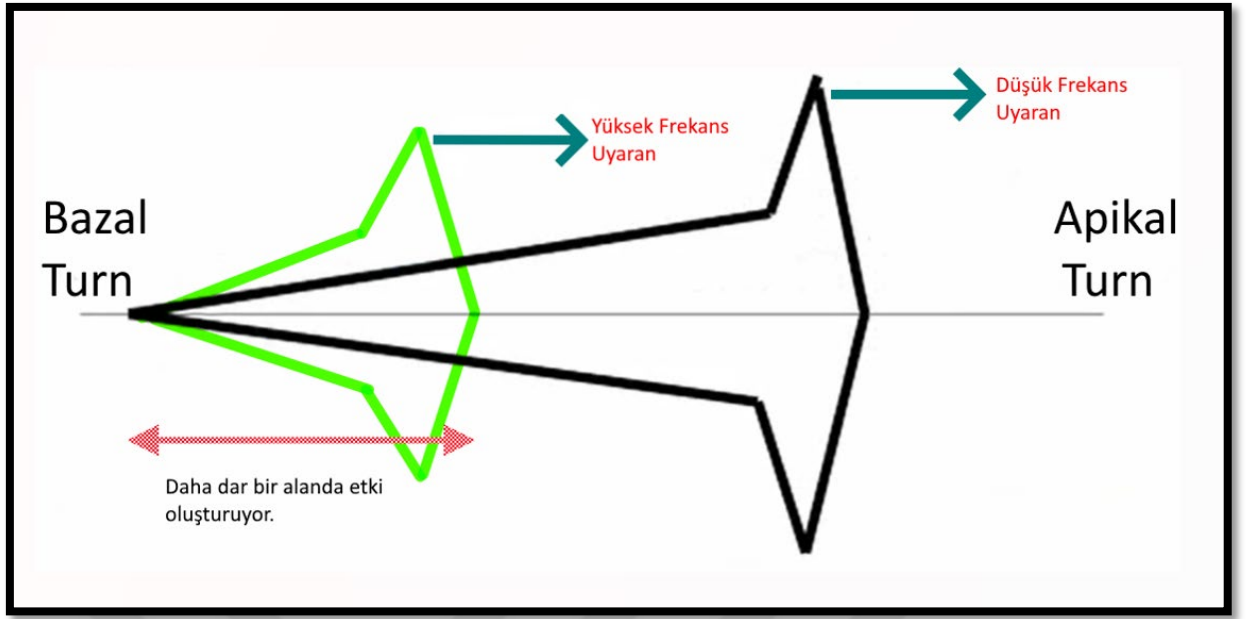
Geriye maskeleme ise, hedef sesin maskeleyici sestten önce sunulması durumunda ortaya çıkar ve yine hedef sesin algılanmasını zorlaştırır (Lass ve Donai, 2023; Leite Filho ve diğ., 2023; Mattingly ve diğ., 2018). Geriye maskeleme, daha çok santral işitsel süreçlerle ilişkilidir ve nöral işitsel yollarda hedef sesin tam olarak işlenmeden maskeleyici ses tarafından baskılanmasına neden olur (Leite Filho ve diğ., 2023; Mattingly ve diğ., 2018). Santral süreçler tarafından kontrol edilen daha karmaşık zamanlama mekanizmalarını yansıtır ve genellikle ileri maskelemeden daha zayıf bir etki gösterir (Lass ve Donai, 2023). Maskeleme türleri Şekil 2.21’de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.21: Farklı maskeleyme yöntemleri

2.6.4. Maskenin Yukarı Yayılımı

Maskelemenin yukarı yayılımı, alçak frekanslı bir maskeleyici sesin, yüksek frekanslı bir hedef sesi maskeleye eğiliminde olduğu bir fenomeni tanımlar (Oxenham ve Plack, 1998; Pickett ve Martin, 1968; Yasin ve Plack, 2005). Bu durum, kokleada baziler membranın fiziksel yapısı ve işleyişi ile ilgilidir. Alçak frekanslı sesler, baziler membranın apikal kısmında maksimum tepe yaparken, bu dalga hareketi kokleanın bazal kısmına doğru yayılır. Bu yayılım, alçak frekanslı bir maskeleyici sesin, yüksek frekanslı hedef sesin algılanmasını engellemesine neden olur. Özellikle yüksek ses seviyelerinde bu etki daha belirgin hale gelir, çünkü alçak frekanslı maskeleyici sesin oluşturduğu dalga, baziler membranın daha geniş bir bölgesini etkileyerek yüksek frekanslı sinyallerin işlenmesini zorlaştırır (Lass ve Donai, 2023). Maskenin yukarı yayılımı fenomeni Şekil 2.22’de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.22: Maskenin yukarı yayılımı.

2.6.5. Sinyal Tespit Teorisi

Sinyal Tespit Teorisi (STT - Signal Detection Theory), bir bireyin gürültü ve sinyal arasındaki ayrımı yapabilme yeteneğini inceleyen bir çerçevedir (Green ve Swets, 1966). Teoriye göre, bir uyarıcıya (sinyal) tepki verildiğinde dört olasılık ortaya çıkar: Doğru (sinyal var ve doğru tespit edilir), Yanlış Alarm (sinyal yok ama yanlışlıkla tespit edildiği düşünülür), Kayıp (sinyal var ama tespit edilemez) ve Doğru Reddetme (sinyal yok ve bu doğru bir şekilde tespit edilir). Bu çerçeve, doğru tespit (hit), yanlış alarm (false alarm), kayıp (miss) ve doğru reddetme (correct rejection) gibi sonuçları değerlendirmek için kullanılır. Şekil 2.23'te görüldüğü gibi, bu olasılıklar, bireyin karar verme sürecinde doğru ya da yanlış bir şekilde sinyali tespit etme durumlarını açıklar. Bu model, psikoakustik süreçlerde hem duyarlılığı (sensitivity) hem de yanlılıkları (bias) ölçmek için yaygın olarak kullanılır (Cerracchio ve diğ., 2023; Green ve Swets, 1966)

Sinyal Durumu

		Sinyal + Gürültü	Sadece Gürültü
<u>Sinyal Var Mı?</u>	"Evet"	Doğru	Yanlış Alarm
	"Hayır"	Kayıp	Doğru Reddetme

Şekil 2.23: Sinyal Tespit Teorisi (Green ve Swets, 1966).

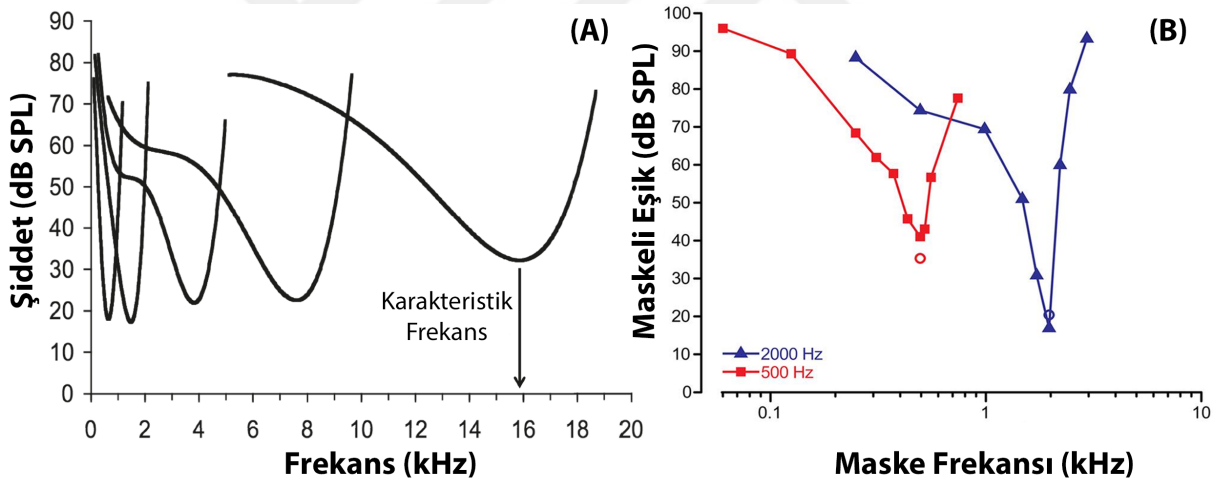
STT’de "muhafazakar" (Conservative) ve "liberal" yanlılıklar, bir bireyin sinyal tespiti sırasında nasıl karar verdiğini açıklar ve bu kararların "doğru reddetme" ve "yanlış alarm" oranlarını nasıl etkilediğini gösterir. Liberal yanlılık durumunda, birey sinyalin mevcut olup olmadığından emin olmasa bile sinyalin var olduğunu varsayar. Bu, doğru tespit ve yanlış alarm oranlarının artmasına yol açar. Muhafazakar yanlılık durumunda ise, birey yalnızca sinyalin gerçekten mevcut olduğuna emin olduğunda "var" demeyi tercih eder, bu da kayıp ve doğru reddetme oranlarının artmasına neden olur. Bu yanlılıklar, bireyin karar kriterini nereye yerleştirdiğiyle ilişkilidir: düşük kriterler daha fazla olumlu yanıt (liberal yanlılık), yüksek kriterler ise daha fazla olumsuz yanıt (muhafazakar yanlılık) ile sonuçlanır. Bu nedenle, sinyal tespit teorisinde bireylerin karar kriterlerini belirleyerek, duyarlılıklarını ve yanlılıklarını ölçmek mümkün hale gelir (Cerracchio ve diğ., 2023).

2.6.6. Spektral Çözünürlük ve İşitsel Ayar Eğrileri

İşitme sisteminin yer kodlama (ateşleme/yer kodlama – rate/place code) ve temporal kodlama (temporal code) ile birlikte uyarın zarfındaki modülasyonlara oluşturulan tepkilerin bir kombinasyonu olarak saf sesleri işlemlediği düşünülmektedir (Plack, 2024). Kokleada farklı konumlardaki sensör hücreler birlikte çalışarak farklı frekanslarda uyarılara tepkiler

üretmektedir. Ancak, bu sürecin tam olarak nasıl işlediği konusunda literatürde henüz tam bir görüş birliği yoktur ve konu halen tartışılmaktadır.

İşitme sisteminin frekans hassasiyeti olarak bilinen spektral çözünürlük, psikoakustik yöntemlerle değerlendirilebilir. Bu yöntemle, kokleada belirli bir frekansta bulunan maskeleyici sinyalin, düşük seviyeli bir uyarının algılanmasını ne kadar zorlaştırdığı ölçülür. Elde edilen maskeleme eşikleri, karakteristik frekanstaki frekans seçiciliği göstermek için grafiğe dökülerek işitsel ayar eğrileri oluşturulur (Bidelman ve diğ., 2015). Benzer bir yaklaşım, hayvan modellerinde de uygulanarak, farklı frekanslardaki uyarılara karşı işitme siniri liflerinin ateşleme eşikleri grafikte ifade edilir (Plack, 2024). Elde edilen ayar eğrileri, işitsel filtrenin o frekanstaki şeklini ortaya koyar (Bidelman ve diğ., 2015; Plack, 2024). Spektral ayar eğrileri üzerine yoğun çalışmalar bulunsa da temporal çözünürlüğe yönelik ayar eğrilerini araştıran bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Şekil 2.24'te sırasıyla hayvan ve insan modellerinden elde edilen ayar eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 2.24: Gerbiller işitme sinir fibrillerinden elde edilen ayar eğrileri (A) ve insanlardan elde edilen psikoakustik ayar eğrileri (B) (Bidelman ve diğ., 2015; Plack, 2024).

2.7. TEMPORAL İŞİTSEL İŞLEMLEMENİN TEMEL SÜREÇLERİ

İşitsel sistemin temporal reaksiyon özellikleri, sinir sistemindeki nöral aktivitenin sesin temporal yönlerinin zamanlamasını nasıl takip ettiğini anlamak için çok önemlidir (Joris ve diğ., 2004). Temporal yönler, sesin dalga formundaki taşıyıcı frekansları ile genlik ve frekans modülasyonlarını yansıtan ses zarfını içerir (Patel ve Balaban, 2004). Temporal işleme iki ana açıdan kategorize edilebilir: temporal entegrasyon ve temporal keskinlik (Wang ve diğ., 2012)

2.7.1. Temporal Entegrasyon

Bu süreç, daha uzun süreli seslerin daha düşük seviyelerde algılanabileceğini gösteren zaman-şiddet dengesini içerir (Obando-Leitón ve diğ., 2023). Temporal entegrasyon yaklaşık 0,2 saniyelik bir zaman sabitine sahip bir alçak geçiren filtreleme işlemi ile tanımlanabilir (Branstetter ve diğ., 2023; Buss ve Dai, 2023). Temporal entegrasyondaki anormallikler temporal işleme bozukluklarıyla bağlantılıdır (Mackey ve diğ., 2021; Simon ve Winkler, 2018). Örneğin, kısa süreli bir saf sesin süresi giderek artırılsa, şiddeti sabit tutulmak kaydıyla, 200 ms'ye kadar uyarının gürlüğü artar ve bu uyarın için işitme eşiği azalır (Branstetter ve diğ., 2023; Buss ve Dai, 2023; Eddins ve Peterson, 1999; Plack ve Skeels, 2007). Bu süreden sonra ise bir değişim gözlenmez.

2.7.2. Temporal Keskinlik (Çözünürlük)

Temporal Keskinlik, ileri-geri maskeleye, aralık tespit etme ve genlik modülasyonu tespit etme gibi fenomenlerle ilgili daha hızlı bir süreçtir (Plack, 2024). Zaman sabiti 2 ms kadar kısa olan ancak 30 ms'ye kadar da çıkabilen yüksek geçiren bir filtreleme işlemi ile modellenir (Eddins ve Green, 1995; Eggermont, 2015b; Plack, 2024). Hem entegrasyon hem de keskinlik, sinaptik girdilerinin senkronizasyonuna bağlı olarak aynı nöral popülasyonlar tarafından gerçekleştirilebilir (Eggermont, 2015b; Plack, 2024). Çeşitli psikoakustik testler ile temporal çözünürlük değerlendirilebilmektedir (Eggermont, 2015b). Çalışmamızda aralık tespit etme görevleri kullanılarak temporal çözünürlük değerlendirilmiştir.

2.7.3. Sesin Temporal Yapısının Doğru Temsili

Nöronların sesin temporal yönlerini takip etme kapasitesi, ANF'lerin içsel özellikleri ile sınırlıdır. Bir aksiyon potansiyelini takip eden refrakterlik, frekans takip yeteneğini 1 kHz'den daha az bir değerle sınırlar (Wever, 1949). Fakat günümüzde faz kilitleme ile ilişkili olan bu fenomenin üst sınırı tartışmalı olup, araştırmacılar, insanlarda monaural faz kilitlemenin üst sınırı için 1500 Hz ile 10.000 Hz arasında değişen farklı limitler bildirmiştir (Verschooten ve diğ., 2019). Bununla birlikte, yayılım prensibi (Volley Principle), birden çok nöronun bir uyarını popülasyon kodu halinde temsil etmesine olanak tanıyarak temporal işleme sayesinde frekans çözünürlüğünü artırır (Joris ve Smith, 2008; Wever ve Bray, 1937). Böylece uyarının her bir döngüsünü birden çok nöron ile temsil edilerek kedilerde 5 kHz'e kadar faz kilitleme (Phase-locking) mümkün olur (Peterson ve Heil, 2019).

2.7.4. Ötüm Başlangıç Süresi (Voicing Onset Time-VOT)

VOT, /ba/ ve /pa/ gibi ötümlü ve ötümsüz durak ünsüzlerinin ayırt edilmesinde, ünsüzün salınımı ile ötüm başlangıcı arasındaki aralığa bağlı olarak çok önemlidir (Fox ve diğ., 2020). Ötümün başlangıcına göre konsonantlar kategorize edilir (Buz ve diğ., 2023; Tamim ve Hamann, 2021). Inferior colliculus ve işitsel korteksteki nöral yanıt örüntüleri VOT hakkında bilgi sağlar (Egorova ve diğ., 2020). Aralık tespit etme becerisi VOT'un algılanmasında büyük önem taşımaktadır (Eggermont, 2015a; Elangovan ve Stuart, 2008; Mori ve diğ., 2015).

2.7.5. Aralık Tespit Etme Becerisi

Öncü psikoakustik çalışmalar, aralık tespit etmenin anlaşılması için temel oluşturmuştur. Lüscher ve Zwislocki (1949) ve Plomp (1964) iki gürültü arasındaki minimum algılanabilir sessiz aralığı araştırarak işitme hassasiyetinin zamanın logaritması ile doğru orantılı olarak azaldığını, 200-300 ms civarında işitme eşiğine ulaştığını ve bu sürenin üzerinde sabit kaldığını ortaya koymuştur.

Kanal içi aralık tespiti, aralığı çevreleyen eşit frekans içeriğine sahip seslerdeki aralığı tespit etmeyi ifade eder. (Penner, 1977), eşik aralık tespit etme süresinin ikinci gürültünün süresinin azaltılmasından önemli ölçüde etkilenmediğini bulmuş, bu da ileri maskeleme ve aralık tespiti arasında yakın bir ilişki olduğunu düşündürmüştür. (Fitzgibbons, 1983; Fitzgibbons, 1984) aralık çözünürlüğünün sinyal seviyesi arttıkça iyileştiğini, geniş bant ve dar bant gürültüler için yaklaşık 3 ms'lik minimum aralık eşiklerine ulaşıldığını göstermiştir (Forrest ve Green, 1987) bu bulguları doğrulamış, geniş bant gürültüde yaklaşık 2 ms'lik tutarlı bir boşluk eşiği olduğunu ve bunun gürültü süresinden, gürültü seviyesi değişiminden veya gürültü içindeki boşluk konumundan etkilenmediğini göstermiştir. (Moore ve diğ., 1993) sinüzoidal sinyallerdeki boşluk eşiklerinin frekansa göre biraz değiştiğini ve çok alçak frekanslarda (100-200 Hz) önemli ölçüde arttığını belirlemiştir. Öncü çalışmalar aralık tespit etme eşiğinin tonal uyarılarda 30 dB SL'e kadar iyileştiğini bu seviyeden sonra sabit kaldığını önermiştir (Fitzgibbons, 1983; Florentine ve Buus, 1984). Eş zamanlı çentikli gürültü sunularak yapılan çalışmalarda alçak frekanslarda aralık tespit etme eşiklerinin yüksek, yüksek frekanslarda aralık tespit etme eşiklerinin düşük olduğu bildirilmiştir (Shailer ve Moore, 1983). Ayrıca aralık tespit etme eşikleri cinsiyete ve uyarının sunulduğu kulağa göre farklılık göstermemektedir (Dias ve diğ., 2012; Sousa ve diğ., 2012).

İlginç bir şekilde, bazı çalışmalar, sol hemisferin akustik uyaranların zamansal yönlerini analiz etmedeki rolü nedeniyle temporal çözünürlük görevlerinde sağ kulak avantajı olacağını öne sürmüştür (Brown ve Nicholls, 1997; Pohl, 1984). Ancak araştırmacılar aralık tespit etme görevlerinde önemli bir kulak farkı bulamamıştır (Dias ve diğ., 2012; Samelli ve Schochat, 2008; Sousa ve diğ., 2012). Bu durum sol hemisferin temporal aralık tespit etme yeteneği üzerine bir avantajı olmadığını göstermektedir.

Kanallar arası aralık tespiti, aralıktan önceki ve sonraki sesler farklı frekans içeriklerine sahip olduğunda aralıkların tespitini ifade eder. Phillips ve diğ. (1997) aralık tespit etme eşiklerinin, aralığı çevreleyen gürültülerin arasındaki spektral farklılık arttıkça yükseldiğini göstermiştir. Farklı algısal kanallar arasında zamansal korelasyon gerektiren aralık tespitinin kanal içi aralık tespitinden temelde farklı olduğu sonucuna varmışlardır. Formby ve diğ. (1998) dikotik sunumun (her kulağa farklı frekanslar sunulması) monaural asimptotik eşiklere benzer boşluk tespit etme eşikleri ürettiğini ve frekanslar arasında boşluk tespit etme için santral bir işleme mekanizmasına işaret ettiğini bildirmiştir. Elektrofizyoloji çalışmaları kanallar arası aralık tespit etmede talamo-kortikal bölgenin önemli olduğuna dikkat çekmiştir (Lister ve diğ., 2007; Weible ve diğ., 2020). Çalışmalar tutarlı bir şekilde, monaural sunumda, kanallar arası aralık tespit etme becerisinin kanal içi aralık tespit etme becerisinden daha zayıf olduğunu bildirmiştir (Formby ve diğ., 1998; Lister ve diğ., 2007; Phillips ve diğ., 1997; Weaver ve diğ., 2020; Weible ve diğ., 2020).

2.7.5.1. Hayvan Modelleri

Kuhl ve Miller (1978), işitsel ve fonetik işleme seviyelerine atfedilebilecek algısal etkileri ayırt etmek için çinçillalarla deneyler yapmıştır. Elde ettikleri bulgular, çinçillaların VOT uyaranları için insan dinleyicilerinkine benzer tanımlama işlevleri sergilediğini ve bunun da türler arasında karşılaştırılabilir fonetik sınırlara işaret ettiğini göstermiştir. Giraudi ve diğ. (1980), çinçillalardaki aralık tespit etme eşiklerinin insanlarda gözlemlenenlerle tutarlı olduğunu bulmuş ve işitsel işlemeyi incelemek için hayvan modellerinin kullanılmasının geçerliliğini güçlendirmiştir.

Hayvanlarda ANF ve beyin sapı tepkileri üzerine yapılan araştırmalar, aralık tespitinin nöral bağıntıları hakkında bilgi sağlamıştır. Sinex ve McDonald (1989), birinci formant bölgesine ayarlanmış ANF'lerin ortalama ateşleme hızlarındaki değişiklikler yoluyla VOT'u doğru bir şekilde kodladığını bulmuştur. Walton ve diğ. (1997) fare inferior kollikulusundaki nöronların davranışsal aralık tespit etme eşiklerine karşılık gelen temporal deşarj paternleri

sergilediğini göstererek aralık tespiti için nöral kodun bu bölgelerde mevcut olduğunu öne sürmüştür.

Steinschneider ve diğ. (1994) maymunların primer işitsel korteksinde hecelerin zamansal kodlamasını incelemiş ve aralık tespitinin işitsel korteks nöronlarının temporal tepki paternlerinde kodlandığını göstermiştir. Eggermont, bu bulguları kedilere genişleterek primer işitsel kortekste aralık tespit etme eşiklerinin nöral temsillerinin insanlardaki psikoakustik gözlemlerle eşleştiğini göstermiştir (Eggermont, 1995; Eggermont, 1999; Eggermont, 2000). Bu çalışmalar, kortikal nöronların seslerin zamansal yönlerini kodlamadaki rolünü ve uyarın seviyesi ile nöron karakteristik frekansının bu yanıtlar üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Fournier ve Hébert (2016), gap-startle paradigmasını kullanarak hayvan modellerinde aralık tespitini incelemişlerdir. Araştırmaları, sessiz bir aralığın startle (irkilme) refleksi inhibe ettiğini ve bu inhibisyonun aralık tespit eşikleri ile ilişkili olduğunu göstermiştir. (Sturm ve diğ., 2017) gürültü maruziyetinin farelerde inferior colliculus düzeyindeki eksitasyon-inhibisyon dengesini bozarak aralık tespit etme becerisini olumsuz etkilediğini bildirmiştir. İlginç bir şekilde, gürültü maruziyeti sonrasında 75 dB SPL düzeyinde aralıklı beyaz gürültü terapisi uygulanarak bu sinaptik reorganizasyon engellenmiş ve farelerin aralık tespit etme becerileri korunmuştur. Saldeitis ve diğ. (2022), gerbillerde işitsel korteksler arası iletişimi bozarak yaptıkları çalışmada, aralık tespitinin bu iletişimden etkilenmediğini bulmuşlardır. Bu, aralık tespitinin, hemisferler arası iletişimden bağımsız olarak işlendiğini göstermektedir.

2.8. TEMPORAL İŞLEMLEMEDE ADAPTASYON MODELİ

Eggermont (2015b) tarafından geliştirilen temporal işlemlenin adaptasyon modeli, işitsel sistemin uyarılara zaman içinde nasıl adapte olduğu ve adaptasyondan nasıl kurtulduğuna dair fikirler sunarak ileri maskeleme ve aralık tespit etme gibi olguları açıklamaktadır.

2.8.1. Koklear Uyarım ve Sinaptik Süreçler

Süreç, baziler membranın titreşimleri ile başlar. Daha sonra bu hareket kokleadaki tüy hücreleri tarafından algılanır (Yates ve Kirk, 1998). DTH'ler mekanik titreşimleri koklear mikrofonic olarak bilinen elektrik sinyallerine dönüştürür ve bu noktaya kadar iletimler deterministiktir (Eggermont, 2019).

Tüy hücresi, presinaptik membranda nörotransmitter salınımını başlatabilen kademeli bir reseptör potansiyeli üretir. Nörotransmitterin presinaptik salınımı olasılıklı bir olgu olduğundan, stokastik olaylar sürece burada girer (Buran ve diğ., 2010). Nörotransmitter salınımı olasılığı uyarının şiddetiyle birlikte artar (Branco ve Staras, 2009). Nörotransmitter sinaptik boşluk boyunca hızla yayılır ve postsinaptik membranın belirli iyonlara karşı geçirgenliğini değiştirir. Bu, zamansal ve uzamsal olarak toplanabilen postsinaptik potansiyellerle sonuçlanır ve sonunda bir eşige ulaşırsa nöral ateşlemeyi tetikler (Augustine, 2018).

2.8.2. Stimülasyon Sırasında Periferik Adaptasyon

İşitsel sistemdeki periferik adaptasyon, reseptör bölgelerinin hızla aktive olduğu ve daha sonra daha yavaş bir şekilde meşgul duruma (kullanıma uygun olmayan uyarıya satüre olmuş durum) geçtiği bir model kullanılarak açıklanmaktadır. Meşgul reseptörler enzimatik bir süreç tarafından belirlenen bir oranda serbest bırakılır. Nörotransmitterler tarafından meşgul edilen reseptör bölgelerinin sayısı uyarının şiddetine bağlıdır. Bu ilişki doğrusal olmayan, hafif satüre edici bir fonksiyon izler (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b; Eggermont, 2019).

Serbest reseptör bölgelerinin aktive edilme oranı serbest bölgelerin sayısı ile orantılıdır ve bunların meşgul edilme oranı üstel bir dağılım izler. Bu, iletim hatlarının olasılıksal bir şekilde meşgul edildiği ve serbest bırakıldığı yerleşik stokastik teoriler kullanılarak modellenmiştir (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b).

Meşgul reseptör bölgelerinin denge dağılımı aktivasyon ve serbest bırakma oranları tarafından belirlenir. Herhangi bir zamanda meşgul olan reseptör bölgelerinin beklenen sayısı hesaplanabilir ve bu da ANF'lerin ateşleme hızını tahmin etmek için bir zemin sağlar. Ateşleme hızı, uyarı başlangıcından sonra üstel olarak azalan meşgul reseptör bölgelerinin sayısı ile orantılıdır. Bu ilişki bir binomial dağılım kullanılarak modellenir ve ateşleme hızının zaman içinde nasıl adapte olduğunu açıklar (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b; Eggermont, 2019).

2.8.3. İleri Maskeleye ve Adaptasyon

Önce gelen bir sesin sonra gelen sese verilen tepkiyi azalttığı ileri maskeleye, adaptasyon ile aynı prensipler kullanılarak açıklanmaktadır. Model, bir maskeleyiciden (önceki ses) sonra, meşgul reseptör bölgelerinin sayısının üstel olarak azaldığını öngörmektedir (Oxenham ve Plack, 2000) Bu toparlanma için zaman sabiti, uyarım sırasındaki adaptasyon

zaman sabitinden daha uzundur. Bu durum adaptasyon ve toparlanma aşamaları arasında gözlemlenen asimetriyi açıklamaktadır (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b; Eggermont, 2019).

Model, maskeleme sesinin şiddetine ve süresine bağlı olarak ateşleme hızındaki değişiklikleri hesaba katmaktadır (Eggermont, 2015b). Kısa süreli maskeleyici sesler daha az adaptasyona neden olurken, uzun süreli maskeleyici sesler önemli ölçüde adaptasyona ve uzun toparlanma sürelerine neden olur. Harris ve Dallos (1979) çinçillalarda adaptasyon süresi sabitinin yaklaşık 15 ms, kobay farelerde, gerbillerde ve kedilerde ise yaklaşık 30-40 ms olduğunu bulmuştur. İnsanlarda ise zaman sabiti 100-200 ms civarındadır (Eggermont, 2019; Eggermont ve Odenthal, 1974)

2.8.4. Sinaptik Depresyon ve Aralık Tespiti

İşitsel kortekste aralık tespitini modellemek için, model hem sinaptik depresyonu hem de hiperpolarizasyon sonrası toparlanmayı (HST) içermektedir (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b). Sinaptik depresyondan toparlanma, periferik adaptasyonda görüldüğü gibi benzer bir üstel azalmayı takip eder. HST, membran potansiyelini ve nöronun ateşleme yeteneğini etkileyerek başka bir kompleksite katmanı ekler (Eggermont, 2015b)

Sinaptik depresyon ve HST'nin birleşik etkileri, işitsel korteks nöronlarında gözlemlenen toparlanma fonksiyonları için kapsamlı bir açıklama sağlamaktadır. Bu model, öncü bir gürültü sonrası işitsel reseptörlerdeki toparlanmanın zamansal seyrini ve işitsel uyarandaki boşluklara verilen psikoakustik tepkiyi başarılı bir şekilde tahmin etmektedir. Temel adaptasyon modeli, ileri maskeleme ve aralık tespit etme de dahil olmak üzere işitsel sistemdeki temporal işlemlemeyi etkili bir şekilde açıklamaktadır (Eggermont, 2015a; Eggermont, 2015b). Modelin tahminleri deneysel gözlemlerle de uyumludur (Eggermont, 2015b)

Günümüzde, klasik psikoakustik çalışmalar yerini daha çok sinirbilim ve psikoakustik modellerin klinik uygulamalarını araştıran çalışmalara bırakmıştır (Yost, 2021). Bu değişim, psikoakustik deneylerin tasarımının ve sonuçlarının yorumlanmasının zorluğu ile bu alandaki klinik çıktılara duyulan ihtiyacın bir sonucudur. Ancak, klasik psikoakustik modellerin geliştirilmesi, işitme ve işitsel algının doğasının tam olarak anlaşılabilmesi için halen hayati öneme sahiptir (Neal ve Zahorik, 2022).

2.9. KLASİK ARALIK TESPİT ETME TESTLERİ

Çalışmamızda, temporal çözünürlüğü değerlendirmek ve haritalamak amacıyla aralık tespit etme görevlerini içeren psikoakustik yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu bölümde, literatürde yer alan klasik aralık tespit etme testlerine değinilecektir. Çalışmamızda kullanılan aralık tespit etme görevleri yöntem bölümünde detaylandırılmıştır.

2.9.1. İşitsel Füzyon Testi

İşitsel Füzyon Testi-Revize (AFT-R), işitsel füzyon yeteneğini değerlendiren monotik bir testtir. Dinleyiciden, 0-300 milisaniye arasında değişen 18 çift tonlu uyaranda bir ya da iki ses duyup duymadığını belirtmesi istenir. Test, 40-60 dB SL arasında bir sunum seviyesi ile uygulanır ve sağ ile sol kulaklara bağımsız olarak da yapılabilir. 3-80 yaş arası bireyler için normlar mevcut olup, yaşın işitsel füzyon eşiği üzerinde etkisi vardır. Özellikle 3-9 yaş arasında güçlü bir maturasyon etkisi gözlenir. AFT-R, frekanslar arasında tutarlılık gösterse de 250 Hz uyarani yüksek eşik değerleri verebilir. Sinyal şiddeti arttıkça işitsel füzyon eşiği iyileşir. Cinsiyetin etkisi bulunmazken, yaş, frekans ve şiddet değişkenlerinin etkisi belirgindir (McCroskey ve Keith, 1996).

2.9.2. Gürültü İçinde Aralık Tespit Etme Testi

Gürültü İçinde Aralık Tespit Etme Testi (Gaps-in-Noise – GIN) testi, işitsel temporal çözünürlüğü monaural olarak değerlendiren bir testtir. Bu testte, 6 saniyelik geniş bantlı gürültü segmentleri kullanılır ve bu segmentler içerisinde 0 ila 3 arasında sessiz aralıklar (gap) bulunur. Bu sessiz aralıklar, test sırasında dinleyiciye sunulur ve dinleyicinin bu aralıkları tespit etmesi beklenir. GIN testi, 35 ila 50 dB SL arasında uygulanır (Musiek ve diğ., 2005; Weihsing ve diğ., 2007). Her bir gürültü segmenti arasında 5 saniyelik bir aralık vardır. Sunulan boşluklar 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 ve 20 milisaniyelik sürelerde olabilir. Her bir boşluk süresi için altı tane deneme yapılır ve test sonucunda iki ölçüm elde edilir: Yaklaşık eşik ve doğru yanıtların yüzdesi. Yaklaşık eşik, dinleyicinin en az altı denemeden dört tanesini doğru tespit ettiği en kısa sessiz aralık süresi olarak tanımlanır. Ortalama olarak GIN testi sonuçları, geleneksel psikofiziksel eşik değerlerinden biraz daha uzundur; sol kulak için 4.8 ms, sağ kulak için ise 4.9 ms olarak bildirilmiştir (Musiek ve diğ., 2005).

2.9.3. Rastgele Aralık Tespit Etme Testi

Rastgele Aralık Tespit Etme Testi (Random Gap Detection Test – RGDT), işitsel temporal çözünürlüğü değerlendiren bir diğer testtir ve genellikle 55 dB HL seviyesinde

binaural veya monaural olarak sunulur. Test sırasında hastalardan bir veya iki saf ses ya da klik sesi duyduklarını belirtmeleri istenir. Bu testte kullanılan saf sesler, 15 ms sürelidir ve 1.5 ms yükselme-alçalma süresine sahiptir. RGDT’de kullanılan aralık süreleri 2 ms ile 40 ms arasında değişmektedir. Normatif değerler 6,0 ms ile 7,8 ms arasında değişmektedir (Musiek ve Chermak, 2015; Sousa ve diğ., 2012). Testin uygulanması yaklaşık 10 dakika sürer (Musiek ve Chermak, 2015).

2.9.4. Adaptif Temporal Çözünürlük Testi

Adaptif temporal çözünürlük testi (Adaptive Tests of Temporal Resolution - ATTR), işitsel işleme bozukluğunun değerlendirilmesinde potansiyel olarak klinik anlamda uygulanabilir bir araç olarak geliştirilmiştir. ATTR, geleneksel psikofiziksel laboratuvar prosedürlerinin adaptif bir versiyonunu kullanarak, aralık tespit etme eşiklerini ölçer. Bu test, geniş bant gürültü uyarıcıları kullanarak boşluk tespitini değerlendirir ve 2-interval, 2-alternatifli zorunlu seçim adaptif prosedürü ile çalışır. ATTR'ın avantajları arasında, özel donanım gerektirmemesi ve herhangi bir masaüstü bilgisayarda çalıştırılabilmesi yer almaktadır. Bu özellikler, ATTR'ı klinik olarak uygulanabilir ve işitme işleme bozukluğu test bataryasının bir parçası olma potansiyeline sahip bir test haline getirmektedir (Lister ve diğ., 2006).

Bu klasik yöntemlere ek olarak, literatürde çeşitli deneysel yöntemler de kullanılmıştır. Bu çalışmalarda eşzamanlı çentikli gürültü içinde aralık tespit etme, bant limitli dar bant gürültüler arasındaki aralıkları tespit etme ve uzun süreli tonal sinyaller içinde aralık tespit etme gibi paradigmlar kullanılmıştır (Phillips ve Hall, 2002; Schneider ve Hamstra, 1999; Shailer ve Moore, 1983). Ancak, ileri maskeleme yöntemi ile çentikli gürültüyü bir araya getirerek aralık tespit etme görevi oluşturan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

2.10. TEMPORAL AYAR EĞRİLERİ

İşitsel ayar eğrileri, işitmenin spektral çözünürlüğü ve tonotopik organizasyonu hakkında bilgi sağlamaktadır. Temporal ayar eğrileri ise ilk kez Schroder ve Cudahy (1983) tarafından tanımlanmış ve spektral ayar eğrilerinden farklı oldukları öne sürülmüştür. Nelson ve Pavlov (1989), ileri maskeleme paradigmasını kullanarak 900-1100 Hz aralığındaki frekans dışı temporal çözünürlüğü ve temporal zaman sabitini (uyaranların ne kadar süre boyunca toplandığını) değerlendiren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılan

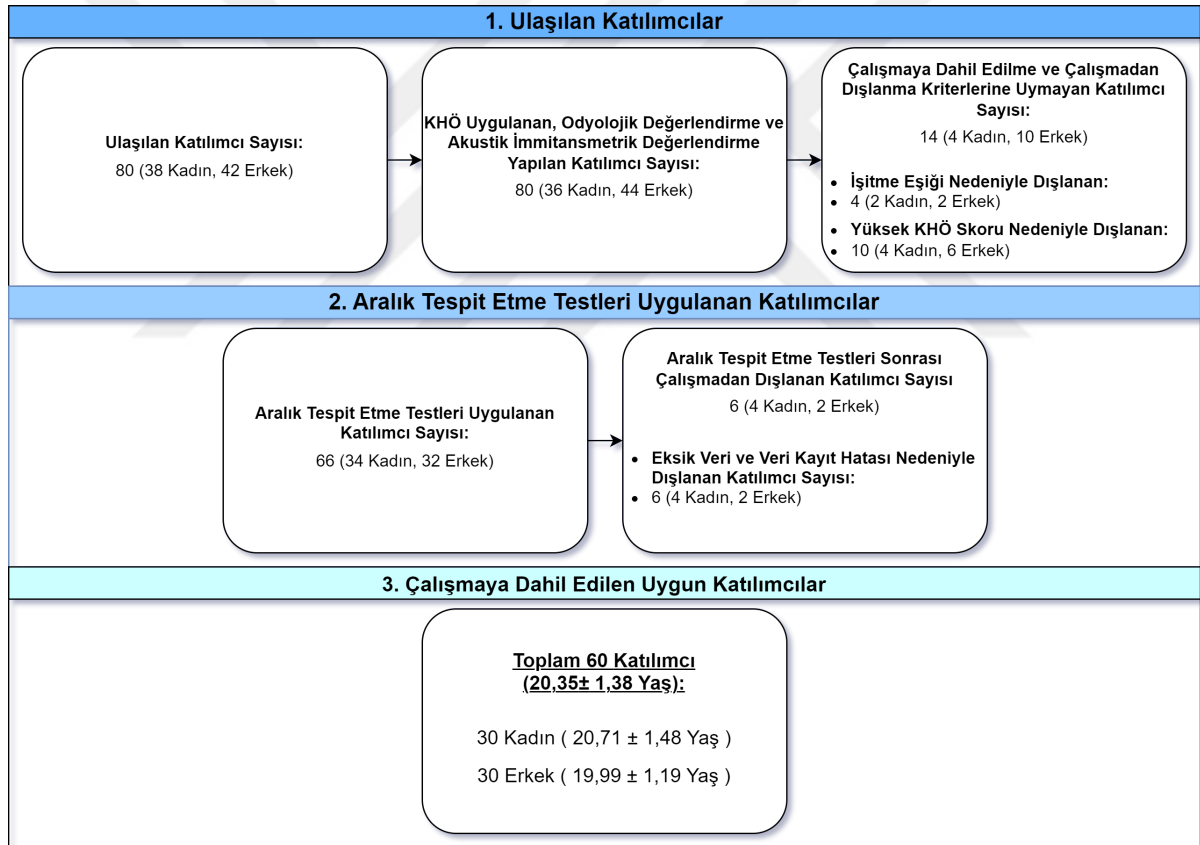
uyaranların kısıtlılığı ve maske gürültüsünün uyaran ile arasındaki mesafenin değiştirilmesi nedeniyle bulgular, temelde sadece ileri maskeleme süresi ilişkili zaman sabiti ve temporal çözünürlüğü değerlendirmiştir. Burada gözlemlenen frekans dışı temporal çözünürlük de esasen maskenin yukarı yayılmasıyla ilgilidir. Ek olarak normal işiten bireylerde temporal işlemlerin zaman penceresinin 8 ms (temporal çözünürlük için) ve temporal zaman sabitinin 150-200 (temporal entegrasyon için) ms kadar olduğunu bildiren çalışmalar literatürde mevcuttur (Eggermont, 2019; Eggermont ve Odenthal, 1974; Moore ve diğ., 1988). Fakat, bu çalışmaların dışında, işitmenin temporal ayar eğrilerini inceleyen bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Güncel çalışmalar, tonotopik organizasyona ek olarak işitsel filtrelerin frekans dışı uyaranların zamansal özelliklerini de çözümleyebildiğini göstermektedir (Henry, 2000; Paraouty ve diğ., 2018; Trinh ve diğ., 2023). Literatür incelendiğinde, aralık tespit etme testlerinin popülerlik kazanmasının ardından, temporal çözünürlüğün klinik yönlerini araştıran çalışmaların arttığı, ancak temporal çözünürlüğün farklı boyutlarını ele alan araştırmaların sayısının azaldığı görülmüştür. Oysa temporal işitsel işlemlerin doğası halen tam olarak anlaşılabilmiş değildir (Cabrera ve Lau, 2022; Cai ve diğ., 2018).

3. YÖNTEM

3.1. ETİK KURUL İZNİ VE GÖNÜLLÜ KATILIM

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından etik açıdan uygun bulunmuştur (tarih: 09.08.2023 sayı: E-83045809-804.01-753272) ve Helsinki Deklarasyonu'na uygun olarak yürütülmüştür. Tüm katılımcılara çalışma detaylı bir şekilde sözlü olarak anlatılmış ve gönüllü olan tüm katılımcılardan imzalı bilgilendirilmiş gönüllü olur onam formları alınmıştır.



Şekil 3.1: Çalışma düzeni ve çalışmaya dahil edilen katılımcılar.

3.2. KATILIMCILAR

Çalışmanın örneklem büyüklüğünü belirlemek amacıyla GPower 3.1.9.7 yazılımı kullanılarak pre-hoc güç analizi gerçekleştirilmiştir. Güç analizi yapılırken Cohen (1988) tarafından önerilen ortalama etki büyüklüğü değerleri esas alınmıştır. Yapılan güç analizinde

çalışmada kullanılacak istatistiksel analizlerin %95 güven aralığı ve 0,8 güç ile gerçekleştirilebilmesi için 30 erkek ve 30 kadın olmak üzere toplam 60 katılımcıya ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Normal otoskopik muayeneye sahip olan, akustik immitansmetrik incelemede bilateral Tip A timpanograma ve ipsilateral-kontralateral akustik refleks cevaplarına sahip olan, bilateral normal sınırlarda işitmeye sahip, ailede işitme kaybı öyküsü olmayan, yüksek seslerden aşırı rahatsızlık yakınması olmayan ve dinleme güçlüğü yakınmaları bulunmayan katılımcılar çalışmaya dahil edilmiştir.

Çalışmaya dahil edilme kriterlerinden herhangi birisine uymayan, teste koopere olamayan, bilinen nörolojik veya psikiyatrik patolojiye sahip olan, hiperakuzisi olan, tinnitusu olan, ototoksik ilaç kullanımı hikayesi olan, daha önce Aralık Tespit Etme ve Gürültüde Aralık Tespit Etme testlerini uygulamış olan, Aralık Tespit Etme ve Gürültüde Aralık Tespit Etme testlerinden herhangi birinden normal dışı sonuç elde edilen katılımcılar çalışmadan dışlanmıştır.

Çalışmamıza veri toplama süreci sonunda 18-24 yaş arası 30 kadın ($20,71 \pm 1,48$ Yaş) ve 30 erkek ($19,99 \pm 1,19$ Yaş) olmak üzere toplamda 60 genç erişkin ($20,35 \pm 1,38$ Yaş) dahil edilmiştir. Çalışma dizaynı ve çalışmadan dışlanan katılımcı bilgileri Şekil 3.1’de verilmiştir. Çalışmada kartopu örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Araştırmacıların çevresinden çalışmaya dahil edilme kriterlerine uyan katılımcılara ulaşılmış ve sonrasında bu katılımcıların çevresine ulaşılarak örneklem genişletilmiştir.

3.3. ODYOLOJİK DEĞERLENDİRME

Otometrics Madsen Astera² (Natus Medical Inc., Middleton, WI, USA) klinik odyometre kullanılarak işitme değerlendirilmesi yapılmıştır. Hava yolu uyarımı için ER-3A insert kulaklık, kemik yolu uyarımı için Radioear B-71 kemik vibratörü kullanılmıştır. İşitme değerlendirmesinde tüm katılımcılara saf ses odyometrisi ve konuşma odyometrisi yapılmıştır. Saf ses ortalamaları, 500, 1000, 2000 ve 4000 Hz’de elde edilen işitme eşiklerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Çalışmaya, hava yolu işitme eşikleri her frekansta 10 dB HL (Hearing Level) ve altında olan, hava-kemik aralığı 10 dB’den fazla olmayan katılımcılar dahil edilmiştir.

3.4. AKUSTİK İMMİTANSMETRİK DEĞERLENDİRME

Orta kulak fonksiyonlarının ve akustik refleksin değerlendirilmesi için GSI TympStar Pro™ (Grason Stadler Inc., Eden Prairie, MN, US) akustik immitansmetri cihazı kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmede, +200 ile -400 daPa basınç aralığında 226 Hz'de 85 dB SPL (Ses Basınç Düzeyi - Sound Pressure Level) şiddetinde uyaran kullanılarak elde edilen timpanogramlar, Jerger (1970) sınıflandırmasına göre incelenmiştir. 95 dB HL (İşitme Seviyesi - Hearing Level) ve üzeri uyaran kullanılarak 500, 1000, 2000 ve 4000 Hz'de ipsilateral ve kontralateral akustik reflekslerin varlığı incelenmiştir. Bilateral tip A timpanograma sahip ve bilateral akustik refleks varlığı olan katılımcılar çalışmaya dahil edilmiştir.

3.5. HİPERAKUZİ DEĞERLENDİRMESİ

Hiperakuzi varlığını değerlendirmek için Khalfa Hiperakuzi Ölçeği (KHÖ) kullanılmıştır. KHÖ, hiperakuziyi incelemek amacıyla Türkçe'ye uyarlanmış ve geçerlik-güvenirliliği sağlanmış bir ölçektir ($\alpha = 0,810$) (Erinc ve Derinsu, 2020; Khalfa ve diğ., 2002). Ölçek, iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde gürültüye maruz kalmayla ilgili 3 soru yer alırken, ikinci bölümde hiperakuzi ile ilgili 14 adet 4'lü Likert tipi soru bulunmaktadır. Puanlama, ikinci kısımdaki sorular üzerinden, her bir soru için minimum 0 (Hayır) ve maksimum 3 puan (Evet, çok fazla) olacak şekilde yapılmaktadır. Test sonunda tüm soruların puanları toplanarak toplam puan elde edilmektedir. Toplam puanın 15'in altında olması hiperakuzi olmadığını gösterirken, 15-28 arası puan hiperakuzi şüphesi, 29 ve üzeri puan ise tam hiperakuzi olarak değerlendirilir (Erinc ve Derinsu, 2020). Bu çalışmada, KHÖ'nün Türkçe versiyonu kullanılmıştır. KHÖ sonucunda toplam skoru 15 ve üzerinde olan katılımcılar çalışmadan dışlanmıştır.

3.6. AUDIO HUB PSİKOAKUSTİK DEĞERLENDİRME MODÜLÜ PROTOTİPİNİN GELİŞTİRİLMESİ

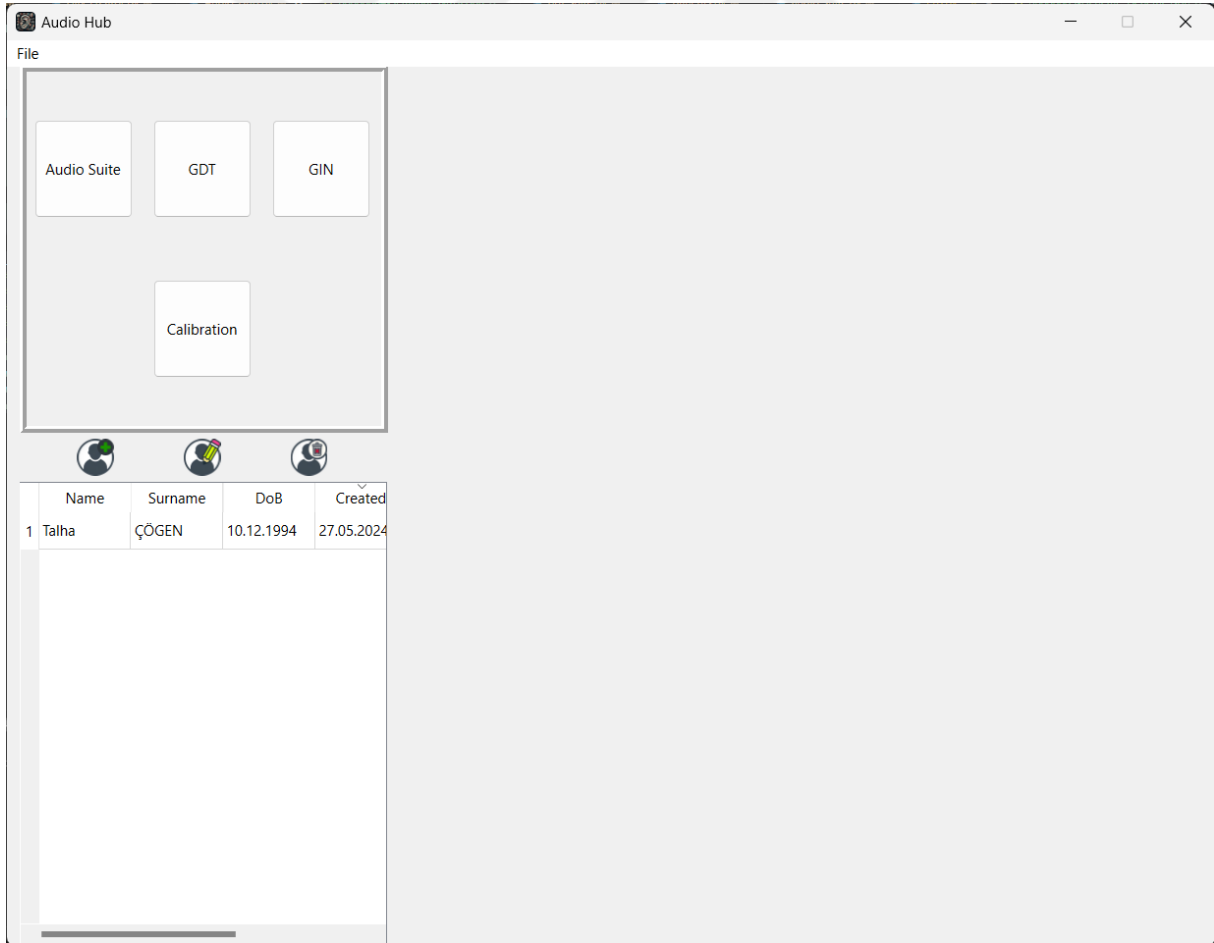
Çalışmada kullanılacak psikoakustik değerlendirmeler literatürde açık erişimli paket program olarak bulunmadığından uyaran üretimi ve deney düzeneğinin uygulanması için araştırmacılar tarafından prototip bir yazılım (Audio Hub) geliştirilmiştir. Gürültüde boşluk tespit etme (Gap in Noise) ve rastgele aralık tespit etme (random gap detection) testlerinin açık erişimli formları bulunmadığından ve bu testlerin psikometrik yöntemleri çalışmamıza uygun olmadığından, bu yazılım kapsamında, gürültüde aralık tespit etme (GATE) ve modifiye aralık

tespit etme (MATE) isimli iki psikoakustik temporal çözünürlük değerlendirme modülü geliştirilmiştir.

Prototip yazılım bu çalışmanın başarıyla tamamlanması için tasarlanmıştır. Çalışma tamamlandıktan sonra klinisyenler tarafından kolayca kullanılabilmesi amacıyla geliştirilmeye devam edilecektir. Prototip aşamasından çıktıktan sonra açık erişimli olarak son kullanıcı kullanımına açılacaktır.

3.6.1. Kullanılan Yazılım Dili ve Kütüphaneler

Audio Hub yazılımı için Python 3.12 yazılım dili kullanılmıştır. Kullanıcı ara yüzü geliştirilmesi için PyQt6 kütüphanesi kullanılmıştır. Uyarın üretimi sürecinde scipy, wave, soundfile ve numpy kütüphaneleri kullanılmıştır. Uyarınların yazılım tarafından kullanılması ve kulaklıklara iletilmesi için pyaudio kütüphanesi kullanılmıştır. Bunlar dışında çeşitli Python standart kütüphaneleri kullanılarak prototip geliştirme süreci tamamlanmıştır.



Şekil 3.2: Audio hub kullanıcı ara yüzü.

3.6.2. Audio Hub Arayüzü

Audio Hub arayüzünün oluşturulmasında PyQt6 kütüphanesi kullanılmıştır. Bu arayüz yeni hasta kaydı oluşturma, kayıtlı hastaları düzenleme, kayıtlı hastaları silme, kayıtlı hastaları listeleme ve farklı kayıtlı hastaları seçerek farklı test modüllerini uygulamaya yarayan çeşitli fonksiyonlar içermektedir. Bu arayüz testlerin uygulanmasını kolaylaştırmak ve her hasta için farklı testlere tek bir merkezden erişimini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu arayüz Şekil 3.2’de görülmektedir.

3.6.3. Hasta Ekleme Arayüzü

The screenshot shows a 'New Patient' window with the following fields and controls:

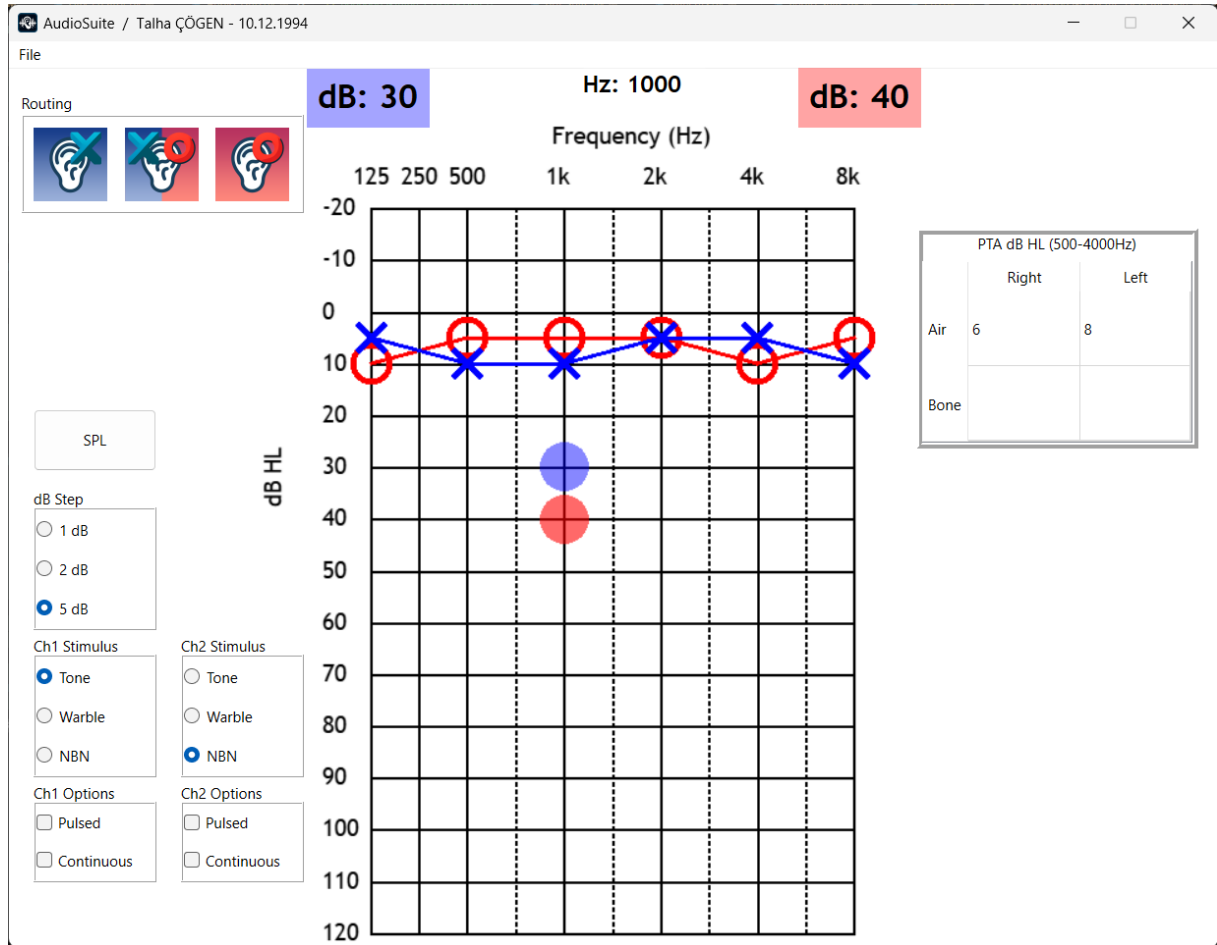
- ID:** A text input field with the placeholder text 'Leave blank for auto-generation'.
- Name:** A text input field with the placeholder text 'Enter Patient Name'.
- Surname:** A text input field with the placeholder text 'Enter Patient Surname'.
- Date of Birth:** A date picker field showing '01.01.2000'.
- Gender:** A dropdown menu showing 'Female'.
- Patient Information:** A large text area for additional patient details.
- Buttons:** 'Cancel' and 'Save' buttons at the bottom.

Şekil 3.3: Yeni hasta kaydı ve kayıtlı hasta düzenleme modülü.

Bu modül kolayca hasta kaydı oluşturmak ve mevcut hastalarla ilgili bilgiler eklemek amacıyla olabildiğince basit ve kullanıcı dostu bir formda gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda hasta adı-soyadı, doğum tarihi, cinsiyeti ve eklenmek istenen diğer bilgilerin sıralanabileceği bölümler bulunmaktadır. Arayüz Şekil 3.3’de görülmektedir.

3.6.4. Saf Ses Odyometri Arayüzü

Bu modül (Audio Suite) hastalara ait odyogram bilgilerinin girişi için tasarlanmıştır. Ayrıca bu modül ile sisteme kalibre edilmiş kulaklıklar (hava yolu ve kemik yolu) kullanılması durumunda saf ses odyometri testi yapılabilir. Eşikler girildikten sonra modül otomatik olarak 500-4000 Hz aralığında hava ve kemik yolu saf ses ortalamalarını hesaplamaktadır. Veriler girildikten sonra ilgili hastaya ait odyogram yine hastaya ait veri tabanına kaydedilebilmektedir. Audio Suite ara yüzü Şekil 3.4’te görülmektedir.

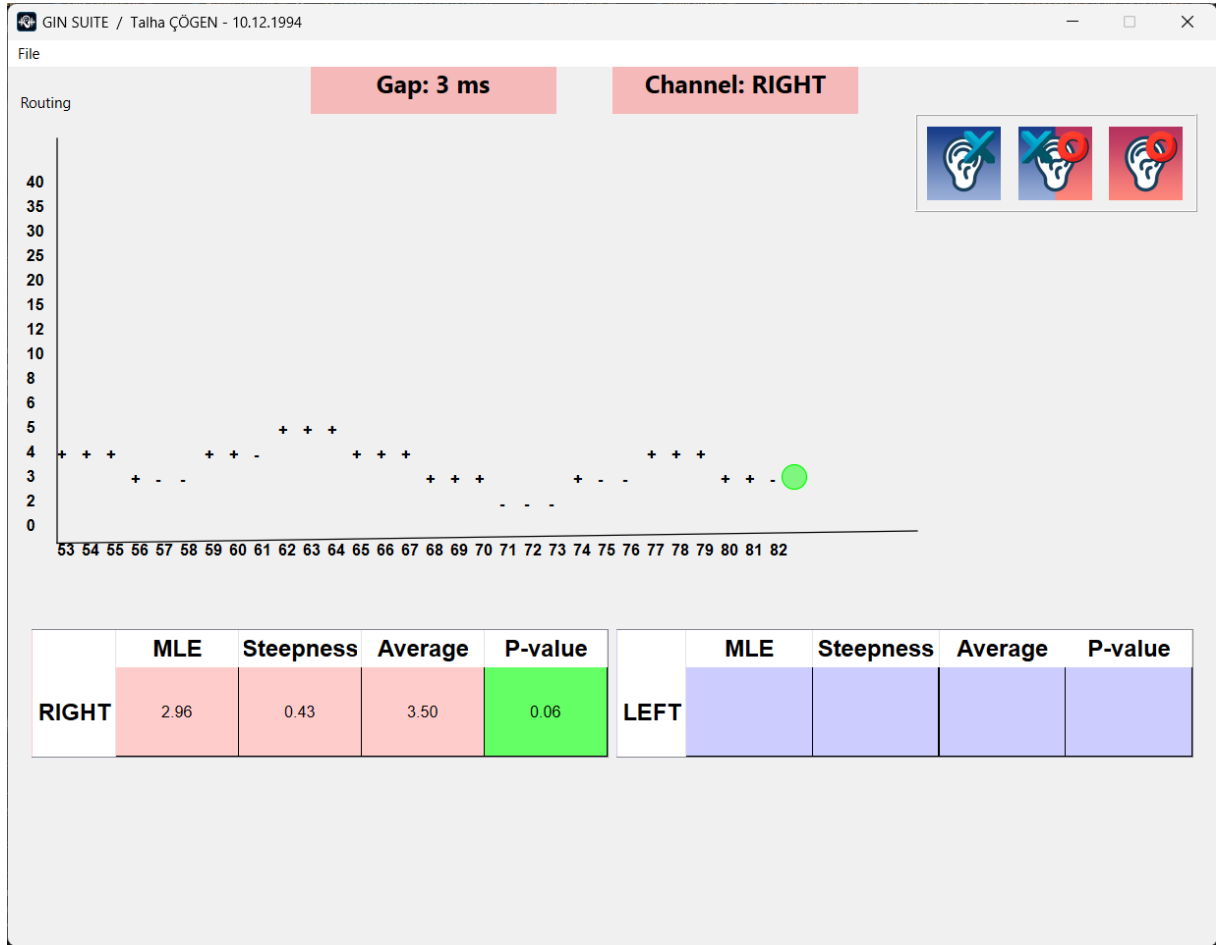


Şekil 3.4: Audio suite modülü kullanıcı ara yüzü.

3.6.5. Gürültüde Aralık Tespit Etme Modülü (GIN Suite) Arayüzü

Bu modül Gürültüde Aralık Tespit Etme testinin uygulanması için tasarlanmıştır. Modül gürültü içine yerleştirilmiş farklı sürelerde boşlukların katılımcı tarafından fark edilme becerisini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu modülde kullanılan uyaranlarla ilgili bilgiler Bölüm 3.7.1’de detaylandırılacaktır. Modül çeşitli adaptif yöntemler ile (3-Down 1-Up, 2-Down 1-Up vb.) psikometrik fonksiyonların belirlenmesini ve gürültüde aralık tespit etme eşiğinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Test sonunda Maksimum Olasılık Tahmini ile eşik

tahmini (Maximum Likelihood Estimation – MLE), adaptif yön deęiřtirmeler ile ortalama eřik tahmini ve mutlak en dūřuk cevap verilen eřik kaydedilmektedir. Çalıřmada 3-Down 1-Up prosedūri kullanılmıřtır. Katılımcılar sunulan uyarın içindeki bořlukları sesli bir řekilde saymıřtır. 3 aralık doęru tanımlanırsa aralık sūresi azaltılmıř ve her bir yanlıřta aralık sūresi 1 basamak artırılmıřtır. 8 dūnūř noktası belirlendikten sonra ilgili kulak için test sonlandırılmıřtır. Gūrūltūde Aralık Tespit Etme Modūlū (GIN Suite) ara yūzū řekil 3.5’te sunulmuřtur.

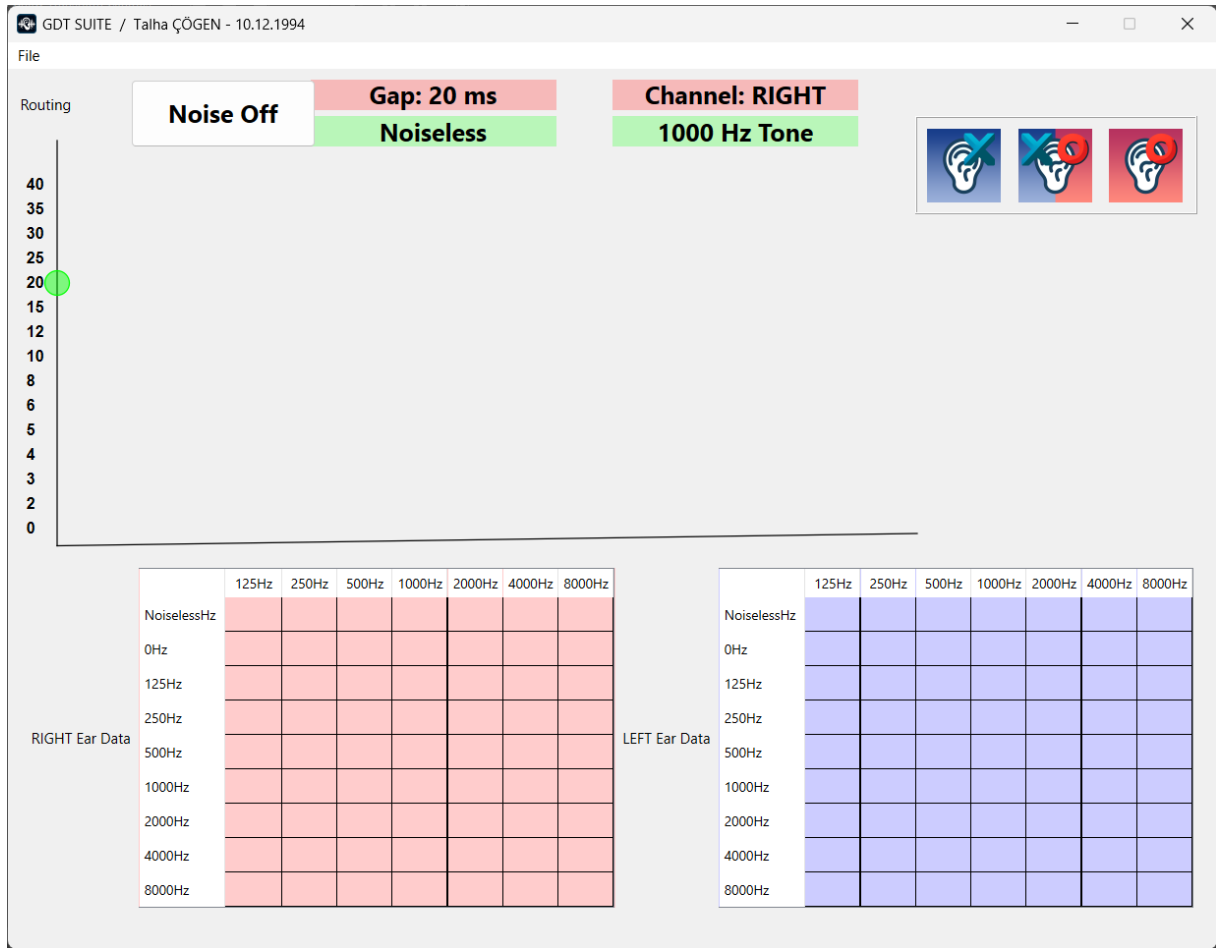


řekil 3.5: Gūrūltūde Aralık Tespit Etme Modūlū (GIN Suite) kullanıcı ara yūzū.

3.6.6. Modifiye Aralık Tespit Etme (GDT Suite) Arayūzū

Bu modūl Modifiye Edilmiř Aralık Tespit Etme testinin uygulanması için tasarlanmıřtır. Modūl sessizlikte saf sesler arasına yerleřtirilmiř aralıkların tespiti ve ileri maskeleme yöntemi uygulanarak gūrūltū sonrası sunulan saf sesler arasına yerleřtirilmiř aralıkların tespitini deęerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Modūl beyaz gūrūltū, 125-8000 Hz aralıęında uyarınlar ve yine aynı aralıkta çentikli gūrūltūler içermektedir. Uygulama içerisinde kullanılan uyarınların  zellikleri Bölüm 3.7.2’de detaylandırılmıřtır. Modül çeřitli adaptif yöntemler ile (3-Down 1-Up, 2-Down 1-Up vb.) psikometrik fonksiyonların

belirlenmesini ve tonal aralık tespit etme eşiğinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Test sonunda ilgili uyaran, gürültü ve kulak kombinasyonu için Maksimum Olasılık Tahmini ile eşik tahmini (Maximum Likelihood Estimation – MLE), adaptif yön değiştirmeler ile ortalama eşik tahmini ve mutlak en düşük cevap verilen eşik kaydedilmektedir. Çalışmada 3-Down 1-Up prosedürü kullanılmıştır. Katılımcılardan gürültüden sonra veya sessizlikte duyulan tonal sesin 1 ses olarak mı duyduklarını yoksa 2 ayrı ses olarak mı duyduklarını belirtmeleri istenmiştir. 3 aralık doğru tanımlanırsa aralık süresi azaltılmış ve her bir yanlıştaki aralık süresi 1 basamak artırılmıştır. 8 dönüş noktası belirlendikten sonra ilgili kulak için test sonlandırılmıştır. Modifiye Aralık Tespit Etme (GDT Suite) Arayüzü Şekil 3.6’te sunulmuştur.

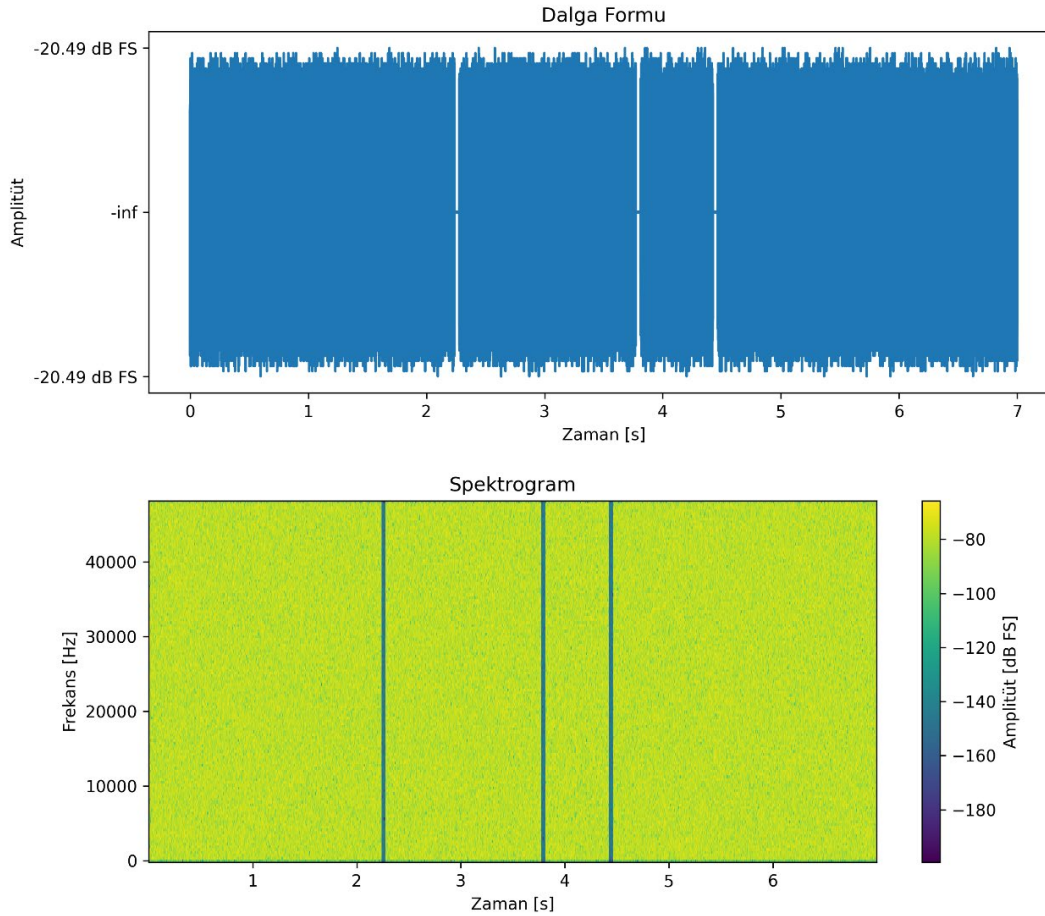


Şekil 3.6: Modifiye Aralık Tespit Etme Modülü (GDT Suite) arayüzü.

3.7. KULLANILAN UYARANLAR VE KALİBRASYON

3.7.1. Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE)

Çalışmada kullanılan uyaranlar Musiek ve diğ. (2005) tarafından kullanılan uyaranlar benzer mantıkla, fakat daha hassas ve tamamen randomize olacak şekilde üretilmiştir. Öncelikle 7 saniye süreli -30 dB FS şiddetli beyaz gürültü oluşturulmuştur. Ardından bu uyaran içine randomize olarak 2-40 ms aralığında 1 – 3 arası aralıklar yerleştirilmiştir. Boşluklar yerleştirilirken aralığın denk geldiği zaman penceresinde sesin dalga formunun bit değerleri 0 olarak atanmıştır. Musiek ve diğ. (2005)'dan farklı olarak aralıklar pseudorandomize değil uygulamanın çalışma zamanı içerisinde randomize olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ek olarak yine farklı olarak farklı sürelerde boşluklar değil aynı süreli boşluklar kullanılarak sesler oluşturulmuştur. Örneğin 2, 40 ve 3 ms boşluklar yerine tüm boşluklar uygulamada seçilen boşluk süresi ile eşit olacak şekilde üretilmiştir. Bu uygulamanın gerekçeleri deney düzeneği bölümünde açıklanacaktır. İki boşluk arası aralık en az 500 ms olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca aralıklar gürültünün ilk ve son saniyesinde oluşturulmamıştır.



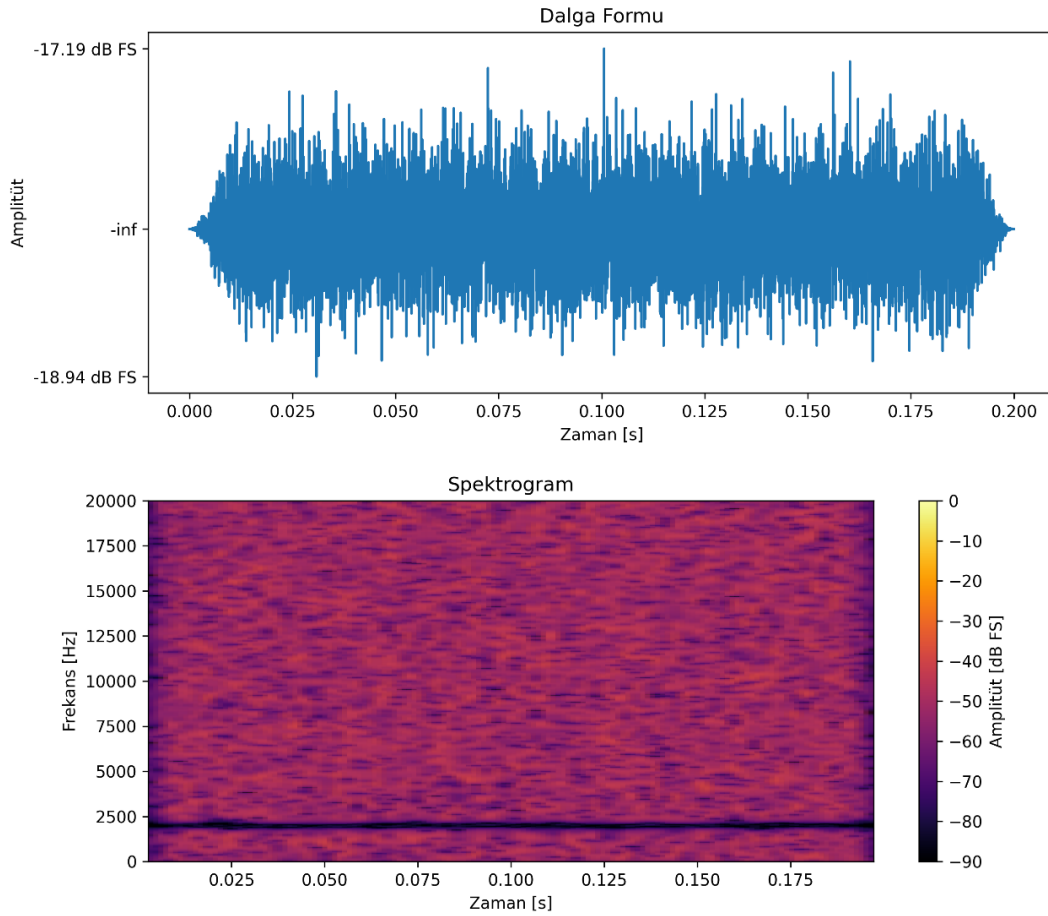
Şekil 3.7: Randomize 3 adet 40 ms uzunluğunda aralık içeren beyaz gürültüye ait dalga formu ve spektrogramı.

Tüm ses dosyaları 96000 Hz örnekleme hızı ve 16 bit derinliği ile mono formatta oluşturularak kullanılmıştır. Örnek bir GATE uyarı dalga formu ve spektrumu Şekil 3.7’de görselleştirilmiştir. Yazılımın sonraki geliştirmelerinde aynı gürültü içinde farklı sürede boşluklar içerecek şekilde geliştirilmesi planlanmaktadır.

3.7.2. Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE)

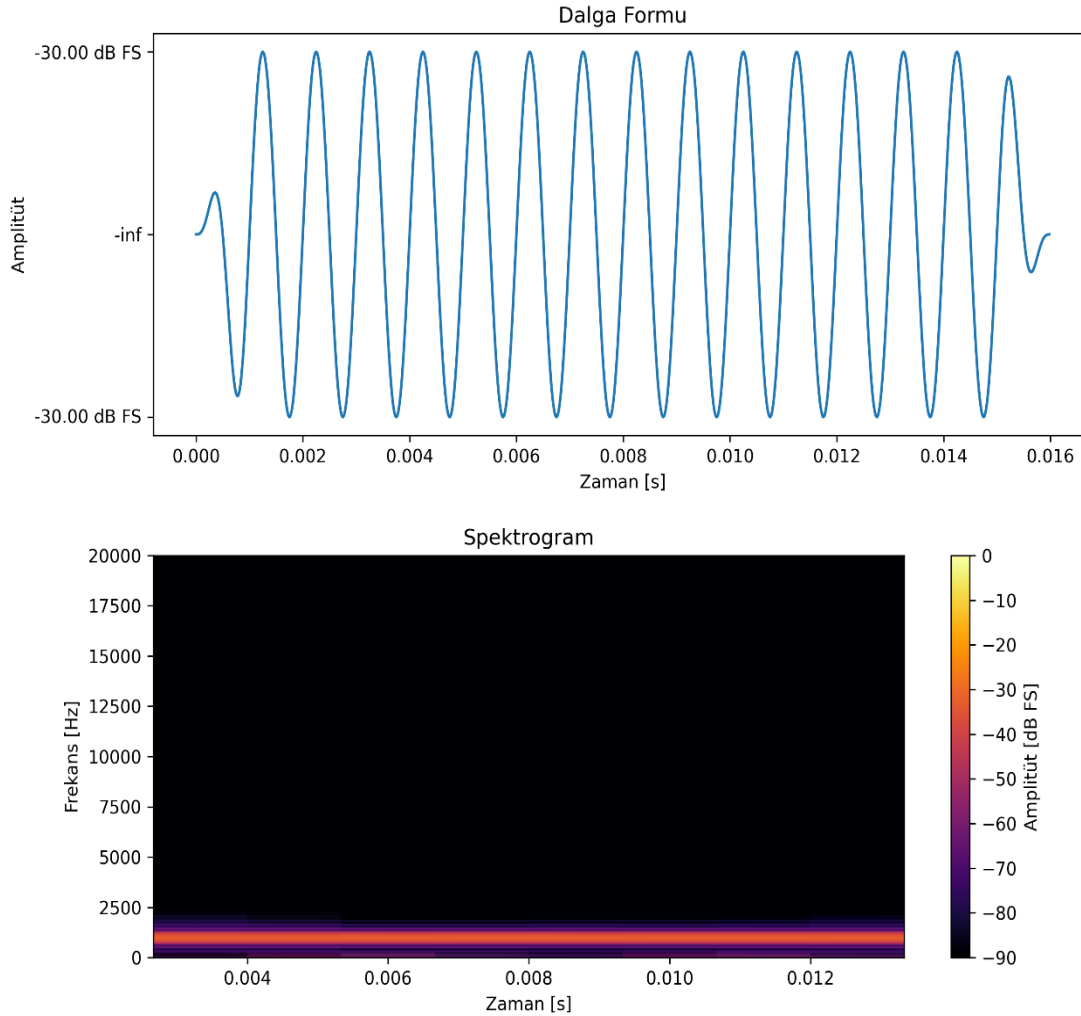
Çentikli Gürültü

Çentikli gürültü üretiminde GATE uyarılarında kullanılan baz beyaz gürültü kullanılmıştır (-30 dB FS şiddetli). Çentik sınırlarının belirlenmesinde Leschke ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada kullanılan çentikli gürültü parametrelerinden yararlanılmıştır. Çentik oluşturulurken hedef karakteristik frekansın 0,2 kat üstü ve altı sınır kabul edilerek band-stop filtre kullanılmıştır. Örneğin 1000 Hz çentikli gürültü için 800-1200 Hz frekans aralığının amplitütlerine 0 değeri atanarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 2000 Hz merkezli çentiğe sahip çentikli gürültü örneği Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8: Çentikli gürültü (2000 Hz merkezli) dalga formu ve spektrogramı.

Ardından çentikli gürültüler 200 ms olacak şekilde kısaltılmıştır. Tüm gürültülere 25 ms yükselme-alçalma zamanına sahip olacak şekilde kosinüs rampa fonksiyonu uygulanmıştır. Bu süreç 0-8000 Hz aralığındaki tüm oktavlar için tekrarlanmıştır. 0 Hz çentikli gürültü, çentik içermeyen beyaz gürültüyü ifade etmektedir. Ardından tüm çentikli gürültülerin ses dosyaları 96000 Hz örnekleme hızı ve 16 bit derinliği ile mono olarak .wav formatında kaydedilmiştir



Şekil 3.9: Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testinde kullanılan 2000 Hz frekanslı tonal uyarın.

Tonal Uyarınlar

Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testinde kullanılmak üzere 16 ms süreli, -30 dB FS şiddetli, 1 ms yükselme/alçalma zamanına sahip saf sesler üretilmiştir. 16 ms süre tüm frekanslarda tam sayılı döngüler (cycle) elde edilebilmesi için kullanılmıştır. Örneğin 125 Hz frekanslı 16 ms uyarın 2 döngüye, 250 Hz frekanslı 16 ms uyarın 4 döngüye, 500 Hz frekanslı 16 ms uyarın 8 döngüye, 750 Hz frekanslı 16 ms uyarın 12 döngüye ve 1000 Hz frekanslı 16 ms uyarın 16 döngüye sahiptir.

ms uyaran 16 döngüye sahiptir. Böylelikle saf ses uyaranlarının ani sonlanmaması sağlanarak uyaranın frekans domeninde alt ve üst frekanslara yayılması engellenmiştir.

Ani sonlanmalar zaman domeninde kısaltmaya ve frekans domeninde genişlemeye neden olabilmektedir. Bu durum kısa süreli uyaranlarda oluşan frekans-zaman belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Frekans zaman belirsizliği Gabor Belirsizlik İlkesinin (Gabor, 1946) bir sonucudur. Basit sinyaller için frekans zaman belirsizliği (3.1) ve (3.2)'de basitleştirilerek modellenmiştir. Kabaca zaman ile frekans yayılımı ilişkisi (3.1)'de verilmiştir.

$$f_{n_1} = f_c \pm \frac{1}{d} \quad (3.1)$$

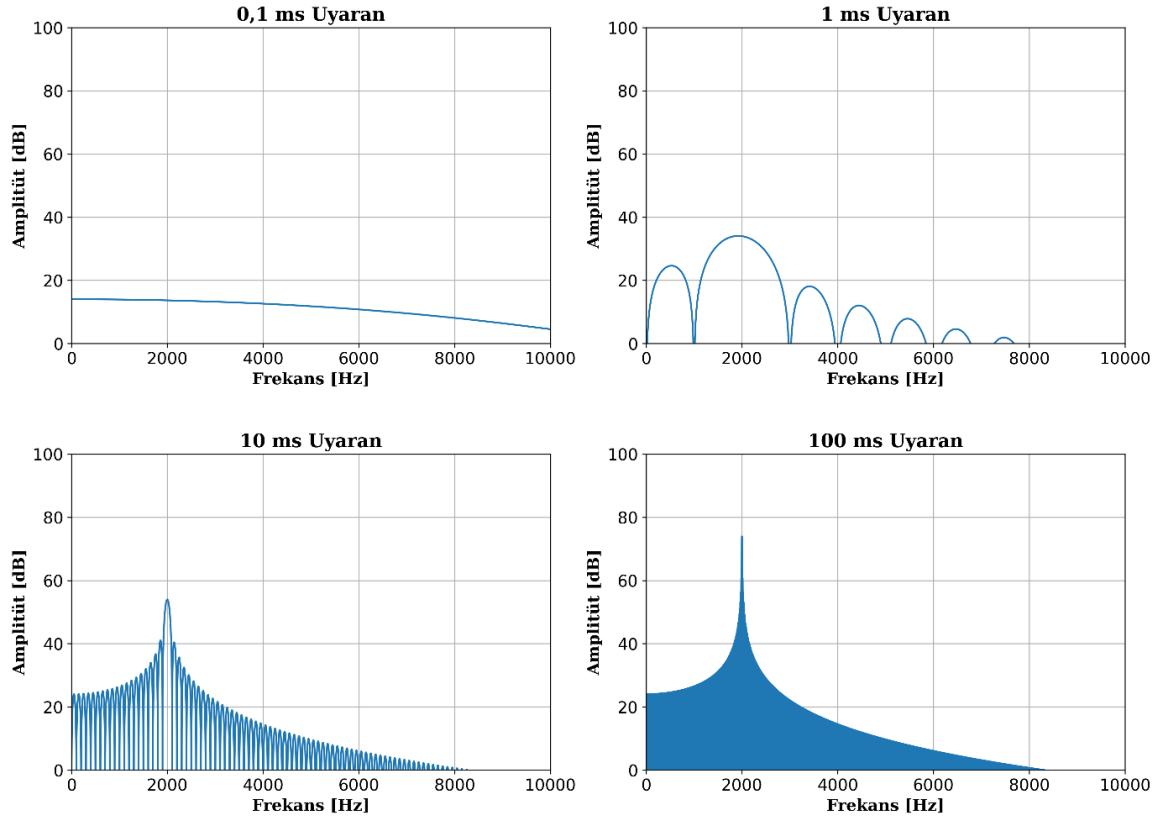
f_{n_1} ifadesi merkez frekansından yüksek ve alçak frekanslara doğru primer yayılma sınırlarını, f_c saf sesin merkez frekansını d ise saniye cinsinden süreyi göstermektedir. Bu ifade kullanılarak zamandaki kısaltmaya bağlı bant genişliğindeki primer değişim (bant genişliği) (3.2) kullanılarak hesaplanabilir.

$$BW = \frac{2}{d} \quad (3.2)$$

Burada BW bant genişliğini, d süreyi göstermektedir. Bu denklem kullanılarak bir saf seste yaşanan 1 ms'lik ani bir değişimin bant genişliğini 2000 Hz'e, 0,1 ms'lik ani bir değişimin ise bant genişliğini 20000 Hz'e çıkaracağı görülebilir. Bu etki Şekil 3.10'da görselleştirilmiştir.

Üretilen uyaranlarda bu etkilerin oluşmaması adına tüm uyaranlar tam sayılı döngüler ile üretilmiştir. Tüm uyaranların bu kurala uyması ve eşit sürede olmaları adına 16 ms uyaran süresi seçilmiştir. Ek olarak saf ses uyaranlarda yükselme ve alçalma zamanı 1 ms olacak şekilde ayarlanarak frekans yayılma miktarı azaltılmıştır.

Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testinde kullanılan uyaran örneğine ait dalga formu ve spektrogram görüntüsü Şekil 3.9'de gösterilmiştir. Bu işlemler tüm 125-8000 Hz aralığında tüm 1/2 oktav frekanslarında tekrarlanmıştır. Ardından tüm tonal uyaranların ses dosyaları 96000 Hz örnekleme hızı ve 16 bit derinliği ile mono olarak “.wav” formatında kaydedilmiştir.



Şekil 3.10: Uyarı süresinin azalması ile 2000 Hz tonal uyarının frekans cevabındaki değişim.



Şekil 3.11: Kalibrasyon düzeneği.

3.7.3. Kalibrasyon Süreci

Uyaran kalibrasyon süreci Larson Davis Model 824 Ses Düzeyi Ölçer (PCB Piezotronics Inc., Provo-Utah, ABD) ve Hantek DSO2D15 2 Kanallı Dijital Osiloskop (Qingdao Hantek Electronic Co., Şangdong, Çin) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uyaran kalibrasyonları arka plan gürültüsü ANSI S3.6-2018 standartlarına uygun olan sessiz kabinde gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sürecinde kullanılan ekipmanlar şekilde görülmektedir.

Tonal Uyaran ve Beyaz Gürültü Kalibrasyonu

Çalışmada oluşturulan deney düzeneği sessiz kabin içerisinde kurularak (Şekil 3.11) kalibrasyon işlemine başlanılmıştır. Öncelikle Larson Davis Model Cal250 hassas ses düzeyi kalibratörü (PCB Piezotronics Inc., Provo-Utah, ABD) kullanılarak Ses Düzeyi Ölçer kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Model Cal250 251,2 Hz’de 114 dB SPL saf ses üretmektedir. Kalibratörün kalibrasyonu sonrası 2 cc (HA-2) coupler kullanılarak Ses Düzeyi Ölçer ile IP-30 insert kulaklığın ve dolaylı olarak deney düzeneğinin bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği maksimum ses ayarlarına getirilerek 0 dB FS şiddetinde saf sesler (125-8000 Hz) ve beyaz gürültüler üretilmiştir. Ardından uyaranların maksimum çıkış seviyeleri dB SPL cinsinden belirlenmiştir. Tüm saf sesler ve beyaz gürültü için bu işlem gerçekleştirildikten sonra bu veriler kalibrasyon dosyasına kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerler deney düzeneğinde ve Audio-Hub yazılımında üretilen seslerin çıkış şiddetini belirlemek için kullanılmıştır. Ardından tüm saf sesler için frekans doğruluğu değerlendirilmiştir. Üretilen tüm saf seslerin frekans doğruluğunun $\pm 1\%$ düzeyinin altında olduğu belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada uyaran şiddeti 5 dB FS adımlarla azaltılarak 5 dB şiddet adımlarının doğrusallığı test edilmiştir. Tüm frekanslarda 5 dB’lik değişimlerinin $\pm 0,3$ dB hata payı ile ANSI S3.6-2018 standartlarına uygun doğrusallığa sahip olduğu belirlenmiştir. Yine tüm saf sesler için total harmonik distorsiyon değeri belirlenmiştir. Tüm saf seslerin total harmonik distorsiyonunun 3% ’ün altında olduğu belirlenmiştir.

Kısa Süreli Uyarıların Kalibrasyonu

Kısa süreli uyaran kalibrasyonunda Ses Düzeyi Ölçer ekipmanına ek olarak Osiloskop kullanılmıştır. Ses Düzeyi Ölçer ekipmanının Osiloskop ile elektriksel bağlantısı sağlanarak deney düzeneği ile üretilen kısa süreli uyarıların (çentikli gürültü ve tonal uyarılar) kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için 80 dB SPL saf ses ve beyaz gürültüler üretilmiş ardından osiloskop üzerinden tepe eşdeğer SPL (peak equivalent SPL – peSPL) seviyeleri belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Ardından kısa süreli uyarıların (çentikli gürültü ve tonal



Şekil 3.13: Deneylerin uygulanması sırasında kullanılan ekipmanlar.

3.8. DENEY DÜZENEĞİ

Test Ortamı

Deneyler 30 dBA'nın altında arka plan gürültüsüne sahip sessiz kabinde gerçekleştirilmiştir. Arka plan gürültüsü ölçümü Larson Davis Model 824 Ses Düzeyi Ölçer (PCB Piezotronics Inc., Provo-Utah, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan ses düzeyi ölçer Şekil 3.12'de görülmektedir.

Kullanılan Ekipmanlar

Çalışmada ses üretimi için araştırmacılara ait bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Uyarın üretiminin yüksek hassasiyetle ve kalibre bir şekilde yapılabilmesi ve sunulabilmesi için Focusrite Scarlett 4i4 3rd Gen Stüdyo Ses Kartı (Focusrite Audio Engineering Ltd., High Wycombe, Birleşik Krallık) ve RadioEar IP 30 İnsert Kulaklık (Radioear, Middelfart, Danimarka) kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.13'da görselleştirilmiştir.

Aralık Tespit Etme Testleri

Khalfa Hiperakuzi Ölçeği toplam puanı 15'in altında olan, akustik immitansmetrik değerlendirme bulguları ile odyometrik bulguları çalışmaya dahil edilme kriterlerini karşılayan katılımcılara sırasıyla GATE ve MATE testleri uygulanmıştır. Testler öncesinde Audio Hub uygulamasında katılımcı kaydı oluşturulmuş ve odyogram girişi yapılmıştır.

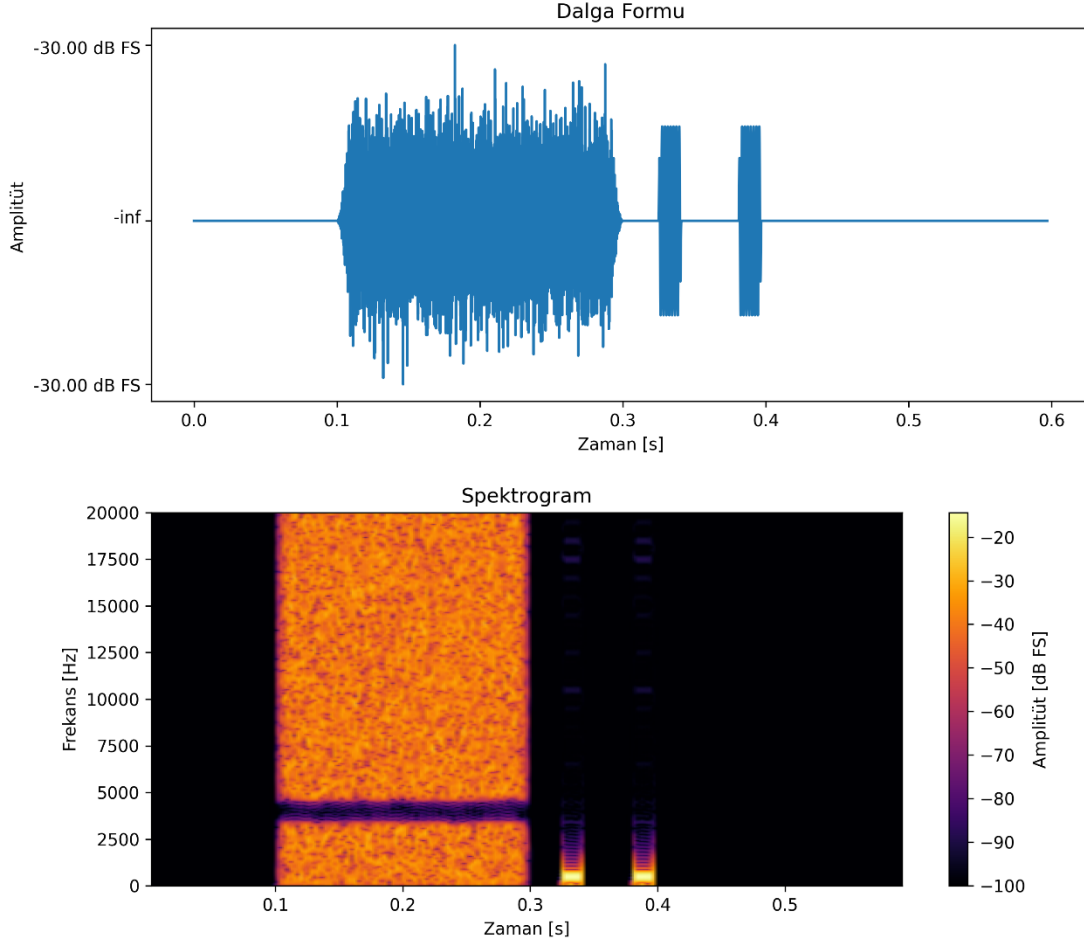
Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE)

Bu test için Audio Hub uygulaması üzerinde geliştirilmiş olan gürültüde aralık tespit etme modülü kullanılmıştır. GATE testinde katılımcılara GATE uyarıları dinletilmiş ve katılımcılardan duyduğu boşlukları sesli bir şekilde sayması istenmiştir. Teste başlamadan önce 40 ms boşluklara sahip 3 farklı ses ile deneme yapılmıştır. Uyarılar katılımcının saf ses ortalamalarının 50 dB üzerinde sunulmuştur (50 dB SL). Katılımcı testi kavradıktan sonra teste başlanmıştır. Testte 20 ms aralık süresi ile başlanıp 3-yukarı 1-aşağı (3-up 1-down) merdiven psikometrik yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem art arda 3 doğru cevap sonrası aralığın azaltılması ve herhangi bir yanlış cevap sonrası aralığın artırılması olarak özetlenebilir. Bu testte 20, 15, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3 ve 2 ms aralıklar içeren uyarılar kullanılmıştır. GATE testinde kullanılan uyarıların özellikleri 3.7.1'de detaylandırılmıştır. 3-yukarı 1-aşağı merdiven yönteminde 8 dönüm noktası elde edildiğinde dönüm noktalarının ortalaması alınarak eşik belirlenmiştir. Ayrıca ikincil olarak toplanan cevaplar bir psikometrik model üzerine yerleştirilerek En Büyük Olabilirlik Kestirimi (Maximum Likelihood Estimation – MLE) yapılmış ve aralık tespit etme eşiği belirlenmiştir.

Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE)

Bu test için Audio Hub uygulaması üzerinde geliştirilmiş olan modifiye aralık tespit etme modülü kullanılmıştır. MATE testinde katılımcılara MATE uyarıları dinletilmiş ve katılımcılardan gürültü sonrası kaç ses duyduklarını sesli bir şekilde söylemesi istenmiştir. Teste kullanılan çentikli gürültü ve 16 ms uzunluğundaki tonal uyarılara ait dalga formu ve spektrogram Şekil 3.14'de görülmektedir. Bu testte gürültüler 200 ms süreli ve 25 ms yükselme ve alçalma zamanına sahiptir. Gürültü kullanılan testlerde gürültü sunulduktan sonra 25 ms boşluk bırakılmış ardından test edilmek istenen aralık süresine göre aralarında aralık bulunan 2 16 ms süreli tonal uyarı gönderilmiştir. Gürültüler uyarı öncesi gönderilerek ileri maskeleye yöntemi kullanılmıştır (Leschke ve diğ., 2022). Gürültüler katılımcının saf ses ortalamalarının

50 dB üzerinde sunulmuştur (50 dB SL). Tonal uyarılar ise katılımcının ilgili frekanstaki işitme eşiğinin 50 dB üzerinde sunulmuştur (50 dB SL).



Şekil 3.14: MATE testinde kullanılan uyarıcı dizisi örneği. Sırasıyla 4000 Hz çentikli gürültü ve 16 ms süreli 500 Hz tonal uyarıcılar görülmektedir.

Teste başlamadan önce 40 ms boşluklara sahip 3 farklı ses ile deneme yapılmıştır. Katılımcı testi kavradıktan sonra teste başlanmıştır. Testte 20 ms aralık süresi ile başlanıp 3-yukarı 1-aşağı (3-up 1-down) merdiven psikometrik yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem art arda 3 doğru cevap sonrası aralığın azaltılması ve herhangi bir yanlış cevap sonrası aralığın artırılması olarak özetlenebilir. Bu testte 20, 15, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3 ve 2 ms aralıklar içeren uyarıcılar kullanılmıştır. MATE testinde kullanılan uyarıcıların özellikleri 3.7.2’de detaylandırılmıştır. 3-yukarı 1-aşağı merdiven yönteminde 8 dönüm noktası elde edildiğinde dönüm noktalarının ortalaması alınarak eşik belirlenmiştir. Ayrıca ikincil olarak toplanan cevaplar bir psikometrik model üzerine yerleştirilerek En Büyük Olabilirlik Kestirimi (Maximum Likelihood Estimation – MLE) yapılmış ve aralık tespit etme eşiği belirlenmiştir. Fakat eşik modellemesi için uygun olmadığı için veri toplama süreci tamamlandıktan sonra tüm

katılımcıların ham verileri bölüm 3.9’da bahsi geçen modeller kullanılarak işlenmiş ve eşik belirlenmesi için en uygun model belirlenmiştir.

Tablo 3.1: MATE testi seansları ve uyaran parametreleri.

	Seans 1	Seans 2	Seans 3	Seans 4
Gürültüler	Gürültüsüz Beyaz Gürültü	250 Hz NN 500 Hz NN	1000 Hz NN 2000 Hz NN	4000 Hz NN 8000 Hz NN
Uyaranlar	250-8000 Hz Tonal	250-8000 Hz Tonal	250-8000 Hz Tonal	250-8000 Hz Tonal
Gürültü Parametreleri	Süre: 200 ms Yükselme: 25 ms Şiddet: 50 dB SL Alçalma: 25 ms İleri maskeleye süresi: 25 ms Plato: 150 ms Beyaz Gürültü Frekans Aralığı: 0-20000 Hz Çentikli Gürültü Frekans Aralığı: 0-20000 Hz Çentikli Gürültüde Çentik Bant Genişliği: $f_c * 0,4$ Hz Çentik Üst Sınırı: $f_c * 0,8$ Hz Çentik Alt Sınırı: $f_c * 1,2$ Hz			
Tonal Uyaran Parametreleri	Süre: 16 ms Şiddet: 50 dB SL	Yükselme: 1 ms Alçalma: 1 ms Plato: 14 ms Frekans: 250-8000 Hz	Aralık: 2-40 ms	

* MATE testi öncesi tüm katılımcılara, Khalfa Hiperakuzi Ölçeği, Akustik İmmittansmetrik Değerlendirme, Saf Ses Odyometri ve Konuşma Odyometrisi uygulanmıştır.

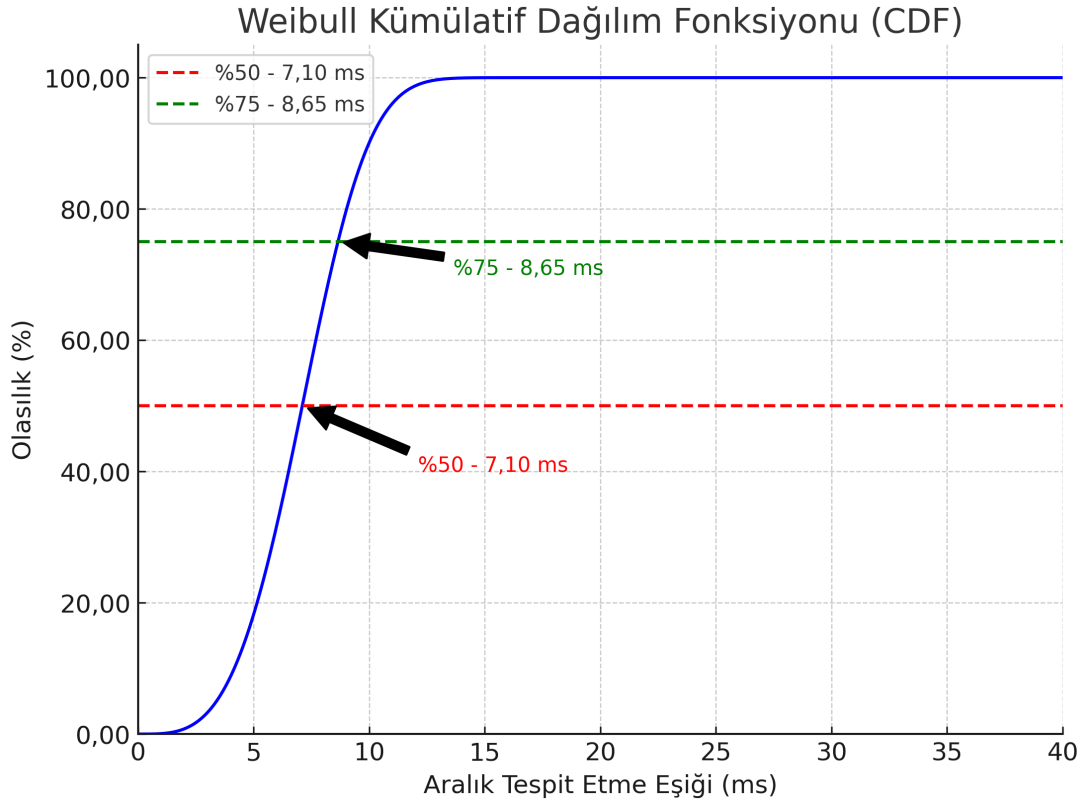
** NN: Çentikli Gürültü, f_c : Çentik Merkez Frekansı, ms: milisaniye, dB SL: Duyum Seviyesi

Bu işlemler 250-8000 Hz aralığında her oktav için çentikli gürültüler ve her gürültü için 250-8000 Hz aralığında tonal uyaranlar kullanılarak tekrarlanmıştır. Ek olarak çentikli gürültü bulunmadan ve hiçbir gürültü olmadan test tekrarlanmıştır (Şekil 3.6). Birçok farklı gürültü ve tonal uyaran kombinasyonu ile test yapıldığından test süresi oldukça artabilmektedir. Test süresi artışına bağlı katılımcının yorulması ve performansının düşmesi riski göz önünde bulundurularak MATE testi 4 ayrı seansa bölünmüştür. Sıra etkisini de dışlamak adına her katılımcının seans sırası randomize olacak şekilde uygulanmıştır. MATE testi için uygulanan seans numarası ve uygulanan testler Tablo 3.1’de verilmiştir.

3.9. GATE VE MATE TESTLERİNDE TOPLANAN KATILIMCI CEVAPLARININ MODELLENMESİ

Psikometrik eşik belirleme testleri, katılımcının belirli bir soruya doğru cevap verme olasılığını hesaplamayı amaçlar. Örneğin, saf ses odyometri testinde sıklıkla kullanılan Modifiye Hughson-Westlake yöntemi, belirli bir uyarının ± 5 dB hata payı ve %60 olasılıkla kişinin duyabileceği en düşük ses seviyesini belirler. Eşik seviyesinin üzerindeki ses şiddetlerinde, katılımcının sesi duyma olasılığı artarken, ses şiddeti azaldıkça bu olasılık da azalacaktır.

Bu tür olasılık hesaplamaları, genellikle olasılık dağılımları ve kümülatif dağılım fonksiyonları (CDF) kullanılarak modellenir. Olasılık dağılımı, belirli bir olayın gerçekleşme olasılığını tanımlar. CDF ise, belirli bir değerden küçük veya ona eşit olan olayların toplam olasılığını gösterir. Örneğin, belirli bir ses seviyesinin duyulma olasılığı, bu seviyeden daha düşük veya eşit tüm seviyelerin olasılıklarının toplamı olarak ifade edilebilir. Bu modeller, özellikle ikili cevapların (evet/hayır, tek/çift) analizinde kullanışlıdır. Aralık tespit etme eşiği belirlenirken kullanılmış bir Weibull CDF grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15: Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu üzerinde %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri görülmektedir.

GATE ve MATE testlerinde elde edilen cevaplar doğası gereği ikili bir sistemi yansıtmaktadır. Örneğin, duyduğunuz sesin tek mi çift mi olduğu sorulduğunda, katılımcılar “Evet” veya “Hayır” cevabını verebilirler. Benzer şekilde, katılımcıya “duyduğunuz sesin tek mi çift mi olduğunu söyleyin!” şeklinde bir yönerge verildiğinde, katılımcı yine “Tek” veya “Çift” cevaplarından birini seçecektir. Katılımcılardan alınacak cevapların bu ikili doğası, ikili lojistik regresyon (binary logistic regression) modeliyle uyumludur. Bu önbilgiler ışığında çalışmamızda 2 farklı lojistik regresyon modeli ve Weibull dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılarak aralık tespit etme eşikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

3.9.1. Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı, çeşitli uygulamalarda esnekliği sayesinde yaygın olarak kullanılan bir olasılık dağılımıdır. Bu dağılım, genellikle iki temel parametre ile tanımlanır: şekil parametresi (β) ve ölçek parametresi (α). Weibull dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu, belirli bir değerden küçük veya ona eşit olan olayların toplam olasılığını hesaplar ve şu şekilde ifade edilir (3.3):

$$F(x; \beta, \alpha) = 1 - e^{-(x/\alpha)^\beta} \quad (x \geq 0 \text{ iken}) \quad (3.3)$$

β (şekil parametresi) dağılımın şekli üzerinde etkili olup, olayların gerçekleşme oranının zaman içindeki değişimini belirler. Örneğin, $\beta < 1$ olduğunda, olayın gerçekleşme olasılığı zamanla azalır; $\beta = 1$ olduğunda ise üstel dağılıma dönüşür; $\beta > 1$ olduğunda olayın gerçekleşme olasılığı zamanla artar. α (ölçek parametresi) olayın yayılma aralığını belirler ve ölçeklendirme işlemi yapar (Alizadeh ve diğ., 2015). Bu parametre, olayın dağılımının genişliğini etkiler. Weibull CDF, belirli bir x değeri için olayın meydana gelme olasılığını modellemek için kullanılır. Bu fonksiyon, çeşitli uygulamalarda, özellikle aralık tespit etme eşiği belirleme testlerinde ve ikili yanıtların analizinde etkili bir şekilde kullanılabilir.

3.9.2. Lojistik Regresyon Modeli

Lojistik regresyon, özellikle ikili (binary) sonuçları modellemek için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir (Berkson, 1944). Bu yöntem, bir bağımlı değişkenin (örneğin, bir olayın gerçekleşip gerçekleşmemesi) belirli bir bağımsız değişkene bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemeye yarar. Lojistik regresyon, genellikle olasılıkları tahmin etmek ve sınıflandırma yapmak için kullanılır.

Lojistik regresyonun temel formülü, bir olayın olasılığını tahmin etmek için kullanılır ve şu şekilde ifade edilir (3.4):

$$p(x) = \frac{1}{1+e^{-(a+bx)}} \quad (3.4)$$

$p(x)$ bağımlı değişkenin değerinin 1 (örneğin, olayın gerçekleşmesi) olma olasılığını temsil eder, x bağımsız değişkendir. a modelin kesişim (intercept) parametresidir. b bağımsız değişkenin katsayısıdır ve bağımsız değişkenin olayın gerçekleşme olasılığı üzerindeki etkisini ölçer. Lojistik regresyon modeli, özellikle ikili yanıtların analizi için etkili bir araçtır ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Modelin parametreleri (a ve b) olasılıkların tahmin edilmesinde ve bağımsız değişkenlerin olay üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde kritik rol oynar. İnsanlarda aralık tespit etme eşiklerinin modellendiği çalışmalarda sıklıkla bu model kullanılmıştır.

3.9.3. Modifiye Lojistik Regresyon Modeli

Bu model Florentine ve diğ. (1999) tarafından aralık tespit etme testlerinde kullanılmıştır. Katılımcıların aralık tespit etme eşiklerini belirlemek amacıyla priming (önhazırlama) ile birleştirilerek uygulanmıştır. Florentine ve arkadaşları, bu modelin aralık tespit etme süreçlerini modellemek için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir (3.5):

$$P_{doğru} = \alpha + \frac{1-\alpha}{1+e^{(-k[\log(t)-\log(m)])}} \quad (3.5)$$

Burada, $P_{doğru}$ doğru cevap verma olasılığını, α yanlış-pozitif oranını, t aralık süresini, m psikometrik fonksiyonun orta noktasını ve k ise eğimi belirleyen serbest bir parametreyi temsil eder.

Çalışmamızda bu modeller kullanılarak ve psikometrik cevaplarda yer alan son 8 değişim noktasının (reversal-point) ortaması alınarak aralık tespit etme eşikleri hesaplanmıştır. Modellerin veri setine uydurulması için En Küçük Kareler Yöntemi (Least Squares Method) kullanılmıştır. Ardından bu modellerin katılımcıların verdiği cevaplara uyumu karşılaştırılarak en uygun model belirlenmiştir.

3.10. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Veri setinin istatistiksel analizleri SPSS Statistics v27 (IBM, Chicago, Illinois) ve Scipy Python Kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri setinin normalliği Jarque-Bera Testi (Jarque ve Bera, 1980) ile belirlenmiştir. Anketlerin iç tutarlılığı Cronbach's alfa değeri (Cronbach, 1951) ile değerlendirilmiştir. Verilerin görsel analizi için ortalama, standart sapma ve yüzde gibi tanımlayıcı istatistikler kullanılmıştır. Aralık tespit etme eşiklerini belirlemek üzere kullanılan modellerin verisetine uyumunu değerlendirmek üzere Hosmer-Lemeshow Uyum İyiliği Testi kullanılmıştır (Surjanovic ve diğ., 2024). Aralık tespit etme eşiklerinin diğer parametreler arasındaki nedenselliği analiz etmek amacıyla Hiyerarşik Doğrusal Regresyon modelleri oluşturulmuştur (DeBruine ve Barr, 2021). Bağımsız örneklerin ortalamalarını karşılaştırmak için Bağımsız Örneklem t-Testi kullanılmıştır (Student, 1908). Bağımlı örneklem çiftlerini karşılaştırmak için Bağımlı Örneklem t Testi kullanılmıştır (Banda, 2018). Tekrarlayan testlerin birbiri ile olan uyumunu görselleştirmek için Bland-Altman grafikleri çizilmiştir (Chatfield ve diğ., 2023). Bağımlı kategorik veri gruplarını karşılaştırmak için tekrarlayan testlerde ANOVA testi kullanılmıştır (Langenberg ve diğ., 2022). Alt kategorilerde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gösteren veri kaynaklarını belirlemek için Tukey HSD testi ile post-hoc ikili karşılaştırmalar yapılmıştır (Nanda ve diğ., 2021). İki'den fazla grupta yapılan bağımsız karşılaştırmalarda Bonferroni (1936) düzeltmesi uygulanmıştır. $p < 0,05$ olan bulgular istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmaya dahil edilme, çalışmadan dışlama kriterlerine ve yapılan güç analizine uygun olarak dahil edilen 60 katılımcıdan elde edilen verilerle belirlenen bulgular sunulmaktadır. Güç analizi Cohen (1988) tarafından önerilen etki değerleri kullanılarak istatistiksel analizlerin %95 güven aralığı ve 0,8 güç ile yapılabilmesine olanak tanımıştır.

4.1. DEMOGRAFİK VERİLER VE İŞİTME DEĞERLENDİRME BULGULARI

Çalışmaya 30 erkek (ortalama yaş: $19,99 \pm 1,19$) ve 30 kadın (ortalama yaş: $20,71 \pm 1,48$) katılımcı dahil edilmiştir. Tüm katılımcıların otoskopik muayeneleri normal bulunmuş, ayrıca normal timpanometri (Tip A timpanogram) ve normal akustik refleks cevabı elde edilmiştir. Katılımcıların saf ses işitme eşikleri de normal sınırlar içerisinde. Katılımcılara ait demografik bilgiler ve işitme testi sonuçları Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Katılımcıların Demografik Verileri, Khalfa Hiperakuzi Ölçeği (KHÖ) Toplam Skoru ve Saf Ses Ortalaması (dB HL) Karşılaştırmaları

	Kadın			Erkek			t	p	Toplam		
	N	M	SD	N	M	SD			N	M	SD
Yaş (Yıl)	30	20,71	1,48	30	19,99	1,19	1,875	0,066	60	20,35	1,38
KHÖ (Total Skor)	30	13,17	1,88	30	11,90	2,08	2,610	0,012*	60	12,53	2,04
Saf Ses Ortalaması (dB HL)											
Sağ Hava Yolu	30	7,78	3,04	30	7,44	2,89	0,436	0,664	60	7,61	2,94
Sol Hava Yolu	30	7,83	2,41	30	7,56	3,17	0,382	0,704	60	7,69	2,80
Sağ Kemik Yolu	30	4,94	3,49	30	4,94	2,96	0,000	1,000	60	4,94	3,21
Sol Kemik Yolu	30	5,72	2,83	30	5,06	3,52	0,808	0,422	60	5,39	3,19

N: Örneklem Sayısı, M: Ortalama, SD: Standart Sapma, KHÖ: Khalfa Hiperakuzi Ölçeği, *: $p < 0,05$.

Katılımcıların Khalfa Hiperakuzi Ölçeği (KHÖ) toplam skorları normal sınırlarda (14 ve altı) elde edilmiştir. Ölçek cevaplarının iç tutarlılığını değerlendirmek amacıyla Cronbach Alfa testi yapılmış ve yüksek iç tutarlılık ($\alpha = 0,899$) gösterdiği belirlenmiştir. Jarque-Bera testi

ve veri setine ait histogramlar görsel olarak incelenerek yapılan analizler sonucu elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin (Weibull ve Ortalama Eşikler için) ve yaş dağılımının normal dağılıma uygun olduğu belirlenmiştir ($p > 0,05$).

4.2. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN EN UYGUN MODELİN BELİRLENMESİ

Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE) ve Modifiye Aralık Tespit Etme (MATE) testlerinde elde edilen eşiklerin belirlenmesi için Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF) (3.3), lojistik regresyon (3.4) ve Florentine ve diğ. (1999) tarafından önerilen modifiye lojistik regresyon (3.5) modeli kullanılmıştır. Bu modeller en küçük kareler yöntemi ile veri setine uydurulmuştur. Ardından tüm durumlar ve her bir katılımcı için ayrı ayrı oluşturulan modellere Hosmer-Lemeshow Testi uygulanarak modelin veri setine uyumu değerlendirilmiştir. Bu test sonucunda küçük değerler veri setine uyumun daha yüksek olduğunu ve yüksek değerler veri setine uyumdan uzaklaştığını gösterir. Hosmer-Lemeshow testinden elde edilen uyum değeri için bir kesme değeri yoktur ancak değerlerin büyüklüğü farklı modeller için karşılaştırılarak veri setine en uygun model belirlenebilir. Test sonucunda $p < 0,05$ ise modelin veri seti ile uyumsuz olduğunu göstermektedir. Yapılan analizde Hosmer-Lemeshow Testine göre veri setine en fazla uyum gösteren modelin Weibull CDF olduğu belirlenmiştir. Weibull CDF modeli ortalamada en düşük Hosmer-Lemeshow Test skorunu sergilemiş ve tüm veri setleri ile uyum göstermiştir ($p > 0,05$). Lojistik Regresyon ve Modifiye Lojistik Regresyon modelleri ise bazı gürültü durumları ve uyaran frekanslarında elde edilen veriler için veri setine uyum göstermemiştir ($p < 0,05$). Ayrıca bu iki model için elde edilen Hosmer-Lemeshow Test değerleri tüm durumlarda Weibull CDF'ten yüksektir ve daha düşük uyuma işaret etmektedir. GATE ile Tüm gürültü durumu, kulak ve uyaran frekansı kombinasyonları için MATE testlerine farklı modellerin uyum durumlarının incelemesi Tablo 4.2, Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te detaylandırılmıştır.

Tablo 4.2: Sağ kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi.

Test ve Kullanılan Uyarılar	Modifiye Lojistik Regresyon (HL TEST)			Lojistik Regresyon (HL TEST)			Weibull (HL TEST)		
	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)
Gürültüde Aralık Tespit Etme	6,91	2,64	0,00	>99	>99	6,67	0,67	0,83	0,00
Modifiye Aralık Tespit Etme									
Gürültüsüz									
250 Hz Saf Ses	8,20	2,65	0,00	3,97	2,24	0,00	3,93	2,37	0,00
500 Hz Saf Ses	8,48	2,55	0,00	4,20	3,94	1,67	3,64	2,22	0,00
1000 Hz Saf Ses	8,27	2,91	1,67	20,98	>99	1,67	3,83	2,06	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,52	2,73	0,00	3,71	2,03	0,00	3,53	2,12	0,00
4000 Hz Saf Ses	9,13	2,91	3,33	4,20	2,11	0,00	4,04	2,05	0,00
8000 Hz Saf Ses	9,51	3,28	6,67	4,02	2,17	0,00	3,95	2,30	0,00
Beyaz Gürültü									
250 Hz Saf Ses	7,75	2,71	0,00	4,53	3,11	1,67	4,13	2,48	0,00
500 Hz Saf Ses	7,78	2,49	0,00	>99	>99	6,67	4,54	2,06	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,90	2,98	0,00	>99	>99	6,67	5,06	2,35	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,58	2,71	0,00	>99	>99	3,33	4,96	2,22	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,57	2,69	3,33	15,36	75,74	3,33	4,81	2,43	0,00
8000 Hz Saf Ses	9,34	2,99	5,00	>99	>99	5,00	6,03	2,73	0,00
250 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	8,46	2,62	1,67	>99	>99	8,33	3,11	1,71	0,00
500 Hz Saf Ses	8,15	2,71	1,67	4,54	2,33	0,00	4,45	2,27	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,88	2,66	1,67	5,09	4,34	1,67	4,56	2,20	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,50	2,97	3,33	>99	>99	3,33	4,37	2,08	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,07	2,45	0,00	4,78	2,84	1,67	4,32	2,04	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,90	3,29	1,67	4,31	2,25	0,00	4,27	2,29	0,00
500 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	6,73	3,22	1,67	3,26	3,48	1,67	2,70	1,84	0,00
500 Hz Saf Ses	8,37	3,27	1,67	>99	>99	5,00	3,35	1,87	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,58	3,09	0,00	>99	>99	5,00	3,54	2,05	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,40	2,73	1,67	>99	>99	1,67	3,66	2,45	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,35	3,09	1,67	>99	>99	3,33	4,39	2,16	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,48	2,75	1,67	>99	>99	3,33	3,54	1,86	0,00

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, HL: Hosmer-Lemeshow Testi, U (%): Dağılıma Uymayan Örneklem Yüzdesi

">99" ifadesi, yüksek ortalamaların tablodaki okunabilirliğini artırmak için kullanılmıştır.

Her test için veri setine en iyi uyum sağlayan fonksiyon koyu olarak işaretlenmiştir.

Tablo 4.3: Sağ kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi (Tablo 4.2'nin Devamı).

Testler ve Kullanılan Uyarılar	Modifiye Lojistik Regresyon (HL TEST)			Lojistik Regresyon (HL TEST)			Weibull (HL TEST)		
	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)
Modifiye Aralık Tespit Etme									
1000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	7,19	2,93	1,67	3,25	2,55	0,00	3,08	2,25	0,00
500 Hz Saf Ses	8,36	2,46	0,00	12,51	68,42	3,33	3,33	2,17	0,00
1000 Hz Saf Ses	6,84	2,21	0,00	>99	>99	1,67	3,34	2,24	0,00
2000 Hz Saf Ses	6,72	2,44	0,00	>99	>99	6,67	3,18	2,10	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,63	3,50	5,00	>99	>99	5,00	3,67	2,30	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,37	2,44	1,67	>99	>99	5,00	3,67	2,28	0,00
2000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	6,02	2,03	0,00	>99	>99	6,67	2,27	1,71	0,00
500 Hz Saf Ses	9,04	2,97	3,33	>99	>99	1,67	4,21	2,57	0,00
1000 Hz Saf Ses	6,97	2,32	0,00	3,45	1,94	0,00	3,34	1,92	0,00
2000 Hz Saf Ses	6,96	2,39	0,00	>99	>99	5,00	2,86	2,02	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,32	2,68	1,67	10,54	55,25	1,67	3,29	1,84	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,68	3,10	5,00	>99	>99	11,67	3,68	2,68	0,00
4000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	7,72	2,43	0,00	>99	>99	6,67	2,96	1,93	0,00
500 Hz Saf Ses	8,48	2,73	3,33	>99	>99	3,33	3,48	2,10	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,63	3,06	3,33	>99	>99	1,67	3,35	2,16	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,30	2,47	0,00	>99	>99	3,33	3,14	1,95	0,00
4000 Hz Saf Ses	7,36	2,49	0,00	>99	>99	3,33	2,84	1,99	0,00
8000 Hz Saf Ses	7,82	2,47	0,00	>99	>99	5,00	2,86	1,56	0,00
8000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	8,07	2,75	1,67	36,24	>99	3,33	4,67	2,28	0,00
500 Hz Saf Ses	8,65	3,36	5,00	4,27	2,65	0,00	4,06	2,25	0,00
1000 Hz Saf Ses	8,31	2,35	0,00	3,78	2,28	0,00	3,75	2,36	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,54	2,66	1,67	2,94	1,83	0,00	2,69	1,79	0,00
4000 Hz Saf Ses	7,94	2,70	0,00	>99	>99	3,33	3,20	1,75	0,00
8000 Hz Saf Ses	7,65	2,33	0,00	3,50	1,80	0,00	3,30	1,71	0,00

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, HL: Hosmer-Lemeshow Test, U (%): Dağılıma Uymayan Örneklem Yüzdesi

">99" ifadesi, yüksek ortalamaların tablodaki okunabilirliğini artırmak için kullanılmıştır.

Her test için veri setine en iyi uyum sağlayan fonksiyon koyu olarak işaretlenmiştir.

Tablo 4.4: Sol kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi.

Testler ve Kullanılan Uyarılar	Modifiye Lojistik Regresyon (HL TEST)			Lojistik Regresyon (HL TEST)			Weibull (HL TEST)		
	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)
Gürültüde Aralık Tespit Etme	9,66	4,35	11,67	>99	>99	11,67	1,20	1,36	0,00
Modifiye Aralık Tespit Etme									
Gürültüsüz									
250 Hz Saf Ses	8,97	3,04	5,00	4,43	2,42	0,00	4,31	2,35	0,00
500 Hz Saf Ses	7,83	2,51	0,00	>99	>99	1,67	3,83	2,12	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,76	2,66	0,00	>99	>99	3,33	3,69	2,37	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,44	2,50	0,00	3,97	1,95	0,00	3,79	1,86	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,90	2,93	5,00	4,58	3,73	1,67	4,01	2,28	0,00
8000 Hz Saf Ses	9,66	2,54	3,33	4,94	9,08	1,67	3,64	1,99	0,00
Beyaz Gürültü									
250 Hz Saf Ses	8,46	2,42	0,00	>99	>99	5,00	4,88	2,34	0,00
500 Hz Saf Ses	7,44	2,90	1,67	4,56	2,44	0,00	4,32	2,23	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,82	2,75	1,67	>99	>99	3,33	4,76	2,58	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,37	3,36	6,67	>99	>99	5,00	4,79	2,81	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,70	2,88	3,33	>99	>99	5,00	5,43	2,52	0,00
8000 Hz Saf Ses	9,22	3,27	3,33	5,83	2,77	0,00	5,68	2,64	0,00
250 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	8,09	2,35	1,67	>99	>99	3,33	3,98	2,56	0,00
500 Hz Saf Ses	8,69	2,74	1,67	>99	>99	1,67	3,85	2,38	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,95	2,47	1,67	4,55	2,43	0,00	4,29	2,19	0,00
2000 Hz Saf Ses	8,19	2,70	1,67	>99	>99	6,67	3,84	2,24	0,00
4000 Hz Saf Ses	7,93	2,53	1,67	4,94	3,31	1,67	4,52	2,36	0,00
8000 Hz Saf Ses	7,90	2,42	0,00	>99	>99	1,67	3,84	2,39	0,00
500 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	7,36	2,40	0,00	4,80	9,45	3,33	3,14	2,18	0,00
500 Hz Saf Ses	7,93	2,47	0,00	>99	>99	1,67	3,37	1,85	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,50	2,21	0,00	6,92	21,13	3,33	4,08	2,38	0,00
2000 Hz Saf Ses	6,23	2,35	0,00	7,86	36,85	1,67	3,00	1,86	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,57	2,95	6,67	>99	>99	3,33	3,90	2,23	0,00
8000 Hz Saf Ses	7,66	2,47	1,67	>99	>99	6,67	3,81	2,28	0,00

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, HL: Hosmer-Lemeshow Testi, U (%): Dağılıma Uymayan Örneklem Yüzdesi

">99" ifadesi, yüksek ortalamaların tablodaki okunabilirliğini artırmak için kullanılmıştır.

Her test için veri setine en iyi uyum sağlayan fonksiyon koyu olarak işaretlenmiştir.

Tablo 4.5: Sol kulak için farklı fonksiyonların uyum iyiliği durumlarının Hosmer-Lemeshow Testi ile değerlendirilmesi (Tablo 4.4'ün Devamı).

Testler ve Kullanılan Uyarılar	Modifiye Lojistik Regresyon (HL TEST)			Lojistik Regresyon (HL TEST)			Weibull (HL TEST)		
	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)	M	SD	U (%)
Modifiye Aralık Tespit Etme									
1000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	6,55	2,41	0,00	2,82	1,97	0,00	2,66	2,00	0,00
500 Hz Saf Ses	8,61	3,26	5,00	>99	>99	3,33	3,57	2,34	0,00
1000 Hz Saf Ses	7,64	2,31	0,00	>99	>99	3,33	3,21	2,29	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,07	2,82	1,67	>99	>99	3,33	3,28	2,08	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,03	2,86	0,00	3,92	2,41	0,00	3,68	2,30	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,52	2,43	0,00	>99	>99	8,33	4,32	2,59	0,00
2000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	6,67	2,48	0,00	>99	>99	1,67	2,83	2,08	0,00
500 Hz Saf Ses	8,46	2,75	0,00	>99	>99	5,00	3,30	2,08	0,00
1000 Hz Saf Ses	6,73	2,20	0,00	2,98	1,96	0,00	2,76	1,80	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,12	2,20	0,00	3,14	2,06	0,00	2,98	2,03	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,06	2,50	1,67	>99	>99	6,67	3,26	1,76	0,00
8000 Hz Saf Ses	9,36	2,73	3,33	>99	>99	3,33	3,40	1,87	0,00
4000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	7,32	2,19	0,00	5,62	21,44	1,67	2,80	1,73	0,00
500 Hz Saf Ses	8,87	2,86	1,67	>99	>99	3,33	3,51	2,00	0,00
1000 Hz Saf Ses	8,04	2,92	0,00	>99	>99	5,00	3,66	2,56	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,23	2,77	0,00	>99	>99	6,67	3,42	2,08	0,00
4000 Hz Saf Ses	7,49	2,41	0,00	>99	>99	3,33	2,87	1,85	0,00
8000 Hz Saf Ses	8,43	3,13	3,33	>99	>99	3,33	2,85	2,24	0,00
8000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	8,38	2,76	3,33	>99	>99	3,33	4,30	2,47	0,00
500 Hz Saf Ses	8,95	3,02	1,67	4,56	2,35	0,00	4,28	2,02	0,00
1000 Hz Saf Ses	8,21	2,80	0,00	4,02	2,92	1,67	3,67	2,20	0,00
2000 Hz Saf Ses	7,02	2,61	0,00	3,60	4,11	1,67	2,90	1,75	0,00
4000 Hz Saf Ses	8,63	3,18	1,67	>99	>99	1,67	3,15	2,05	0,00
8000 Hz Saf Ses	6,43	2,24	0,00	2,34	1,47	0,00	2,30	1,54	0,00

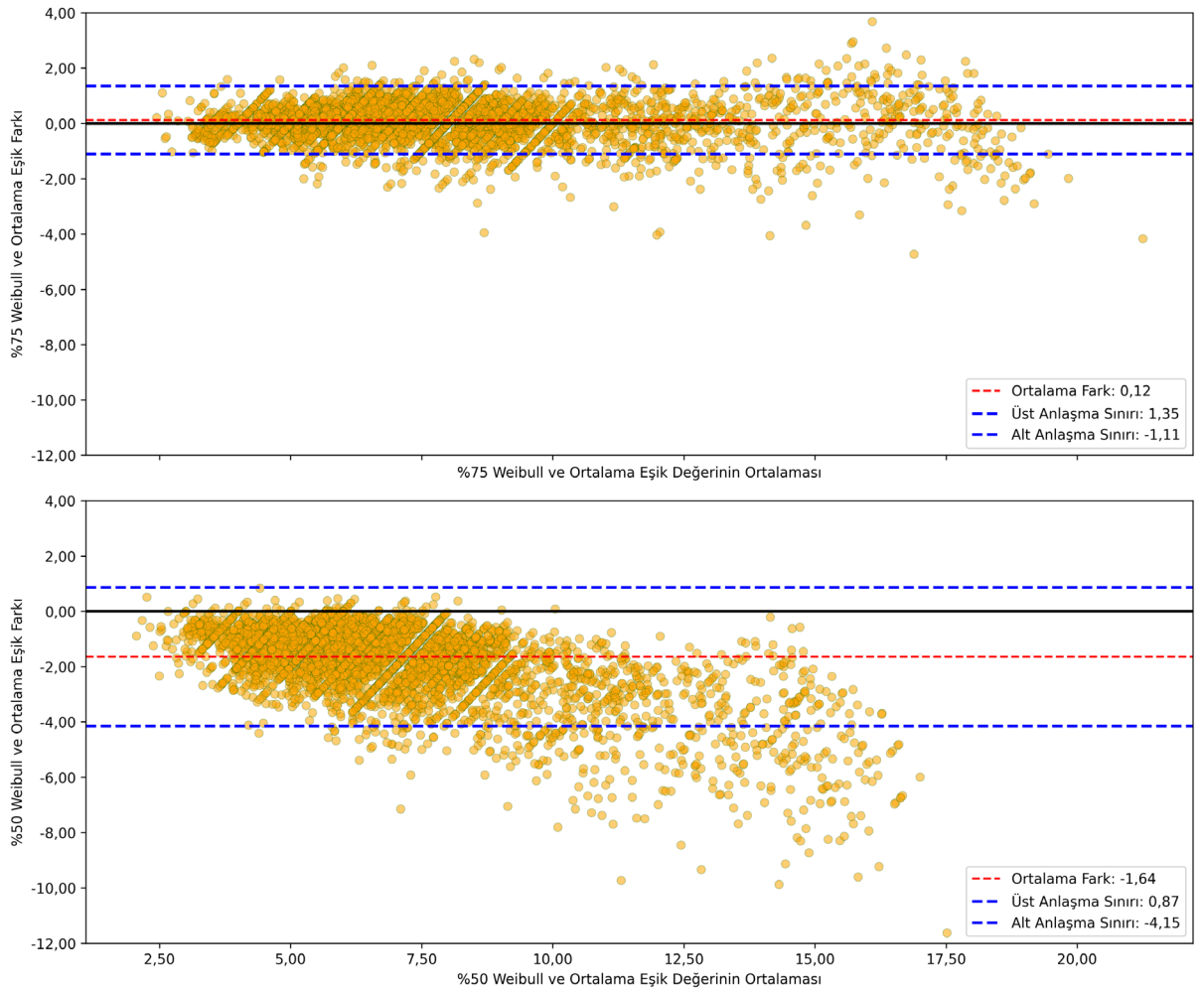
M: Ortalama, SD: Standart Sapma, HL: Hosmer-Lemeshow Test, U (%): Dağılıma Uymayan Örneklem Yüzdesi

">99" ifadesi, yüksek ortalamaların tablodaki okunabilirliğini artırmak için kullanılmıştır.

Her test için veri setine en iyi uyum sağlayan fonksiyon koyu olarak işaretlenmiştir.

Weibull CDF modeli en uygun model olarak belirlendikten sonra bu model kullanılarak elde edilen %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiği verileri ortalama eşik hesaplama yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan ikili karşılaştırmalarda ortalama yöntemiyle hesaplanan eşikler ve %75 olasılıkla elde edilen eşikler, %50 olasılıkla elde edilen eşiklerden istatistiksel

olarak anlamlı düzeyde yüksek çıkmıştır ($p < 0,05$). Ortalama eşikler ile %75 olasılıkla eşikler arasında anlamlı farklar gözlenmemiştir ($p > 0,05$). Bu karşılaştırmanın oldukça fazla kategori arasında yapıldığından karşılaştırmanın bulgularını sadeleştirmek adına Bland-Altman grafiği çizilmiştir (Şekil 4.1). Şekilde de görüldüğü üzere %75 olasılıkla eşikler ile ortalama eşik değerleri arasındaki ortalama fark, yüksek değerlere doğru minimal düzeyde artmakla birlikte, 0,12 olarak hesaplanmıştır. Ortalama eşik ile %50 olasılıkla eşik değerleri arasındaki ortalama fark ise, yüksek değerlerde oldukça artmakla birlikte, -1,64 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1: Weibull CDF modelinden elde edilen %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiklerinin ortalama yöntemi ile hesaplanan aralık tespit etme eşikleri ile karşılaştırılması.

4.3. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KULAK VE CİNSİYET KATEGORİLERİNDE KARŞILAŞTIRILMASI

Weibull CDF modeli kullanılarak elde edilen aralık tespit etme eşikleri, kulak (sağ-sol) ve cinsiyet (kadın-erkek) kategorilerinde karşılaştırılmıştır. Öncelikle, %50 ve %75 olasılıkla belirlenen aralık tespit etme eşikleri açısından yapılan bağımsız örneklem analizlerinde, cinsiyet açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gözlenmemiştir ($p > 0,05$).

Veri setini sadeleştirmek amacıyla, MATE testinde her bir uyaran frekansı için elde edilen eşiklerin farklı gürültü durumlarındaki ortalamaları alınmıştır. Bu veriler, cinsiyetler arası karşılaştırma sonuçları ile birlikte Tablo 4.6'da sunulmuştur. Aynı tablo, GATE test bulgularının gruplar arası karşılaştırma sonuçlarını da içermektedir. GATE testi sonuçları açısından da cinsiyetler arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p > 0,05$).

Bağımlı örneklemeler kullanılarak yapılan analizlerde, kulaklar arası GATE ve MATE testi aralık tespit etme eşikleri karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmalarda istatistiksel anlamlı farklılıklar bulunmamıştır ($p > 0,05$). Aralık tespit etme eşiklerinin kulaklar arası karşılaştırmalarına ait tanımlayıcı bulgular Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Kulaklar arası karşılaştırmalar doğası gereği bağımlı bir örneklem içerdiğinden, sağ ve sol kulaktan elde edilen verilerin normal işitmeye sahip bireylerde birbiri ile uyumunu değerlendirmek amacıyla Bland-Altman grafiği kullanılmıştır. Weibull CDF modeli ile elde edilen %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiklerinin kulaklar arası ortalama farkları -0,01 olarak belirlenmiştir. Kulaklar arası uyumu gösteren Bland-Altman grafiği Şekil 4.2'de sunulmuştur.

Tablo 4.6: Cinsiyete göre gürültüde ve modifiye aralık tespit etme eşiği kıyaslamaları (Weibull fonksiyonundan elde edilen %50 ve %75 olasılıkla eşikler).

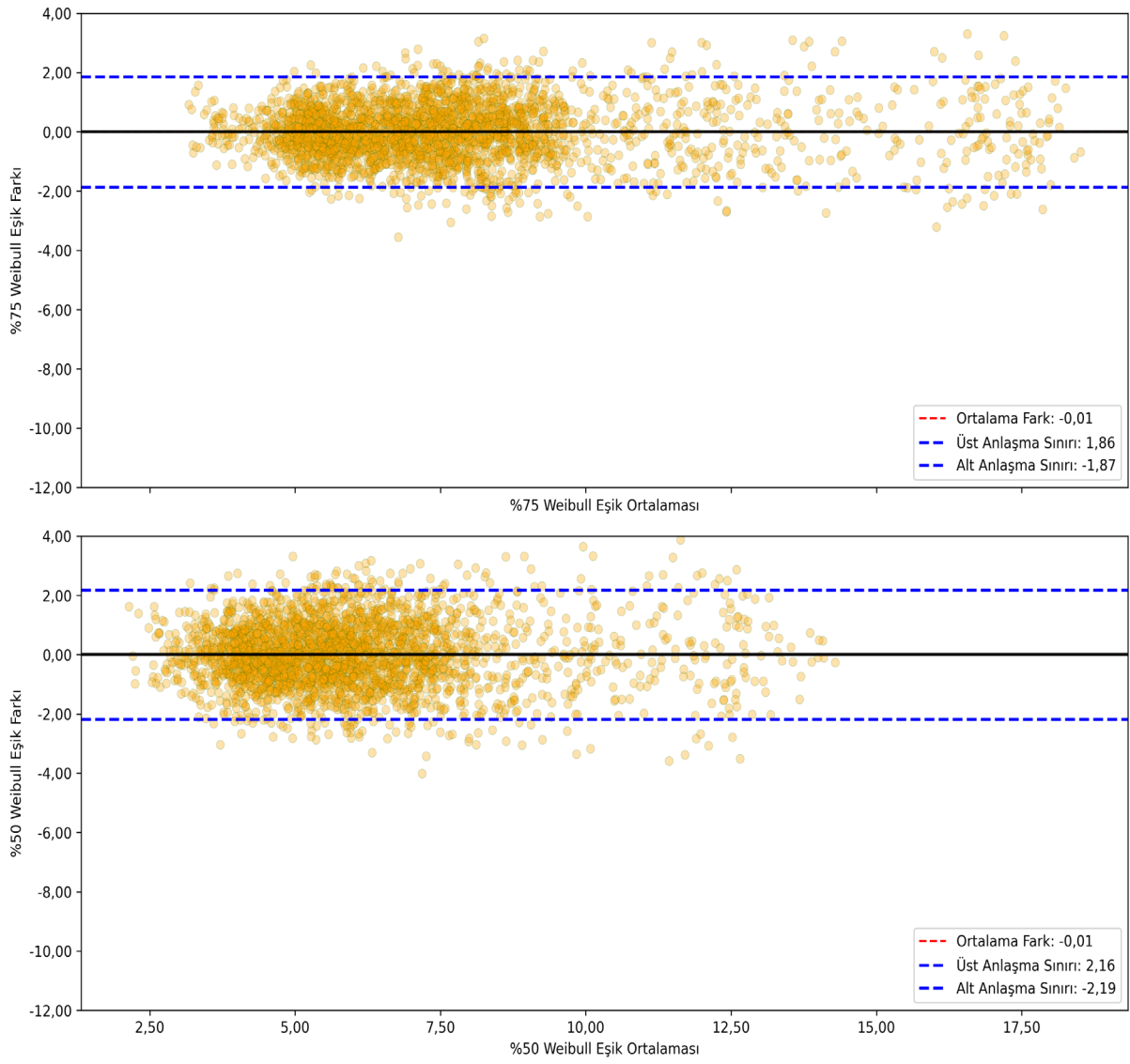
	Kadın				Erkek				t	p	Toplam			
	N	M	SD	CI	N	M	SD	CI			N	M	SD	CI
Gürültüde Aralık Tespit Etme (ms)														
%50 Olasılıkla Eşik	30	2,96	0,18	[2,91-3,01]	30	2,94	0,20	[2,89-2,99]	0,70	0,485	60	2,95	0,19	[2,91-2,98]
%75 Olasılıkla Eşik	30	3,19	0,19	[3,14-3,24]	30	3,19	0,19	[3,11-3,22]	0,68	0,495	60	3,18	0,20	[3,14-3,21]
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)														
250 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	5,47	2,00	[5,29-5,65]	30	5,49	2,08	[5,31-5,68]	0,45	0,790	60	5,48	2,04	[5,35-5,61]
%75 Olasılıkla Eşik	30	7,07	2,58	[6,84-7,30]	30	7,11	2,67	[6,87-7,35]	1,01	0,409	60	7,09	2,62	[6,93-7,26]
500 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	6,38	1,14	[6,28-6,48]	30	6,42	1,23	[6,31-6,53]	0,79	0,281	60	6,40	1,19	[6,33-6,48]
%75 Olasılıkla Eşik	30	8,21	1,44	[8,08-8,34]	30	8,24	1,48	[8,11-8,38]	0,83	0,808	60	8,23	1,46	[8,13-8,32]
1000 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	5,75	1,64	[5,61-5,90]	30	5,66	1,59	[5,52-5,80]	1,68	0,650	60	5,71	1,61	[5,61-5,81]
%75 Olasılıkla Eşik	30	7,59	2,14	[7,39-7,78]	30	7,54	2,10	[7,35-7,72]	1,08	0,430	60	7,56	2,12	[7,43-7,70]
2000 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	5,26	2,13	[5,07-5,45]	30	5,29	2,14	[5,09-5,48]	0,47	0,093	60	5,27	2,13	[5,14-5,41]
%75 Olasılıkla Eşik	30	6,94	2,89	[6,68-7,20]	30	6,93	2,87	[6,67-7,19]	0,24	0,638	60	6,93	2,88	[6,75-7,12]
4000 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	6,57	2,36	[6,36-6,78]	30	6,58	2,35	[6,37-6,79]	0,27	0,313	60	6,58	2,35	[6,43-6,73]
%75 Olasılıkla Eşik	30	8,54	3,29	[8,25-8,84]	30	8,53	3,30	[8,23-8,82]	0,41	0,407	60	8,54	3,29	[8,33-8,74]
8000 Hz Uyarı														
%50 Olasılıkla Eşik	30	6,48	2,56	[6,25-6,71]	30	6,44	2,65	[6,20-6,68]	0,83	0,682	60	6,46	2,60	[6,30-6,63]
%75 Olasılıkla Eşik	30	8,33	3,59	[8,01-8,65]	30	8,29	3,64	[7,96-8,61]	1,06	0,290	60	8,31	3,61	[8,08-8,54]

N: Örneklem Sayısı, M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı

Tablo 4.7: Sağ ve sol kulakların gürültüde ve modifiye aralık tespit etme eşiği kıyaslamaları (Weibull fonksiyonundan elde edilen %50 ve %75 olasılıkla eşikler).

	Sol Kulak				Sağ Kulak				t	p	Toplam			
	N	M	SD	CI	N	M	SD	CI			N	M	SD	CI
Gürültüde Aralık Tespit Etme (ms)														
%50 Olasılıkla Eşik	60	2,98	0,18	[2,93-3,02]	60	2,92	0,19	[2,87-2,97]	1,63	0,108	120	2,95	0,19	[2,91-2,98]
%75 Olasılıkla Eşik	60	3,20	0,19	[3,15-3,25]	60	3,16	0,20	[3,10-3,21]	1,11	0,273	120	3,18	0,20	[3,14-3,21]
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)														
250 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	5,49	2,06	[5,31-5,68]	60	5,47	2,02	[5,29-5,65]	0,46	0,852	120	5,48	2,04	[5,35-5,61]
%75 Olasılıkla Eşik	60	7,10	2,63	[6,86-7,33]	60	7,08	2,61	[6,85-7,32]	0,33	0,809	120	7,09	2,62	[6,93-7,26]
500 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	6,37	1,20	[6,26-6,47]	60	6,44	1,17	[6,33-6,54]	1,32	0,065	120	6,40	1,19	[6,33-6,48]
%75 Olasılıkla Eşik	60	8,18	1,45	[8,06-8,31]	60	8,27	1,48	[8,14-8,40]	1,76	0,788	120	8,23	1,46	[8,13-8,32]
1000 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	5,77	1,60	[5,63-5,91]	60	5,64	1,62	[5,50-5,79]	1,90	0,648	120	5,71	1,61	[5,61-5,81]
%75 Olasılıkla Eşik	60	7,61	2,08	[7,42-7,80]	60	7,51	2,16	[7,32-7,70]	1,85	0,188	120	7,56	2,12	[7,43-7,70]
2000 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	5,27	2,12	[5,08-5,46]	60	5,28	2,14	[5,09-5,47]	0,20	0,058	120	5,27	2,13	[5,14-5,41]
%75 Olasılıkla Eşik	60	6,93	2,85	[6,67-7,18]	60	6,94	2,92	[6,68-7,20]	0,27	0,839	120	6,93	2,88	[6,75-7,12]
4000 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	6,58	2,34	[6,37-6,79]	60	6,57	2,38	[6,36-6,78]	0,19	0,742	120	6,58	2,35	[6,43-6,73]
%75 Olasılıkla Eşik	60	8,56	3,28	[8,27-8,85]	60	8,51	3,30	[8,21-8,81]	1,13	0,079	120	8,54	3,29	[8,33-8,74]
8000 Hz Uyaran														
%50 Olasılıkla Eşik	60	6,46	2,60	[6,22-6,69]	60	6,47	2,61	[6,23-6,70]	0,24	0,257	120	6,46	2,60	[6,30-6,63]
%75 Olasılıkla Eşik	60	8,30	3,64	[7,97-8,62]	60	8,32	3,59	[8,00-8,64]	0,66	0,509	120	8,31	3,61	[8,08-8,54]

N: Örneklem Sayısı, M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı



Şekil 4.2: Weibull CDF modeli ile belirlenen aralık tespit etme eşiklerinin kulaklar arası uyumunu gösteren Bland-Altman grafiği.

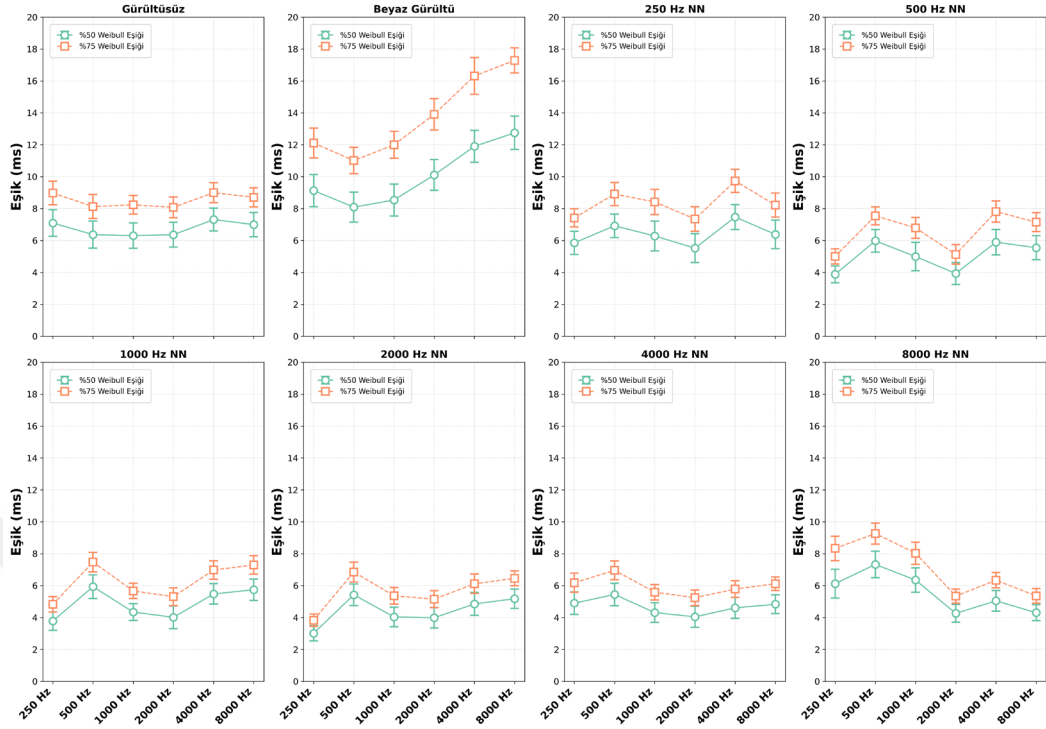
4.4. FARKLI GÜRÜLTÜ DURUMLARINDA DEĞİŞEN UYARAN FREKANSINA GÖRE ELDE EDİLEN ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Weibull CDF modeli ile %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri ile ortalama yöntemi kullanılarak hesaplanan aralık tespit etme eşikleri MATE testinde gürültü durumları sabit tutulup farklı uyaran frekansları için tekrarlayan testlerde karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda tüm gürültü durumlarında MATE testi açısından uyaran frekansları arası %50-%75 olasılıkla eşik ve ortalama aralık tespit etme eşikleri açısından istatistiksel anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir [F (5,295), $p < 0,001$]. Farklı gürültü durumlarında elde edilen aralık tespit etme eşiklerine ait tanımlayıcı bulgular ile uyaranlar arası karşılaştırmalar, sağ ve sol kulak için sırasıyla, Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11’de sıralanmıştır.

İstatistiksel anlamlı farklar tespit edilen veri gruplarında hangi gruplar arasında anlamlı farkların bulunduğunu belirlemek için yapılan post-hoc analizlerde birçok frekanstaki uyaranın diğer frekanslardaki uyaranlar ile anlamlı farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir ($p < 0,05$). Yapılan ikili karşılaştırmaların çoğu anlamlı farklar içerdiğinden karmaşık bir yapıdadır. Bu nedenle ikili karşılaştırmaları tek tek karşılaştırmak yerine her gürültü durumu için en düşük ortalama aralık tespit etme eşiği ve güven aralığına sahip frekanslar Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11’de koyu olarak işaretlenmiştir. Ayrıca farklı gürültü durumuna göre farklı frekanslarda aralık tespit etme eşikleri sağ ve sol kulak için sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te sunulmuştur.

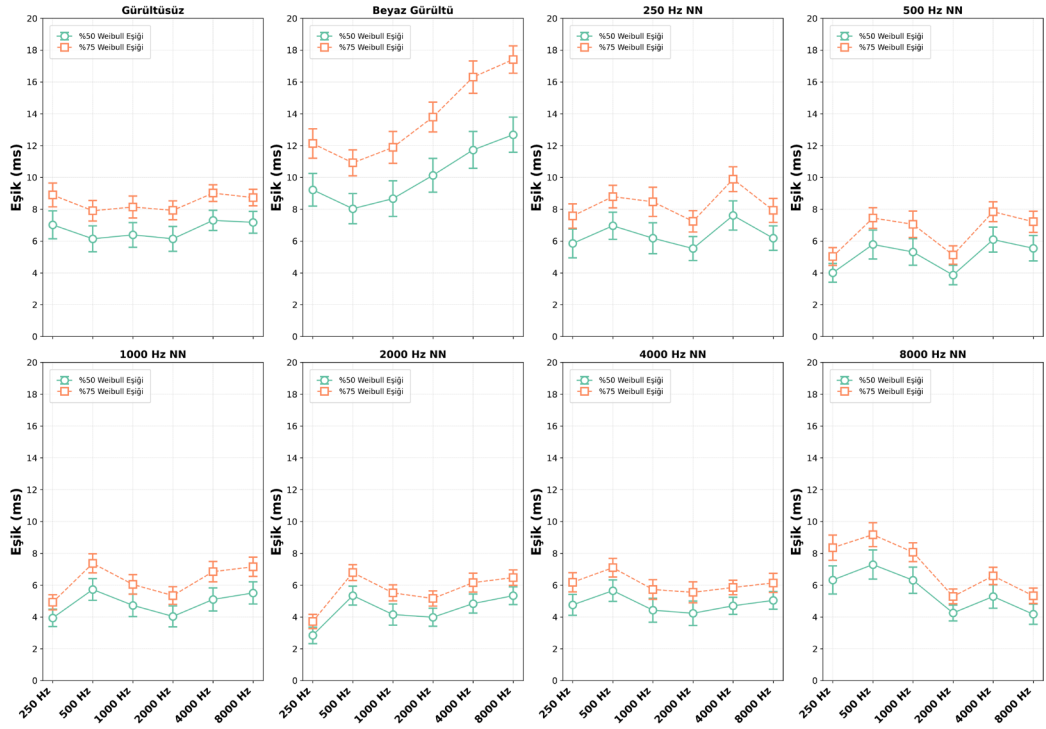
Gürültüsüz durumda da uyaran frekansları açısından anlamlı farklılıklar bulunduğundan bahsi geçen tablo ve şekiller gürültü varlığında elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültüsüz duruma göre görece değişimini yansıtmamaktadır. Bu görece değişimi gösterebilmek adına tüm gürültü durumlarında elde edilen aralık tespit etme eşiklerine gürültüsüz durumda elde edilen eşiklere göre normalizasyon uygulanmıştır. Bu normalizasyon sonrası elde edilen bulgular Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görülmektedir. Bu şekillerde her gürültü durumu için elde edilen en düşük aralık tespit etme eşiğinin frekansı * ile işaretlenmiştir ($p < 0,05$).

Sağ Kulak Gürültü Koşulları Karşılaştırması



Şekil 4.3: Sağ kulak için farklı gürültü durumlarında aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması.

Sol Kulak Gürültü Koşulları Karşılaştırması



Şekil 4.4: Sol kulak için farklı gürültü durumlarında aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması.

Tablo 4.8: Sağ kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması.

Testler ve Kullanılan Uyaranlar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Gürültüde Aralık Tespit Etme (ms)	2,92	0,19	[2,87-2,97]	3,16	0,20	[3,10-3,21]	3,65	0,19	[3,60-3,70]
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
Gürültüsüz									
250 Hz Saf Ses	7,10	0,83	[6,88-7,31]	8,97	0,74	[8,78-9,17]	8,67	0,94	[8,43-8,91]
500 Hz Saf Ses	6,37	0,85	[6,15-6,59]	8,13	0,75	[7,93-8,32]	7,91	0,96	[7,66-8,16]
1000 Hz Saf Ses	6,30	0,80	[6,10-6,51]	8,24	0,58	[8,08-8,39]	8,07	0,78	[7,87-8,27]
2000 Hz Saf Ses	6,36	0,78	[6,16-6,56]	8,08	0,65	[7,91-8,25]	7,80	0,84	[7,58-8,01]
4000 Hz Saf Ses	7,31	0,72	[7,13-7,50]	9,00	0,63	[8,83-9,16]	8,67	0,88	[8,44-8,90]
8000 Hz Saf Ses	7,00	0,76	[6,80-7,19]	8,70	0,60	[8,55-8,86]	8,44	0,80	[8,23-8,64]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 19,56, p < 0.001			F(5, 295) = 24,31, p < 0.001			F(5, 295) = 11,32, p < 0.001		
Beyaz Gürültü									
250 Hz Saf Ses	9,13	1,00	[8,87-9,39]	12,11	0,93	[11,87-12,35]	12,10	1,27	[11,78-12,43]
500 Hz Saf Ses	8,09	0,94	[7,85-8,34]	11,01	0,82	[10,80-11,22]	11,17	1,16	[10,87-11,47]
1000 Hz Saf Ses	8,54	1,00	[8,28-8,79]	12,00	0,84	[11,78-12,21]	12,27	1,46	[11,89-12,65]
2000 Hz Saf Ses	10,11	0,97	[9,86-10,36]	13,91	0,99	[13,65-14,16]	13,91	1,47	[13,53-14,29]
4000 Hz Saf Ses	11,90	1,00	[11,64-12,16]	16,31	1,15	[16,02-16,61]	16,14	1,70	[15,70-16,58]
8000 Hz Saf Ses	12,75	1,04	[12,48-13,02]	17,28	0,79	[17,08-17,49]	17,09	1,48	[16,71-17,47]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 215,36, p < 0.001			F(5, 295) = 427,98, p < 0.001			F(5, 295) = 160,76, p < 0.001		
250 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	5,86	0,73	[5,67-6,04]	7,42	0,57	[7,27-7,56]	7,11	0,74	[6,92-7,30]
500 Hz Saf Ses	6,92	0,73	[6,73-7,11]	8,91	0,73	[8,72-9,10]	8,80	0,88	[8,57-9,02]
1000 Hz Saf Ses	6,28	0,93	[6,04-6,52]	8,41	0,79	[8,21-8,62]	8,51	0,98	[8,25-8,76]
2000 Hz Saf Ses	5,52	0,90	[5,29-5,75]	7,35	0,77	[7,15-7,55]	7,26	0,86	[7,04-7,48]
4000 Hz Saf Ses	7,47	0,78	[7,27-7,67]	9,74	0,73	[9,55-9,92]	9,78	0,97	[9,53-10,03]
8000 Hz Saf Ses	6,38	0,89	[6,15-6,61]	8,22	0,75	[8,03-8,41]	7,94	0,98	[7,69-8,20]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 42,52, p < 0.001			F(5, 295) = 87,73, p < 0.001			F(5, 295) = 65,7, p < 0.001		
500 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	3,88	0,53	[3,74-4,02]	5,00	0,48	[4,88-5,13]	4,95	0,62	[4,79-5,11]
500 Hz Saf Ses	5,98	0,71	[5,80-6,16]	7,55	0,56	[7,40-7,69]	7,25	0,66	[7,08-7,42]
1000 Hz Saf Ses	4,99	0,89	[4,76-5,22]	6,79	0,66	[6,62-6,96]	6,64	0,86	[6,42-6,86]
2000 Hz Saf Ses	3,93	0,69	[3,76-4,11]	5,13	0,61	[4,97-5,29]	5,12	0,64	[4,96-5,29]
4000 Hz Saf Ses	5,90	0,79	[5,69-6,10]	7,82	0,66	[7,64-7,99]	7,70	0,80	[7,50-7,91]
8000 Hz Saf Ses	5,55	0,75	[5,35-5,74]	7,15	0,59	[6,99-7,30]	6,83	0,59	[6,67-6,98]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 107,39, p < 0.001			F(5, 295) = 279,63, p < 0.001			F(5, 295) = 158,15, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.9: Sağ kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması (Tablo 4.8'in devamı)

Testler ve Kullanılan Uyaranlar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
1000 Hz NN									
250 Hz	3,78	0,57	[3,63-3,93]	4,82	0,48	[4,70-4,95]	4,84	0,59	[4,68-4,99]
500 Hz	5,93	0,74	[5,74-6,12]	7,48	0,61	[7,32-7,63]	7,18	0,66	[7,01-7,35]
1000 Hz	4,34	0,53	[4,21-4,48]	5,67	0,48	[5,55-5,79]	5,63	0,63	[5,46-5,79]
2000 Hz	4,01	0,72	[3,83-4,20]	5,31	0,55	[5,17-5,45]	5,44	0,54	[5,30-5,58]
4000 Hz	5,48	0,64	[5,31-5,65]	6,98	0,58	[6,83-7,13]	6,74	0,77	[6,54-6,94]
8000 Hz	5,74	0,67	[5,57-5,91]	7,30	0,58	[7,15-7,45]	7,11	0,78	[6,91-7,31]
F - p	F(5, 295) = 119,67, p < 0.001			F(5, 295) = 253,29, p < 0.001			F(5, 295) = 125,18, p < 0.001		
2000 Hz NN									
250 Hz	3,01	0,47	[2,89-3,13]	3,83	0,39	[3,73-3,93]	3,74	0,47	[3,62-3,86]
500 Hz	5,43	0,68	[5,25-5,60]	6,85	0,62	[6,69-7,01]	6,58	0,68	[6,40-6,76]
1000 Hz	4,04	0,62	[3,88-4,20]	5,36	0,52	[5,23-5,50]	5,33	0,56	[5,18-5,47]
2000 Hz	3,99	0,64	[3,82-4,15]	5,15	0,53	[5,01-5,29]	5,03	0,63	[4,87-5,19]
4000 Hz	4,85	0,72	[4,66-5,04]	6,12	0,61	[5,96-6,28]	5,87	0,51	[5,74-6,00]
8000 Hz	5,18	0,60	[5,02-5,34]	6,46	0,46	[6,34-6,58]	6,20	0,45	[6,09-6,32]
F - p	F(5, 295) = 130,07, p < 0.001			F(5, 295) = 248,67, p < 0.001			F(5, 295) = 194,24, p < 0.001		
4000 Hz NN									
250 Hz	4,90	0,70	[4,72-5,08]	6,18	0,60	[6,03-6,34]	5,89	0,66	[5,72-6,06]
500 Hz	5,45	0,70	[5,26-5,63]	6,96	0,59	[6,81-7,11]	6,64	0,69	[6,46-6,82]
1000 Hz	4,31	0,62	[4,15-4,47]	5,59	0,48	[5,47-5,71]	5,51	0,43	[5,40-5,62]
2000 Hz	4,04	0,66	[3,87-4,21]	5,24	0,49	[5,12-5,37]	5,28	0,65	[5,11-5,45]
4000 Hz	4,61	0,66	[4,44-4,78]	5,79	0,53	[5,65-5,92]	5,59	0,46	[5,48-5,71]
8000 Hz	4,83	0,59	[4,68-4,99]	6,12	0,43	[6,01-6,23]	5,87	0,41	[5,76-5,97]
F - p	F(5, 295) = 33,04, p < 0.001			F(5, 295) = 78,54, p < 0.001			F(5, 295) = 42,64, p < 0.001		
8000 Hz NN									
250 Hz	6,13	0,90	[5,89-6,36]	8,33	0,76	[8,14-8,53]	8,36	0,98	[8,10-8,61]
500 Hz	7,33	0,83	[7,11-7,54]	9,26	0,66	[9,09-9,43]	8,96	0,82	[8,75-9,17]
1000 Hz	6,35	0,77	[6,15-6,55]	8,03	0,69	[7,85-8,21]	7,79	0,88	[7,56-8,02]
2000 Hz	4,26	0,55	[4,12-4,41]	5,35	0,45	[5,23-5,46]	5,18	0,42	[5,07-5,29]
4000 Hz	5,05	0,65	[4,88-5,21]	6,34	0,48	[6,22-6,46]	6,10	0,51	[5,97-6,24]
8000 Hz	4,31	0,50	[4,18-4,44]	5,36	0,45	[5,24-5,48]	5,26	0,45	[5,14-5,38]
F - p	F(5, 295) = 175,23, p < 0.001			F(5, 295) = 474,09, p < 0.001			F(5, 295) = 312,62, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.10: Sol kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması.

Testler ve Kullanılan Uyaranlar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Gürültüde Aralık Tespit Etme (ms)	2,98	0,18	[2,93-3,02]	3,20	0,19	[3,15-3,25]	3,64	0,20	[3,59-3,69]
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
Gürültüsüz									
250 Hz Saf Ses	7,02	0,88	[6,79-7,25]	8,89	0,75	[8,70-9,09]	8,59	0,90	[8,36-8,82]
500 Hz Saf Ses	6,14	0,81	[5,93-6,35]	7,90	0,65	[7,74-8,07]	7,72	0,81	[7,51-7,93]
1000 Hz Saf Ses	6,39	0,77	[6,19-6,59]	8,14	0,70	[7,96-8,32]	7,97	0,80	[7,76-8,18]
2000 Hz Saf Ses	6,14	0,78	[5,94-6,34]	7,93	0,60	[7,77-8,08]	7,73	0,71	[7,54-7,91]
4000 Hz Saf Ses	7,30	0,63	[7,14-7,46]	9,01	0,52	[8,88-9,15]	8,75	0,80	[8,54-8,96]
8000 Hz Saf Ses	7,18	0,69	[7,00-7,36]	8,73	0,52	[8,60-8,87]	8,37	0,67	[8,20-8,54]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 29,73, p < 0.001			F(5, 295) = 37,42, p < 0.001			F(5, 295) = 18,49, p < 0.001		
Beyaz Gürültü									
250 Hz Saf Ses	9,22	1,03	[8,96-9,49]	12,13	0,93	[11,89-12,37]	11,99	1,18	[11,69-12,30]
500 Hz Saf Ses	8,03	0,95	[7,79-8,28]	10,92	0,82	[10,70-11,13]	11,19	1,06	[10,91-11,46]
1000 Hz Saf Ses	8,67	1,12	[8,38-8,96]	11,88	1,00	[11,63-12,14]	12,12	1,39	[11,76-12,48]
2000 Hz Saf Ses	10,13	1,06	[9,86-10,41]	13,79	0,94	[13,55-14,04]	13,84	1,33	[13,50-14,19]
4000 Hz Saf Ses	11,73	1,16	[11,43-12,03]	16,30	1,02	[16,04-16,56]	15,97	1,64	[15,55-16,39]
8000 Hz Saf Ses	12,68	1,10	[12,40-12,97]	17,41	0,86	[17,19-17,63]	17,40	1,69	[16,96-17,84]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 166,97, p < 0.001			F(5, 295) = 454,17, p < 0.001			F(5, 295) = 182,15, p < 0.001		
250 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	5,85	0,91	[5,61-6,08]	7,58	0,76	[7,38-7,77]	7,47	0,89	[7,24-7,70]
500 Hz Saf Ses	6,96	0,85	[6,74-7,18]	8,79	0,71	[8,61-8,98]	8,61	0,87	[8,38-8,84]
1000 Hz Saf Ses	6,18	0,97	[5,93-6,43]	8,47	0,92	[8,23-8,70]	8,67	1,24	[8,35-8,99]
2000 Hz Saf Ses	5,53	0,75	[5,34-5,72]	7,24	0,67	[7,06-7,41]	7,11	0,82	[6,90-7,32]
4000 Hz Saf Ses	7,61	0,92	[7,37-7,85]	9,89	0,78	[9,69-10,09]	9,74	1,10	[9,45-10,02]
8000 Hz Saf Ses	6,18	0,77	[5,98-6,38]	7,93	0,75	[7,73-8,12]	7,66	0,95	[7,42-7,91]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 49,62, p < 0.001			F(5, 295) = 95,5, p < 0.001			F(5, 295) = 55,88, p < 0.001		
500 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	4,00	0,59	[3,85-4,15]	5,03	0,56	[4,88-5,17]	4,88	0,58	[4,73-5,02]
500 Hz Saf Ses	5,79	0,91	[5,55-6,02]	7,45	0,64	[7,28-7,61]	7,29	0,81	[7,08-7,49]
1000 Hz Saf Ses	5,31	0,83	[5,10-5,53]	7,05	0,83	[6,84-7,27]	7,05	1,01	[6,78-7,31]
2000 Hz Saf Ses	3,86	0,62	[3,70-4,02]	5,12	0,58	[4,97-5,27]	5,11	0,62	[4,95-5,27]
4000 Hz Saf Ses	6,09	0,78	[5,89-6,29]	7,84	0,63	[7,68-8,01]	7,67	0,76	[7,47-7,87]
8000 Hz Saf Ses	5,55	0,80	[5,34-5,75]	7,21	0,67	[7,04-7,39]	7,21	0,87	[6,99-7,44]
<i>F - p</i>	F(5, 295) = 90,63, p < 0.001			F(5, 295) = 201,05, p < 0.001			F(5, 295) = 131,1, p < 0.001		

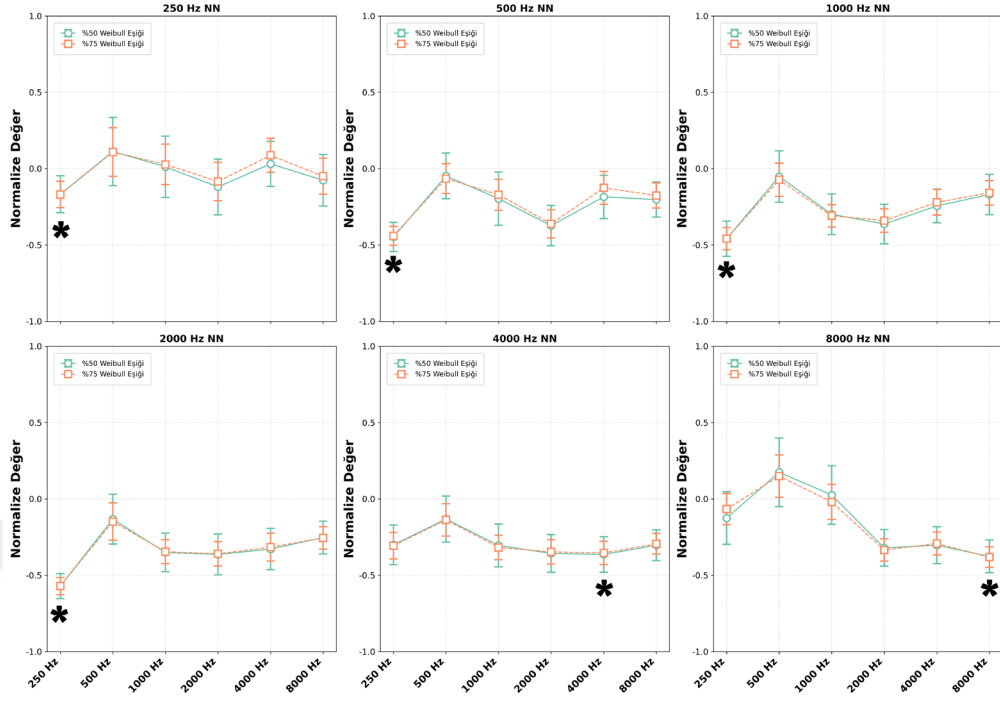
M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.11: Sol kulak için çeşitli yöntemlerle elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin farklı gürültü durumlarında uyaranlar arası karşılaştırılması (Tablo 4.10'un devamı).

Testler ve Kullanılan Uyaranlar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
1000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	3,94	0,54	[3,80-4,08]	4,92	0,48	[4,79-5,04]	4,89	0,51	[4,75-5,02]
500 Hz Saf Ses	5,73	0,69	[5,55-5,90]	7,37	0,60	[7,21-7,52]	7,21	0,86	[6,99-7,43]
1000 Hz Saf Ses	4,73	0,71	[4,55-4,91]	6,04	0,62	[5,88-6,20]	5,89	0,60	[5,73-6,04]
2000 Hz Saf Ses	4,03	0,66	[3,86-4,20]	5,34	0,55	[5,20-5,49]	5,30	0,57	[5,15-5,45]
4000 Hz Saf Ses	5,10	0,73	[4,91-5,29]	6,85	0,64	[6,68-7,01]	6,84	0,91	[6,60-7,07]
8000 Hz Saf Ses	5,51	0,70	[5,33-5,69]	7,15	0,61	[7,00-7,31]	7,00	0,85	[6,78-7,23]
F - p	F(5, 295) = 73,67, p < 0.001			F(5, 295) = 176,83, p < 0.001			F(5, 295) = 96,4, p < 0.001		
2000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	2,84	0,52	[2,71-2,98]	3,71	0,45	[3,59-3,83]	3,68	0,57	[3,54-3,83]
500 Hz Saf Ses	5,34	0,59	[5,19-5,50]	6,79	0,51	[6,66-6,92]	6,63	0,53	[6,49-6,77]
1000 Hz Saf Ses	4,15	0,66	[3,98-4,32]	5,51	0,50	[5,38-5,64]	5,48	0,59	[5,32-5,63]
2000 Hz Saf Ses	3,98	0,57	[3,83-4,13]	5,16	0,48	[5,04-5,28]	5,09	0,55	[4,95-5,23]
4000 Hz Saf Ses	4,84	0,60	[4,68-4,99]	6,16	0,60	[6,00-6,31]	6,03	0,66	[5,86-6,20]
8000 Hz Saf Ses	5,34	0,56	[5,19-5,48]	6,47	0,49	[6,35-6,60]	6,08	0,47	[5,96-6,21]
F - p	F(5, 295) = 165,68, p < 0.001			F(5, 295) = 291,03, p < 0.001			F(5, 295) = 193,7, p < 0.001		
4000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	4,76	0,66	[4,59-4,93]	6,18	0,60	[6,02-6,34]	5,98	0,63	[5,81-6,14]
500 Hz Saf Ses	5,65	0,67	[5,48-5,83]	7,09	0,59	[6,94-7,25]	6,74	0,58	[6,59-6,89]
1000 Hz Saf Ses	4,42	0,75	[4,23-4,62]	5,72	0,62	[5,57-5,88]	5,64	0,55	[5,50-5,78]
2000 Hz Saf Ses	4,23	0,77	[4,03-4,43]	5,55	0,66	[5,38-5,72]	5,49	0,58	[5,34-5,64]
4000 Hz Saf Ses	4,70	0,54	[4,56-4,84]	5,85	0,45	[5,74-5,97]	5,68	0,44	[5,57-5,80]
8000 Hz Saf Ses	5,04	0,55	[4,90-5,18]	6,14	0,60	[5,98-6,29]	5,89	0,69	[5,71-6,07]
F - p	F(5, 295) = 34,36, p < 0.001			F(5, 295) = 53,06, p < 0.001			F(5, 295) = 34,75, p < 0.001		
8000 Hz NN									
250 Hz Saf Ses	6,32	0,88	[6,10-6,55]	8,35	0,79	[8,15-8,56]	8,39	1,03	[8,13-8,66]
500 Hz Saf Ses	7,29	0,92	[7,05-7,53]	9,17	0,75	[8,98-9,37]	8,87	0,89	[8,64-9,10]
1000 Hz Saf Ses	6,31	0,82	[6,09-6,52]	8,07	0,59	[7,92-8,22]	7,79	0,78	[7,59-7,99]
2000 Hz Saf Ses	4,25	0,50	[4,12-4,38]	5,29	0,46	[5,17-5,41]	5,20	0,53	[5,06-5,34]
4000 Hz Saf Ses	5,28	0,73	[5,10-5,47]	6,58	0,55	[6,44-6,72]	6,34	0,59	[6,18-6,49]
8000 Hz Saf Ses	4,17	0,63	[4,01-4,33]	5,33	0,49	[5,20-5,45]	5,30	0,42	[5,19-5,40]
F - p	F(5, 295) = 156,89, p < 0.001			F(5, 295) = 406,42, p < 0.001			F(5, 295) = 275,19, p < 0.001		

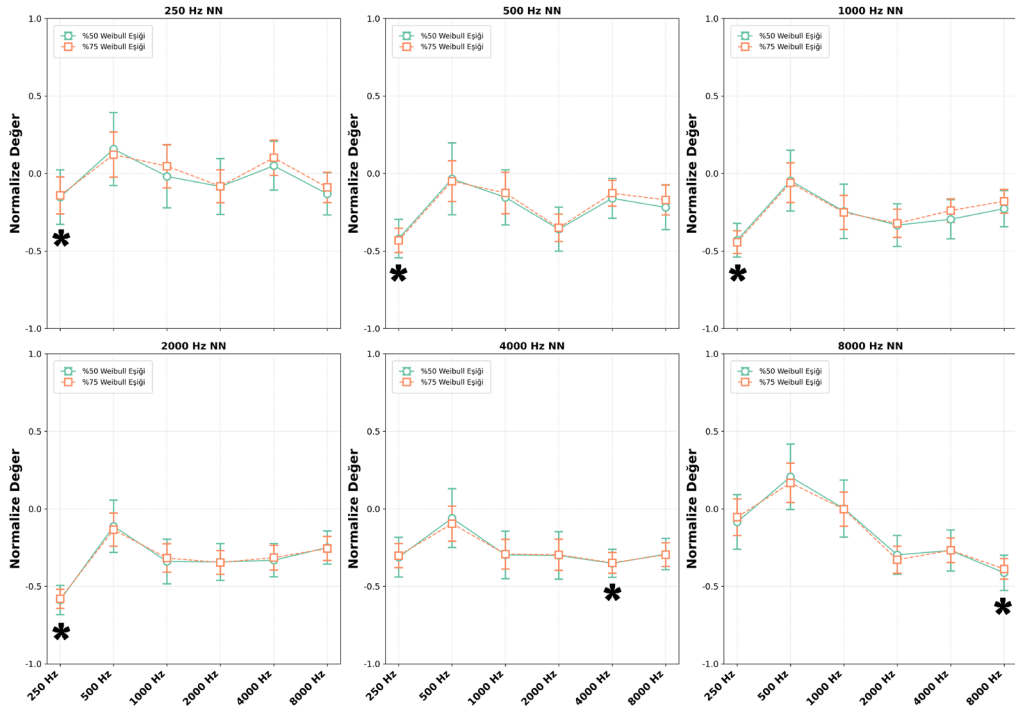
M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Sağ Kulak Gürültü Koşulları Karşılaştırması



Şekil 4.5: Sağ kulak için farklı gürültü durumlarında, gürültüsüz duruma göre normalize edilen, aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (* işareti en düşük eşiği göstermektedir).

Sol Kulak Gürültü Koşulları Karşılaştırması



Şekil 4.6: Sol kulak için farklı gürültü durumlarında, gürültüsüz duruma göre normalize edilen, aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (* işareti en düşük eşiği göstermektedir).

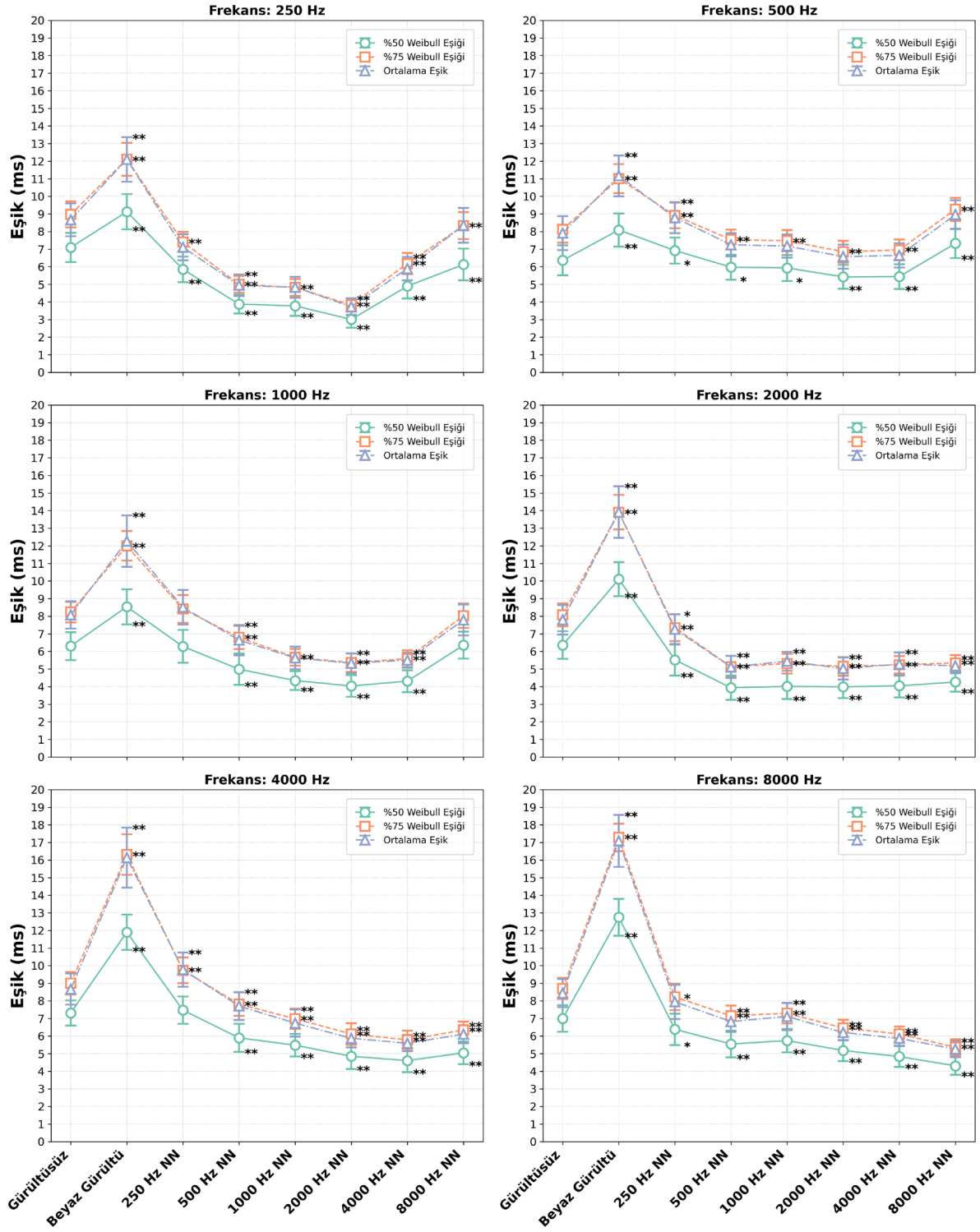
4.5. FARKLI UYARAN FREKANSLARINDA DEĞİŞEN GÜRÜLTÜ DURUMLARINA GÖRE ELDE EDİLEN ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Weibull CDF modeli ile %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri ile ortalama yöntemi kullanılarak hesaplanan aralık tespit etme eşikleri, MATE testinde uyaran frekansları sabit tutulup farklı gürültü durumları için tekrarlayan testlerde karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, MATE testi açısından uyaran frekansları için farklı gürültü durumları arasında %50-%75 olasılıkla eşik ve ortalama aralık tespit etme eşikleri açısından istatistiksel anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir [$F(7, 473), p < 0,001$]. Farklı uyaran frekansları ile değişen gürültü durumlarında elde edilen aralık tespit etme eşiklerine ait tanımlayıcı bulgular ile gürültü durumları arası karşılaştırmalar, sağ ve sol kulak için sırasıyla Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'te sunulmuştur.

İstatistiksel anlamlı farkların tespit edildiği veri gruplarında hangi gruplar arasında anlamlı farkların bulunduğunu belirlemek için yapılan post-hoc analizler, birçok gürültü durumunun aynı frekansta diğer gürültü durumlarıyla anlamlı farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur ($p < 0,05$). İkili karşılaştırmaların çoğunun anlamlı farklar içerdiği ve bu nedenle karmaşık bir yapı sergilediği görülmüştür. Bu nedenle ikili karşılaştırmaları tek tek incelemek yerine, gürültüsüz duruma göre istatistiksel anlamlı farklılıklar gösteren gürültü durumları her uyaran frekansı için Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'te koyu olarak işaretlenmiştir.

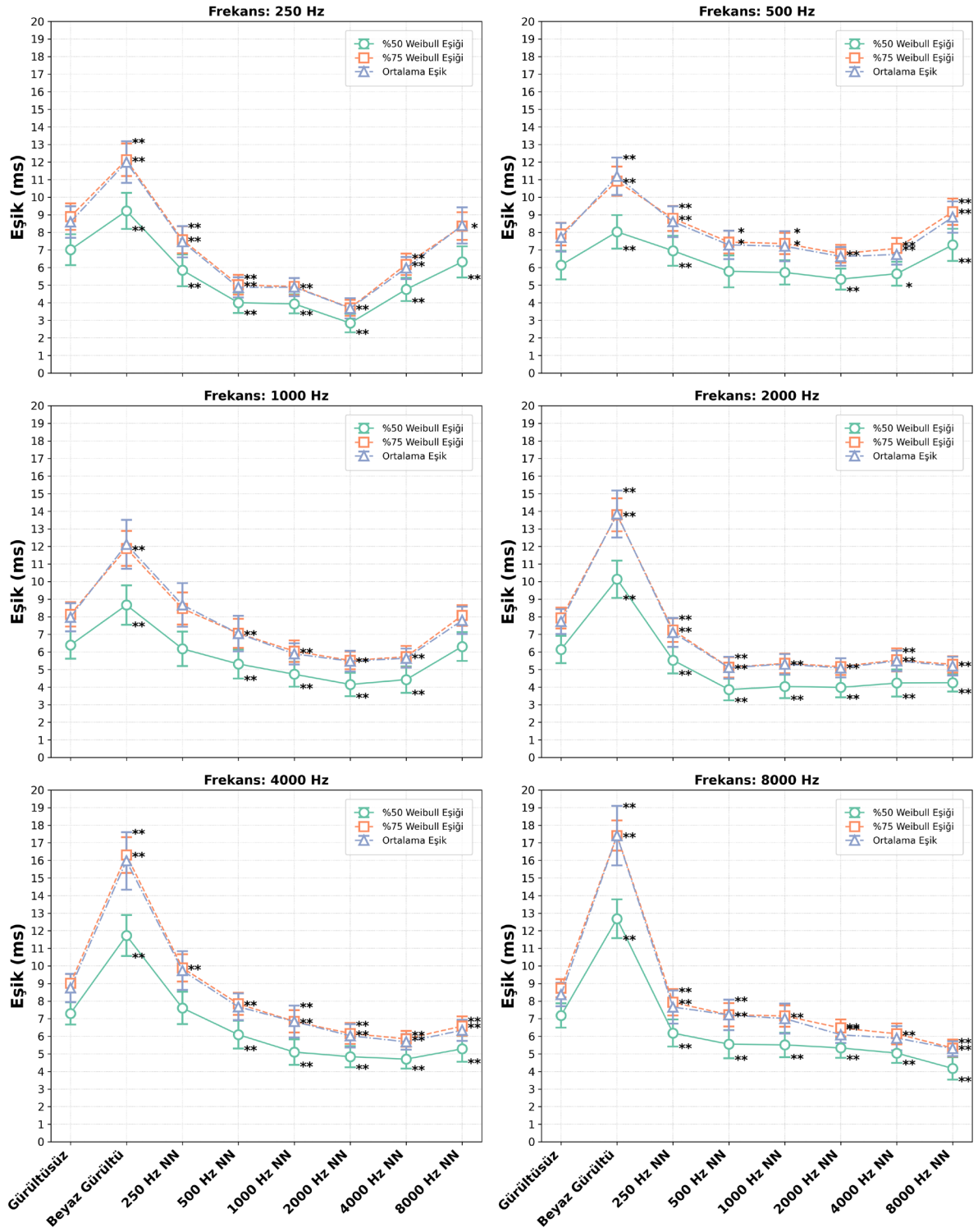
Ayrıca, her frekans için farklı gürültü durumlarına göre aralık tespit etme eşikleri ve karşılaştırmaları, sağ ve sol kulak için sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de görselleştirilmiştir. Bu grafiklerde * işareti $p < 0,05$ ve ** işareti $p < 0,001$ anlamına gelmektedir. Bu işaretler, gürültüsüz duruma göre ilgili gürültü durumunun istatistiksel olarak anlamlı şekilde değiştiğini göstermektedir.

Sağ Kulak Aralık Tespit Etme Eşikleri



Şekil 4.7: Sağ kulakta her uyaran frekansı için farklı gürültü durumlarına ait aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (Karşılaştırma gürültüsüz duruma göre istatistiksel anlamlı farklı durumları göstermektedir, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,001$).

Sol Kulak Aralık Tespit Etme Eşikleri



Şekil 4.8: Sol kulakta her uyarın frekansı için farklı gürültü durumlarına ait aralık tespit etme eşiklerinin karşılaştırılması (Karşılaştırma gürültüsüz duruma göre istatistiksel anlamlı farklı durumları göstermektedir, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,001$).

Tablo 4.12: Sağ kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması.

Testler ve Kullanılan Uyarılar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
250 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,10	0,83	[6,88-7,31]	8,97	0,74	[8,78-9,17]	8,67	0,94	[8,43-8,91]
Beyaz Gürültü	9,13	1,00	[8,87-9,39]	12,11	0,93	[11,87-12,35]	12,10	1,27	[11,78-12,43]
250 Hz NN	5,86	0,73	[5,67-6,04]	7,42	0,57	[7,27-7,56]	7,11	0,74	[6,92-7,30]
500 Hz NN	3,88	0,53	[3,74-4,02]	5,00	0,48	[4,88-5,13]	4,95	0,62	[4,79-5,11]
1000 Hz NN	3,78	0,57	[3,63-3,93]	4,82	0,48	[4,70-4,95]	4,84	0,59	[4,68-4,99]
2000 Hz NN	3,01	0,47	[2,89-3,13]	3,83	0,39	[3,73-3,93]	3,74	0,47	[3,62-3,86]
4000 Hz NN	4,90	0,70	[4,72-5,08]	6,18	0,60	[6,03-6,34]	5,89	0,66	[5,72-6,06]
8000 Hz NN	6,13	0,90	[5,89-6,36]	8,33	0,76	[8,14-8,53]	8,36	0,98	[8,10-8,61]
F - p	F(7, 473) = 454,19, p < 0.001			F(7, 473) = 1106,47, p < 0.001			F(7, 473) = 628,9, p < 0.001		
500 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,37	0,85	[6,15-6,59]	8,13	0,75	[7,93-8,32]	7,91	0,96	[7,66-8,16]
Beyaz Gürültü	8,09	0,94	[7,85-8,34]	11,01	0,82	[10,80-11,22]	11,17	1,16	[10,87-11,47]
250 Hz NN	6,92	0,73	[6,73-7,11]	8,91	0,73	[8,72-9,10]	8,80	0,88	[8,57-9,02]
500 Hz NN	5,98	0,71	[5,80-6,16]	7,55	0,56	[7,40-7,69]	7,25	0,66	[7,08-7,42]
1000 Hz NN	5,93	0,74	[5,74-6,12]	7,48	0,61	[7,32-7,63]	7,18	0,66	[7,01-7,35]
2000 Hz NN	5,43	0,68	[5,25-5,60]	6,85	0,62	[6,69-7,01]	6,58	0,68	[6,40-6,76]
4000 Hz NN	5,45	0,70	[5,26-5,63]	6,96	0,59	[6,81-7,11]	6,64	0,69	[6,46-6,82]
8000 Hz NN	7,33	0,83	[7,11-7,54]	9,26	0,66	[9,09-9,43]	8,96	0,82	[8,75-9,17]
F - p	F(7, 473) = 92,35, p < 0.001			F(7, 473) = 259,7, p < 0.001			F(7, 473) = 192,65, p < 0.001		
1000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,30	0,80	[6,10-6,51]	8,24	0,58	[8,08-8,39]	8,07	0,78	[7,87-8,27]
Beyaz Gürültü	8,54	1,00	[8,28-8,79]	12,00	0,84	[11,78-12,21]	12,27	1,46	[11,89-12,65]
250 Hz NN	6,28	0,93	[6,04-6,52]	8,41	0,79	[8,21-8,62]	8,51	0,98	[8,25-8,76]
500 Hz NN	4,99	0,89	[4,76-5,22]	6,79	0,66	[6,62-6,96]	6,64	0,86	[6,42-6,86]
1000 Hz NN	4,34	0,53	[4,21-4,48]	5,67	0,48	[5,55-5,79]	5,63	0,63	[5,46-5,79]
2000 Hz NN	4,04	0,62	[3,88-4,20]	5,36	0,52	[5,23-5,50]	5,33	0,56	[5,18-5,47]
4000 Hz NN	4,31	0,62	[4,15-4,47]	5,59	0,48	[5,47-5,71]	5,51	0,43	[5,40-5,62]
8000 Hz NN	6,35	0,77	[6,15-6,55]	8,03	0,69	[7,85-8,21]	7,79	0,88	[7,56-8,02]
F - p	F(7, 473) = 226,79, p < 0.001			F(7, 473) = 675,55, p < 0.001			F(7, 473) = 402,45, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.13: Sağ kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması (Tablo 4.12'nin devamı).

Testler ve Kullanılan Uyarılar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
2000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,36	0,78	[6,16-6,56]	8,08	0,65	[7,91-8,25]	7,80	0,84	[7,58-8,01]
Beyaz Gürültü	10,11	0,97	[9,86-10,36]	13,91	0,99	[13,65-14,16]	13,91	1,47	[13,53-14,29]
250 Hz NN	5,52	0,90	[5,29-5,75]	7,35	0,77	[7,15-7,55]	7,26	0,86	[7,04-7,48]
500 Hz NN	3,93	0,69	[3,76-4,11]	5,13	0,61	[4,97-5,29]	5,12	0,64	[4,96-5,29]
1000 Hz NN	4,01	0,72	[3,83-4,20]	5,31	0,55	[5,17-5,45]	5,44	0,54	[5,30-5,58]
2000 Hz NN	3,99	0,64	[3,82-4,15]	5,15	0,53	[5,01-5,29]	5,03	0,63	[4,87-5,19]
4000 Hz NN	4,04	0,66	[3,87-4,21]	5,24	0,49	[5,12-5,37]	5,28	0,65	[5,11-5,45]
8000 Hz NN	4,26	0,55	[4,12-4,41]	5,35	0,45	[5,23-5,46]	5,18	0,42	[5,07-5,29]
F - p	F(7, 473) = 498,22, p < 0.001			F(7, 473) = 1331,72, p < 0.001			F(7, 473) = 845,69, p < 0.001		
4000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,31	0,72	[7,13-7,50]	9,00	0,63	[8,83-9,16]	8,67	0,88	[8,44-8,90]
Beyaz Gürültü	11,90	1,00	[11,64-12,16]	16,31	1,15	[16,02-16,61]	16,14	1,70	[15,70-16,58]
250 Hz NN	7,47	0,78	[7,27-7,67]	9,74	0,73	[9,55-9,92]	9,78	0,97	[9,53-10,03]
500 Hz NN	5,90	0,79	[5,69-6,10]	7,82	0,66	[7,64-7,99]	7,70	0,80	[7,50-7,91]
1000 Hz NN	5,48	0,64	[5,31-5,65]	6,98	0,58	[6,83-7,13]	6,74	0,77	[6,54-6,94]
2000 Hz NN	4,85	0,72	[4,66-5,04]	6,12	0,61	[5,96-6,28]	5,87	0,51	[5,74-6,00]
4000 Hz NN	4,61	0,66	[4,44-4,78]	5,79	0,53	[5,65-5,92]	5,59	0,46	[5,48-5,71]
8000 Hz NN	5,05	0,65	[4,88-5,21]	6,34	0,48	[6,22-6,46]	6,10	0,51	[5,97-6,24]
F - p	F(7, 473) = 615,51, p < 0.001			F(7, 473) = 1416,79, p < 0.001			F(7, 473) = 903,61, p < 0.001		
8000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,00	0,76	[6,80-7,19]	8,70	0,60	[8,55-8,86]	8,44	0,80	[8,23-8,64]
Beyaz Gürültü	12,75	1,04	[12,48-13,02]	17,28	0,79	[17,08-17,49]	17,09	1,48	[16,71-17,47]
250 Hz NN	6,38	0,89	[6,15-6,61]	8,22	0,75	[8,03-8,41]	7,94	0,98	[7,69-8,20]
500 Hz NN	5,55	0,75	[5,35-5,74]	7,15	0,59	[6,99-7,30]	6,83	0,59	[6,67-6,98]
1000 Hz NN	5,74	0,67	[5,57-5,91]	7,30	0,58	[7,15-7,45]	7,11	0,78	[6,91-7,31]
2000 Hz NN	5,18	0,60	[5,02-5,34]	6,46	0,46	[6,34-6,58]	6,20	0,45	[6,09-6,32]
4000 Hz NN	4,83	0,59	[4,68-4,99]	6,12	0,43	[6,01-6,23]	5,87	0,41	[5,76-5,97]
8000 Hz NN	4,31	0,50	[4,18-4,44]	5,36	0,45	[5,24-5,48]	5,26	0,45	[5,14-5,38]
F - p	F(7, 473) = 794,78, p < 0.001			F(7, 473) = 2548,5, p < 0.001			F(7, 473) = 1320,19, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.14: Sol kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması.

Testler ve Kullanılan Uyarılar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
250 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,02	0,88	[6,79-7,25]	8,89	0,75	[8,70-9,09]	8,59	0,90	[8,36-8,82]
Beyaz Gürültü	9,22	1,03	[8,96-9,49]	12,13	0,93	[11,89-12,37]	11,99	1,18	[11,69-12,30]
250 Hz NN	5,85	0,91	[5,61-6,08]	7,58	0,76	[7,38-7,77]	7,47	0,89	[7,24-7,70]
500 Hz NN	4,00	0,59	[3,85-4,15]	5,03	0,56	[4,88-5,17]	4,88	0,58	[4,73-5,02]
1000 Hz NN	3,94	0,54	[3,80-4,08]	4,92	0,48	[4,79-5,04]	4,89	0,51	[4,75-5,02]
2000 Hz NN	2,84	0,52	[2,71-2,98]	3,71	0,45	[3,59-3,83]	3,68	0,57	[3,54-3,83]
4000 Hz NN	4,76	0,66	[4,59-4,93]	6,18	0,60	[6,02-6,34]	5,98	0,63	[5,81-6,14]
8000 Hz NN	6,32	0,88	[6,10-6,55]	8,35	0,79	[8,15-8,56]	8,39	1,03	[8,13-8,66]
F - p	F(7, 473) = 419,46, p < 0.001			F(7, 473) = 949,86, p < 0.001			F(7, 473) = 602,36, p < 0.001		
500 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,14	0,81	[5,93-6,35]	7,90	0,65	[7,74-8,07]	7,72	0,81	[7,51-7,93]
Beyaz Gürültü	8,03	0,95	[7,79-8,28]	10,92	0,82	[10,70-11,13]	11,19	1,06	[10,91-11,46]
250 Hz NN	6,96	0,85	[6,74-7,18]	8,79	0,71	[8,61-8,98]	8,61	0,87	[8,38-8,84]
500 Hz NN	5,79	0,91	[5,55-6,02]	7,45	0,64	[7,28-7,61]	7,29	0,81	[7,08-7,49]
1000 Hz NN	5,73	0,69	[5,55-5,90]	7,37	0,60	[7,21-7,52]	7,21	0,86	[6,99-7,43]
2000 Hz NN	5,34	0,59	[5,19-5,50]	6,79	0,51	[6,66-6,92]	6,63	0,53	[6,49-6,77]
4000 Hz NN	5,65	0,67	[5,48-5,83]	7,09	0,59	[6,94-7,25]	6,74	0,58	[6,59-6,89]
8000 Hz NN	7,29	0,92	[7,05-7,53]	9,17	0,75	[8,98-9,37]	8,87	0,89	[8,64-9,10]
F - p	F(7, 473) = 81,53, p < 0.001			F(7, 473) = 247,54, p < 0.001			F(7, 473) = 194,31, p < 0.001		
1000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,39	0,77	[6,19-6,59]	8,14	0,70	[7,96-8,32]	7,97	0,80	[7,76-8,18]
Beyaz Gürültü	8,67	1,12	[8,38-8,96]	11,88	1,00	[11,63-12,14]	12,12	1,39	[11,76-12,48]
250 Hz NN	6,18	0,97	[5,93-6,43]	8,47	0,92	[8,23-8,70]	8,67	1,24	[8,35-8,99]
500 Hz NN	5,31	0,83	[5,10-5,53]	7,05	0,83	[6,84-7,27]	7,05	1,01	[6,78-7,31]
1000 Hz NN	4,73	0,71	[4,55-4,91]	6,04	0,62	[5,88-6,20]	5,89	0,60	[5,73-6,04]
2000 Hz NN	4,15	0,66	[3,98-4,32]	5,51	0,50	[5,38-5,64]	5,48	0,59	[5,32-5,63]
4000 Hz NN	4,42	0,75	[4,23-4,62]	5,72	0,62	[5,57-5,88]	5,64	0,55	[5,50-5,78]
8000 Hz NN	6,31	0,82	[6,09-6,52]	8,07	0,59	[7,92-8,22]	7,79	0,78	[7,59-7,99]
F - p	F(7, 473) = 180,71, p < 0.001			F(7, 473) = 463,57, p < 0.001			F(7, 473) = 331,13, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

Tablo 4.15: Sol kulak için farklı frekanslarda elde edilen aralık tespit etme eşiklerinin gürültü durumlarındaki değişikliklere göre karşılaştırılması (Tablo 4.14'ün devamı).

Testler ve Kullanılan Uyarılar	%50 Eşik (W)			%75 Eşik (W)			Ortalama Eşik		
	M	SD	CI	M	SD	CI	M	SD	CI
Modifiye Aralık Tespit Etme (ms)									
2000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	6,14	0,78	[5,94-6,34]	7,93	0,60	[7,77-8,08]	7,73	0,71	[7,54-7,91]
Beyaz Gürültü	10,13	1,06	[9,86-10,41]	13,79	0,94	[13,55-14,04]	13,84	1,33	[13,50-14,19]
250 Hz NN	5,53	0,75	[5,34-5,72]	7,24	0,67	[7,06-7,41]	7,11	0,82	[6,90-7,32]
500 Hz NN	3,86	0,62	[3,70-4,02]	5,12	0,58	[4,97-5,27]	5,11	0,62	[4,95-5,27]
1000 Hz NN	4,03	0,66	[3,86-4,20]	5,34	0,55	[5,20-5,49]	5,30	0,57	[5,15-5,45]
2000 Hz NN	3,98	0,57	[3,83-4,13]	5,16	0,48	[5,04-5,28]	5,09	0,55	[4,95-5,23]
4000 Hz NN	4,23	0,77	[4,03-4,43]	5,55	0,66	[5,38-5,72]	5,49	0,58	[5,34-5,64]
8000 Hz NN	4,25	0,50	[4,12-4,38]	5,29	0,46	[5,17-5,41]	5,20	0,53	[5,06-5,34]
F - p	F(7, 473) = 515,55, p < 0.001			F(7, 473) = 1328,69, p < 0.001			F(7, 473) = 913,17, p < 0.001		
4000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,30	0,63	[7,14-7,46]	9,01	0,52	[8,88-9,15]	8,75	0,80	[8,54-8,96]
Beyaz Gürültü	11,73	1,16	[11,43-12,03]	16,30	1,02	[16,04-16,56]	15,97	1,64	[15,55-16,39]
250 Hz NN	7,61	0,92	[7,37-7,85]	9,89	0,78	[9,69-10,09]	9,74	1,10	[9,45-10,02]
500 Hz NN	6,09	0,78	[5,89-6,29]	7,84	0,63	[7,68-8,01]	7,67	0,76	[7,47-7,87]
1000 Hz NN	5,10	0,73	[4,91-5,29]	6,85	0,64	[6,68-7,01]	6,84	0,91	[6,60-7,07]
2000 Hz NN	4,84	0,60	[4,68-4,99]	6,16	0,60	[6,00-6,31]	6,03	0,66	[5,86-6,20]
4000 Hz NN	4,70	0,54	[4,56-4,84]	5,85	0,45	[5,74-5,97]	5,68	0,44	[5,57-5,80]
8000 Hz NN	5,28	0,73	[5,10-5,47]	6,58	0,55	[6,44-6,72]	6,34	0,59	[6,18-6,49]
F - p	F(7, 473) = 534,09, p < 0.001			F(7, 473) = 1499,21, p < 0.001			F(7, 473) = 735,31, p < 0.001		
8000 Hz Saf Ses									
Gürültüsüz	7,18	0,69	[7,00-7,36]	8,73	0,52	[8,60-8,87]	8,37	0,67	[8,20-8,54]
Beyaz Gürültü	12,68	1,10	[12,40-12,97]	17,41	0,86	[17,19-17,63]	17,40	1,69	[16,96-17,84]
250 Hz NN	6,18	0,77	[5,98-6,38]	7,93	0,75	[7,73-8,12]	7,66	0,95	[7,42-7,91]
500 Hz NN	5,55	0,80	[5,34-5,75]	7,21	0,67	[7,04-7,39]	7,21	0,87	[6,99-7,44]
1000 Hz NN	5,51	0,70	[5,33-5,69]	7,15	0,61	[7,00-7,31]	7,00	0,85	[6,78-7,23]
2000 Hz NN	5,34	0,56	[5,19-5,48]	6,47	0,49	[6,35-6,60]	6,08	0,47	[5,96-6,21]
4000 Hz NN	5,04	0,55	[4,90-5,18]	6,14	0,60	[5,98-6,29]	5,89	0,69	[5,71-6,07]
8000 Hz NN	4,17	0,63	[4,01-4,33]	5,33	0,49	[5,20-5,45]	5,30	0,42	[5,19-5,40]
F - p	F(7, 473) = 804,56, p < 0.001			F(7, 473) = 2219,51, p < 0.001			F(7, 473) = 1034,74, p < 0.001		

M: Ortalama, SD: Standart Sapma, CI: %95 Güven Aralığı, (W): Weibull Kümülatif Dağılım Fonksiyonu, NN: Çentikli Gürültü

4.6. MATE TESTİ HİYERARŞİK DOĞRUSAL REGRESYON MODELİ

MATE testinde farklı durumlarda elde edilen aralık tespit etme modellerinin farklı bağımsız değişkenler ile arasındaki nedenselliği değerlendirmek için Hiyerarşik Doğrusal Regresyon Modeli (Doğrusal Karma Etki Modeli - Linear Mixed Effects Model) geliştirilmiştir. Oluşturulan modelde kulak, cinsiyet, gürültü durumu, uyarın frekansı ve gürültü-uyaran etkileşimi değişken olarak belirlenmiştir. Oluşturulan modelde küresellik ($p > 0,05$) ve homoskedastisite ($p > 0,05$) kabulleri sağlanmıştır.

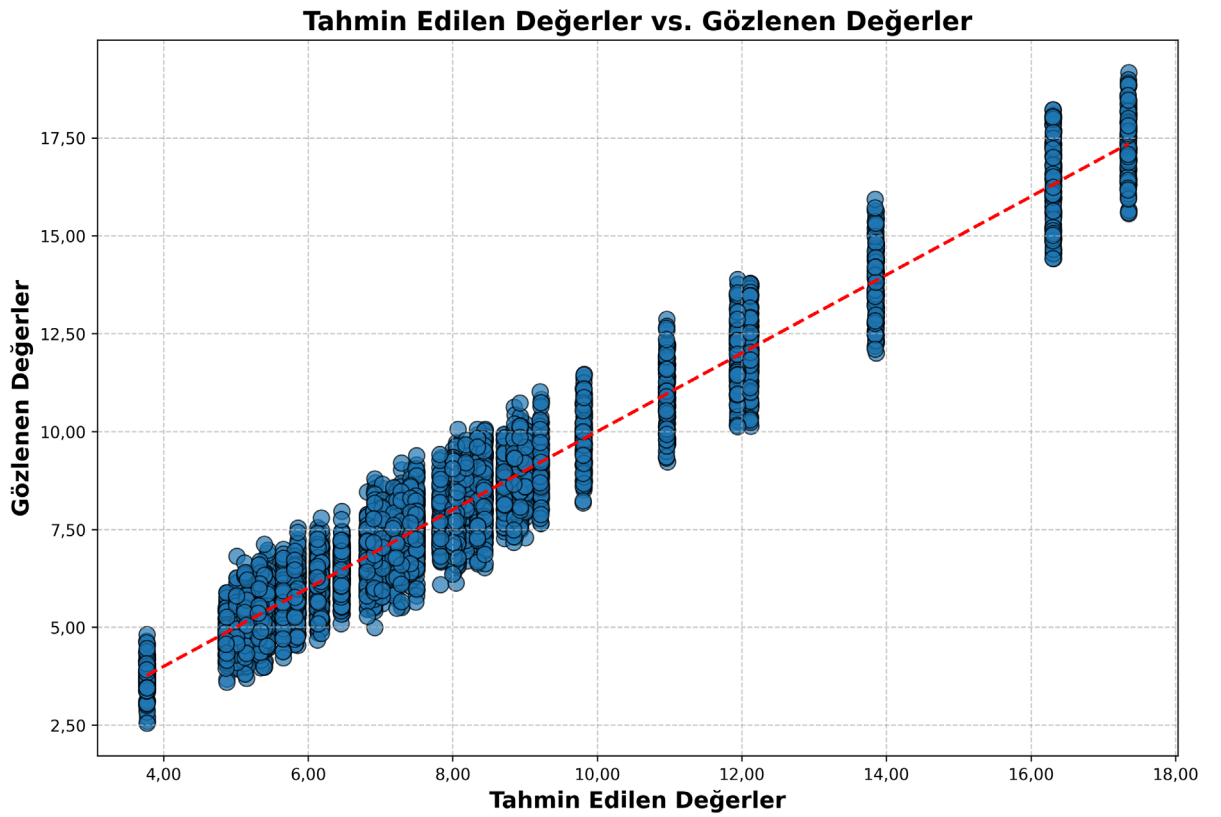
Tablo 4.16: MATE testi için geliştirilen Hiyerarşik Doğrusal Regresyon modeli bulguları.

Parametreler	Tahmin	SE
Sabit Etkiler		
Kesme Noktası	8,941**	(0,062)
Seviye 1 (Kategorik Değişkenler)		
Gürültü		
250 Hz NN	-1,437**	(0,085)
500 Hz NN	-3,920**	(0,085)
1000 Hz NN	-4,063**	(0,085)
2000 Hz NN	-5,163**	(0,085)
4000 Hz NN	-2,752**	(0,085)
8000 Hz NN	-0,590**	(0,085)
Beyaz Gürültü	3,184**	(0,085)
Uyaran		
500 Hz Uyaran	-0,920**	(0,085)
1000Hz Uyaran	-0,748**	(0,085)
2000 Hz Uyaran	-0,931**	(0,085)
4000 Hz Uyaran	0,071	(0,085)
8000 Hz Uyaran	-0,217	(0,085)
Kulak	-0,007	(0,017)
Cinsiyet	-0,006	(0,017)

NN: Çentikli Gürültü, SE: Standart Hata, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,001$

Model sabit etkiler için varyansın %70,3'ünü (Marjinal $R^2 = 0,803$), modelin tümünde yer alan koşullu etkiler için varyansın %91,2'sini (Koşullu $R^2 = 0,912$) açıklamıştır ($p < 0,05$). Modelde gürültü durumu, uyarın frekansı ve gürültü-uyaran etkileşiminin varyans üzerinde anlamlı etki gösterdiği belirlenmiştir ($p < 0,05$). Uyarının sunulduğu kulak ve cinsiyet ise aralık tespit etme eşikleri üzerine istatistiksel anlamlı etkiye sahip değildir ($p > 0,05$). Hiyerarşinin 1. seviyesinde gürültü durumlarının tümünün ve 500-2000 Hz aralığında uyarın frekanslarının

aralık tespit etme üzerine anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ($p > 0,05$). Gürültü-uyaran frekansı etkileşiminde ise beyaz gürültü – 500 Hz, 4000 Hz Çentikli Gürültü - 1000 Hz, 4000 Hz Çentikli Gürültü - 2000 Hz ve 4000 Hz Çentikli Gürültü - 8000 Hz etkileşiminin varyans üzerine istatistiksel anlamlı etkisinin bulunmadığı ($p > 0,05$) diğer gürültü ve uyaran etkileşimlerinin varyans üzerine istatistiksel anlamlı etkisinin bulunduğu belirlenmiştir ($p > 0,05$). Modele ait tanımlayıcı bulgular Tablo 4.16 ve Tablo 4.17’de sıralanmıştır. Ayrıca kategorik gruplara göre modelin tahmin ettiği aralık tespit etme eşikleri ile gözlenen aralık tespit etme eşiği değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.9’da görselleştirilmiştir.



Şekil 4.9: Hiyerarşik Doğrusal Regresyon Modeli ile tahmin edilen ve çalışmada gözlenen değerlerin karşılaştırılması.

Tablo 4.17: MATE testi için geliştirilen Hiyerarşik Doğrusal Regresyon modeli bulguları (Devamı).

Parametreler	Tahmin	SE
Sabit Etkiler		
Kesme Noktası	8,941**	(0,062)
Seviye 2 (Gürültü x Uyaran)		
250 Hz NN : 500 Hz	2,275**	(0,121)
500 Hz NN : 500 Hz	3,403**	(0,121)
1000 Hz NN : 500 Hz	3,469**	(0,121)
2000 Hz NN : 500 Hz	3,969**	(0,121)
4000 Hz NN : 500 Hz	1,764**	(0,121)
8000 Hz NN : 500 Hz	1,792**	(0,121)
Beyaz Gürültü : 500 Hz	-0,237	(0,121)
250 Hz NN : 1000 Hz	1,691**	(0,121)
500 Hz NN : 1000 Hz	2,655**	(0,121)
1000 Hz NN : 1000 Hz	1,731**	(0,121)
2000 Hz NN : 1000 Hz	2,414**	(0,121)
4000 Hz NN : 1000 Hz	0,222	(0,121)
8000 Hz NN : 1000 Hz	0,453**	(0,121)
Beyaz Gürültü : 1000 Hz	0,569**	(0,121)
250 Hz NN : 2000 Hz	0,727**	(0,121)
500 Hz NN : 2000 Hz	1,043**	(0,121)
1000 Hz NN : 2000 Hz	1,386**	(0,121)
2000 Hz NN : 2000 Hz	2,316**	(0,121)
4000 Hz NN : 2000 Hz	0,144	(0,121)
8000 Hz NN : 2000 Hz	-2,097**	(0,121)
Beyaz Gürültü : 2000 Hz	2,664**	(0,121)
250 Hz NN : 4000 Hz	2,245**	(0,121)
500 Hz NN : 4000 Hz	2,744**	(0,121)
1000 Hz NN : 4000 Hz	1,970**	(0,121)
2000 Hz NN : 4000 Hz	2,295**	(0,121)
4000 Hz NN : 4000 Hz	-0,434**	(0,121)
8000 Hz NN : 4000 Hz	-1,957**	(0,121)
Beyaz Gürültü : 4000 Hz	4,118**	(0,121)
250 Hz NN : 8000 Hz	0,794**	(0,121)
500 Hz NN : 8000 Hz	2,383**	(0,121)
1000 Hz NN : 8000 Hz	2,570**	(0,121)
2000 Hz NN : 8000 Hz	2,909**	(0,121)
4000 Hz NN : 8000 Hz	0,162	(0,121)
8000 Hz NN : 8000 Hz	-2,783**	(0,121)
Beyaz Gürültü : 8000 Hz	5,445**	(0,121)

NN: Çentikli Gürültü, SE: Standart Hata, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,001$

5. TARTIŞMA

Psikoakustiğin tarihi, sesin antik felsefi keşiflerinden bilimsel bir disiplin olarak kurulmasına kadar alanın evrimini izler. Önemli gelişmeler arasında Helmholtz'un rezonans teorisi ve 19. yüzyılda Fechner'in işitsel algıyı anlamak için temel oluşturan psikofiziği yer almaktadır (Burt, 1960; Helmholtz, 1877). 20. yüzyılda, özellikle Sinyal Tespit Teorisi (STT) ile önemli ilerlemeler kaydedilmiştir; bu teori, dinleyicilerin gürültü varlığında işitsel uyarıların nasıl tespit ettiğini analiz etmek için bir altyapı sağlamıştır (Green ve Swets, 1966). Son yıllarda, araştırmalar giderek karmaşık seslerin algılanmasına, seslerin konumunun algılanmasına ve temporal işlemlenin altında yatan mekanizmalara odaklanmıştır. Çalışmalar, işitsel sistemin temporal bilgiyi ve temporal modülasyonu nasıl kodladığını ve bu bilgiyi işitsel sahne analizinde nasıl kullandığını araştırmaya devam etmektedir (Angeloni ve Geffen, 2018; Herrmann ve Johnsrude, 2018). Fakat günümüzde, klasik psikoakustik çalışmalar popülerliğini yitirmiştir (Yost, 2021). Ancak, klasik psikoakustik modellerin geliştirilmesi, işitme ve işitsel algının doğasının tam olarak anlaşılabilmesi için halen hayati öneme sahiptir (Neal ve Zahorik, 2022). Bu bağlamda, çalışmamızın klasik psikoakustik yaklaşımları kullanmasıyla literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmamız, işitsel uyarıların temporal (zamansal) bilgilerinin kokleanın kanal içi (uyaran frekansı ile benzer) ve kanal dışı (uyaran frekansının dışında) bölgelerinde ne ölçüde işlendiğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda, kokleanın sadece karakteristik frekansa sahip bölgesinde değil, aynı zamanda frekans dışı bölgelerinde de işitsel uyarının temporal bilgilerini çözümleyebileceği öngörülmüştür. Bu etkiyi değerlendirmek için, sessizlikte, gürültü varlığında ve çentikli gürültü varlığında (ileri maskeleme yöntemiyle) modifiye aralık tespit etme (MATE) testi uygulanmış ve elde edilen aralık tespit etme eşikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda, MATE eşiklerinin sessizlikte en düşük seviyede olacağı, gürültü varlığında ise yükseleceği, çentikli gürültü varlığında ise çentiğin merkez frekansı uyarın frekansına yaklaştıkça aralık tespit etme eşiklerinin iyileşeceği öngörülmüştür. Ayrıca, çentikli gürültüde çentik merkez frekansının uyarın frekansına eşit olduğu durumda, aralık tespit etme eşiğinin sessizlikteki aralık tespit etme eşiğine benzer olacağı düşünülmüştür.

5.1. ODYOLOJİK DEĞERLENDİRME

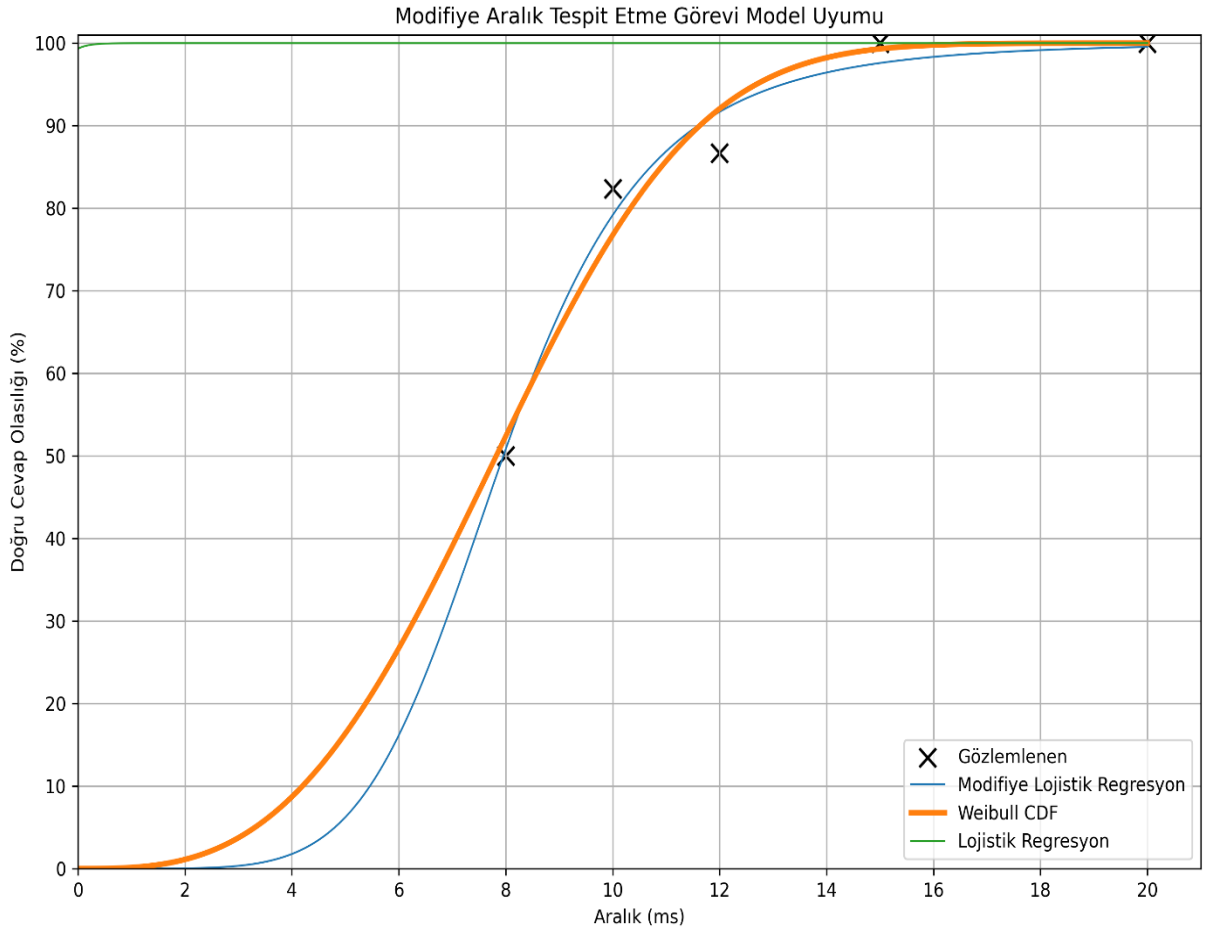
Çalışmamızda tüm katılımcılarda normal odyolojik bulgular elde edilmiştir. Tüm katılımcıların saf ses işitme eşikleri, konuşma odyometrisi bulguları ve akustik immitansmetrik değerlendirme sonuçları normal sınırlardadır. Ancak, kadın katılımcıların Khalfa Hiperakuzi Ölçeği (KHÖ) toplam skorları, normal sınırlar içinde olmakla birlikte, erkek katılımcılardan anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p < 0,05$). Bu bulgu, literatürde de bildirilmiştir (Cogen ve diğ., 2024). Tüm katılımcıların KHÖ skorları normal sınırlar içinde olduğundan, bu bulgunun aralık tespit etme eşikleri üzerine etkisinin olmayacağı düşünülmüştür.

5.2. ARALIK TESPİT ETME EŞİĞİ İÇİN MODEL SEÇİMİ

Çalışmamızda Gürültüde Aralık Tespit Etme (GATE) ve MATE testlerinde katılımcıların eşiklerini belirlemek adına çeşitli yöntemler ve modeller kullanılmıştır. Bunlardan ilki katılımcıların yanlış cevap verdiği noktalar dönüm noktası kabul edilerek en son 8 dönüm noktasına ait aralık değerlerinin aritmetik ortalamasını almayı içeren ortalama eşik yöntemidir. Bunun dışında literatürde de sıklıkla kullanılan, katılımcı cevaplarına uygun psikometrik modeller kullanılarak aralık tespit etme eşikleri tahmin edilmiştir. Çalışmamızda da Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) (Alizadeh ve diğ., 2015), klasik lojistik regresyon modeli Berkson (1944) ve Florentine ve diğ. (1999) tarafından önerilen modifiye lojistik regresyon modeli kullanılarak katılımcı cevapları modellenmiştir. Ardından modellerin gözlenen verilere uyumu Hosmer-Lemeshow Uyum İyiliği Testi ile değerlendirilmiştir. Weibull CDF modeli veri setine en fazla uyumu göstermiştir. Ardından sırasıyla modifiye lojistik regresyon ve klasik lojistik regresyon modeli veri setine uyum göstermiştir. Fakat bu iki modelin bazı verilerde gözlenen değerlerden istatistiksel anlamlı düzeyde saptığı belirlenirken ($p < 0,05$) Weibull CDF modelinin tüm verilere istatistiksel anlamlı düzeyde uyum sağladığı belirlenmiştir ($p > 0,05$). Uyum testi sonuçları Tablo 4.2, Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te sunulmuştur. Daha düşük test skorları daha iyi uyumu yansıtmaktadır. Modellerin veri setine uyumunu gösteren örnek bir görsel Şekil 5.1'de verilmiştir.

Psikometrik modeller üreten çalışmalarda sıklıkla katılımcının yaklaşık %75 olasılıkla cevap verdiği aralık değeri eşik olarak kabul edilmektedir. Weibull CDF modeli cevaplara en uygun model olarak belirlendikten sonra modele göre %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri ortalama eşik hesaplama yöntemi ile Bland-Altman grafiği kullanılarak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1). Burada ortalama yöntemi ile hesaplanan eşiklerin Weibull CDF

ile elde edilen %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiği ile büyük ölçüde uyum gösterdiği (ortalama fark = 0,12) ve standart sapmanın düşük olduğu, eşik arttıkça uyumun nispi olarak azaldığı görülmektedir. Fakat ortalama yöntemi ile hesaplanan eşiklerin Weibull CDF ile elde edilen %50 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri ile uyumsuz olduğu görülmektedir. Literatürde de %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiğinin sıklıkla kullanıldığı göz önünde bulundurularak, bu değer ile uyum gösteren ortalama eşik yönteminin çalışmalarda güvenle kullanılabileceği düşünülmüştür. Fakat daha fazla hassasiyet ve uyum için Weibull CDF modelinin kullanımı yerinde bir karar olacaktır. Çalışmamızda yapılan aralık tespit etme eşiği karşılaştırmalarında Weibull CDF ile elde edilen %50 ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşikleri ile ortalama aralık tespit etme eşikleri istatistiksel analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Psikometrik modellerin gözlenen veriler ile ilişkisi.

5.3. CİNSİYET VE KULAK KARŞILAŞTIRMASI

Çalışmamızda cinsiyet ve işitsel uyarının sunulduğu kulak açısından alt gruplar arası istatistiksel karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan analizlerde GATE ve MATE eşikleri açısından cinsiyet bağımsız grupları arasında anlamlı farklar tespit edilmemiştir ($p > 0,05$). Literatürde yer alan çalışmalar da gürültüde aralık tespit etme ve randomize aralık tespit etme (RATET) testlerinde elde edilen bulguların cinsiyetler açısından farklılık göstermediğini bildirmektedir (Dias ve diğ., 2012; La, 2014; Sousa ve diğ., 2012). Aynı veriler için uyarının sunulduğu kulak açısından yapılan bağımlı değişken analizinde de istatistiksel anlamlı farklar elde edilmemiştir ($p > 0,05$). Ayrıca normal işiten bireylerde her iki kulaktan elde edilen GATE ve MATE eşiklerinin birbiri yerine kullanılıp kullanılamayacağını belirlemek için Bland-Altman grafiği çizilmiş ve farklı kulaklardan elde edilen bulguların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (ortalama fark = -0,01). Literatürde yer alan birçok çalışma, normal işitme düzeyine sahip bireyler ve simetrik işitme kaybı bulunan kişilerde, aralık tespit etme yeteneklerinin, uyarının hangi kulağa sunulduğuna bağlı olarak farklılık göstermediğini bildirmiştir (Carmichael ve diğ., 2008; Hall ve diğ., 2007; Mishra ve Panda, 2016; Rabelo ve diğ., 2015; Shinn ve diğ., 2009). Sonuç olarak, çalışmamız cinsiyet ve uyarının sunulduğu kulak açısından literatürle tutarlılık göstermektedir.

5.4. ARALIK TESPİT ETME EŞİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmamızda ileri maskeleme ile 8 farklı gürültü durumu (Gürültüsüz, Beyaz Gürültülü, 250 Hz Çentikli Gürültü [NN], 500 Hz NN, 1000 Hz NN, 2000 Hz NN, 4000 Hz NN ve 8000 Hz NN) ve 6 farklı frekansta aralık tespit etme uyararı ile (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz) aralık tespit etme eşikleri belirlenmiştir. Bulunan eşik gürültü durumları ve uyarın frekanslarına göre gruplanarak, grup içinde, tekrarlayan testlerde istatistiksel karşılaştırmalar yapılmıştır.

5.4.1. Gürültü Türüne Göre Aralık Tespit Etme Eşikleri

Farklı uyarın frekanslarında elde edilen aralık tespit etme eşikleri, gürültü durumuna göre gruplanarak, gürültü varlığında eşiklerin nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir. Öncelikle gürültüsüz durumda farklı frekanslar arası aralık tespit etme eşikleri istatistiksel anlamlı düzeyde minimal değişiklikler gösterdiği belirlenmiştir ($F(5, 295) = 19,56, p < 0.001$). Aralık tespit etme eşikleri (sağ kulak) 1000 Hz’de ortalama $6,30 \pm 0,80$ [6,10-6,51] değeri ile en düşük değerini ve 4000 Hz’de ortalama $7,31 \pm 0,72$ [7,13-7,50] değeri ile en yüksek değerini almıştır.

Çalışmamızda en düşük aralık tespit etme eşiklerinin elde edildiği 1000 Hz sonrası alçak ve yüksek frekanslara doğru aralık tespit etme eşiklerinin minimal artış gösterdiği belirlenmiştir. Literatürde genellikle alçak frekanslarda aralık tespit etme eşiklerinin yüksek olduğu, yüksek frekanslara doğru aralık tespit etme eşiklerinin azaldığı belirtilmiştir (Eddins ve diğ., 1992; Fitzgibbons, 1983; Hall ve diğ., 2016; Mishra ve Panda, 2016; Moore ve diğ., 1993; Ozmeral ve diğ., 2016). Fakat bu çalışmaların metodolojisi incelendiğinde kullanılan uyaranların sabit bir şiddet düzeyinden gönderildiği ve dinleyicinin işitme eşiklerinin referans alınmadığı görülmektedir. Oysa aralık tespit etme eşiklerinin uyaranın şiddetinden etkilendiği iyi bilinmektedir (Fitzgibbons, 1983; Formby ve Muir, 1989; Hall ve diğ., 2007; Moore ve diğ., 1993; Weihsing ve diğ., 2007). Bu nedenle çalışmamızda uyaran şiddetine bağlı değişimleri en aza indirmek adına uyaranların şiddetleri ilgili uyaran frekansında elde edilen işitme eşğine göre normalize edilmiştir. Sonuçta şiddet etkisi en aza indirilerek frekanslar arası aralık tespit etme eşiklerinin minimal düzeyde değiştiği bir tablo elde edilmiştir. Çalışmamızın bulgularına göre gürültüsüz durumda aralık tespit etme eşiklerinin alçak ve yüksek frekanslara doğru azaldığı orta frekanslarda en iyi olduğu görülmektedir.

Beyaz gürültü ile yapılan MATE testinde aralık tespit etme eşikleri gürültüsüz duruma kıyasla tüm frekanslarda istatistiksel anlamlı düzeyde artış göstermiştir ($p < 0,001$). Etkinin alçak frekanslarda en az olduğu ve 1000 Hz sonrası yüksek frekanslara doğru artışın maksimuma ulaştığı görülmektedir. Bu durum beyaz gürültünün tüm frekanslarda sabit bir şiddet dağılımına sahip olması ve maskelemenin yukarı yayılması fenomeniyle açıklanabilir. Beyaz gürültü tüm frekanslarda sabit bir şiddete sahip olduğundan işitme hassasiyetinin daha az olduğu alçak frekanslarda maskeleyici etkisi az olacak (125-500 Hz), işitme hassasiyetinin arttığı orta frekanslara doğru (1000-2000 Hz) etkisi artacak ve işitme hassasiyetinin görece azaldığı yüksek frekanslara doğru (2000 Hz üzeri) maskeleyici etkisi azalacaktır. Fakat maskelemenin yukarı yayılımı fenomenine göre bir frekanstaki maske gürültüsü yeterli şiddette ise kendi merkez frekansından daha yüksek frekanslara doğru da yayılarak maskeleyici bir etki oluşturabilmektedir (Oxenham ve Plack, 1998; Pickett ve Martin, 1968; Yasin ve Plack, 2005). Bu iki tablo birlikte ele alındığında alçak frekanslarda maskeleyici etkinin en az oluşu ve yüksek frekanslara doğru etkinin artışı daha kolay anlaşılmaktadır.

Tüm çentikli gürültü durumlarında ise hemen hemen tüm uyaran frekanslarının aralık tespit etme eşiklerinde sessiz duruma ve beyaz gürültü kullanılan duruma göre istatistiksel anlamlı düzeyde azalma dikkat çekmiştir ($p < 0,001$). Çentikli gürültüde çentiğin merkez

frekansı uyaran frekansının çok üstüne çıktığında (yaklaşık 3-4 oktav) bu etki giderek azalmıştır. Fakat sessiz durumda minimal de olsa farklı uyaran frekansları arasında aralık tespit etme eşikleri açısından farklılıklar bulunduğundan ($p < 0,001$) çentikli gürültülerin etkilerini daha net bir şekilde ortaya koymak ve farklı frekanslar arası farkları dışlamak adına aralık tespit etme eşikleri sessiz durumda elde edilen aralık tespit etme eşiklerine göre normalize edilmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Bu tabloda 3 durum dikkat çekmektedir:

- Çentikli gürültü çentiğinin merkez frekansında bir uyaran sunulduğunda aralık tespit etme eşikleri çalışmada elde edilen en düşük seviyelerine yaklaşmaktadır.
- 250 Hz ve 2000 Hz uyaranlar için aralık tespit etme eşikleri tüm çentikli gürültülerde (250 Hz için 8000 Hz NN hariç) belirgin bir şekilde azalmaktadır.
- Uyaran frekansı ile çentikli gürültünün merkez frekansı arasındaki mesafe oktav cinsinden arttıkça aralık tespit etme eşikleri üzerindeki iyileştirici etki azalmaktadır.

Literatür tarandığında daha önce çentikli gürültüler kullanılarak aralık tespit etme görevi içeren araştırmalar yapıldığı ancak gürültünün uyaran ile eş zamanlı sunulduğu görülmüştür (Phillips ve Hall, 2002; Schneider ve Hamstra, 1999; Werner ve diğ., 2001). Fakat çalışmamızda farklı bir yöntem olarak çentikli gürültüler kanal içi ve kanal dışı olarak ileri maskeleme için kullanılmıştır. Bu nedenle yukarıda belirtilen bulgulara literatürde rastlanmamıştır. Çalışmamız, farklı merkez frekanslardaki çentikli gürültülerin ileri maskeleme amacıyla aralık tespit etme görevlerinde kullanımıyla literatüre yeni bir perspektif kazandırmıştır. Bu bulguların altında yatan olası faktörler, ilerleyen paragraflarda detaylı olarak ele alınacaktır.

5.4.2. Uyaran Frekansına Göre Aralık Tespit Etme Eşikleri

Farklı frekanslardaki uyaranların her bir gürültü durumunda sahip olduğu temporal çözünürlüğü belirlemek amacıyla, her uyaran frekansı için farklı gürültü durumlarında elde edilen aralık tespit etme eşikleri gruplanmış ve bu eşiklerin kullanılan gürültüye bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Beyaz gürültü varlığında tüm uyaran frekansları için aralık tespit etme eşikleri anlamlı düzeyde yükselmiştir ($p < 0,001$). Her uyaran için çentikli gürültü çentiğinin merkez frekansı uyaran frekansının 3-4 oktav üstüne çıkana kadar çentikli gürültü aralık tespit etme eşikliğini iyileştirici etki göstermiştir. Ardından bu etki giderek azalmıştır. Fakat bu azalma 2000, 4000 ve 8000 Hz uyaranlarda, uyaranların 3-4 oktav üzerinde merkez frekanslı çentiğe sahip çentikli gürültüler kullanılmadığından, gözlenmemiştir. Alçak çentik merkez

frekanslarından yüksek frekanslı uyaranlara doğru gidildikçe aralık tespit etme eşikleri iyileşme eğilimi göstermiştir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Burada birkaç husus dikkat çekmiştir:

- Beyaz gürültüye eklenen çentik, gürültü şiddeti değişmemesine rağmen çentiğin uyaran frekansına çok uzak olduğu durumlarda dahi, beyaz gürültünün maskeleyici etkisini istatistiksel anlamlı düzeyde azaltmıştır.
- Katılımcılar farklı uyaran frekansları için oldukça geniş bir frekans ranjında çentikli gürültülerin sunduğu temporal ipuçlarını kullanarak aralık tespit etme eşiklerini iyileştirmiştir ve bu etki çentik merkez frekansı uyaran frekansından 3-4 oktav kadar uzaklaşınca azalma eğilimi göstermiştir.
- Çentikli gürültüler ileri maskeleme yöntemi ile kullanıldığında aralık tespit etme eşiklerini gürültüsüz durumdan daha düşük seviyelere ulaştırabilmektedir.

Bu bulgular, çalışmanın başlangıcında oluşturulan hipotezler ve beklenen sonuçlarla önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Literatürde daha önce bildirilmemiş olmaları nedeniyle bu bulgular hem tedirgin edici hem de heyecan vericidir. Çalışmamızda, literatürde kullanılan uyaran ve gürültü parametrelerinin kullanıldığı basamaklarda elde edilen bulgular, literatürle uyumluluk göstermiştir. Örneğin, MATE testinde gürültüsüz koşullarda elde edilen aralık tespit etme eşikleri ve GATE testinde elde edilen eşikler literatürdeki bulgularla benzerdir (John ve diğ., 2012; Majak ve diğ., 2015; Sousa ve diğ., 2012; Wong ve McPherson, 2015). Ancak, ileri maskeleme ile sunulan çentikli gürültülerle elde edilen bulgular beklenenin oldukça dışındadır. Bu noktada, çalışmamızın bulgularının farklı araştırmacılar tarafından tekrarlanarak değerlendirilmesi, literatüre önemli katkılar sağlayacaktır. Beklenmeyen bu bulguların altında yatan olası faktörler, ilerleyen paragraflarda ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

5.5. HİYERARŞİK DOĞRUSAL MODEL

MATE testinde elde edilen aralık tespit etme eşikleri üzerine etkisi olan bağımlı ve bağımsız değişkenleri belirlemek amacıyla bir hiyerarşik doğrusal model oluşturulmuştur. Modelde, aralık tespit etme eşikleri bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. Bu eşiklerin, cinsiyet, uyarının sunulduğu kulak, kullanılan gürültü türü ve uyaran frekansı gibi kategorik değişkenlerle nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

Modelin birinci seviyesinde, gürültü türü ve uyaran frekansı kategorilerinin aralık tespit etme eşikleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$). Ancak, cinsiyet

ve uyarının sunulduğu kulağın bu eşikler üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir ($p > 0,05$).

Analiz sonuçlarına göre, beyaz gürültü, aralık tespit etme eşiğini artırıcı bir etkiye sahipken, çentikli gürültülerin eşigi düşürücü etkisi olduğu görülmüştür. Uyarın frekansı açısından bakıldığında, referans olarak alınan 250 Hz gürültüsüz duruma kıyasla, 500-2000 Hz arası frekanslar aralık tespit etme eşiklerinde azalmaya yol açmıştır. Ancak, 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarında anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir.

Model, sabit etkiler için varyansın %70,3'ünü (Marjinal $R^2 = 0,703$) ve modeldeki tüm etkiler için varyansın %91,2'sini (Koşullu $R^2 = 0,912$) açıklamıştır. Bu yüksek R^2 değerleri, modelin aralık tespit etme eşikleri üzerinde güçlü bir açıklayıcı güce sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, modelde bazı gürültü-uyaran frekansı etkileşimlerinin aralık tespit etme eşikleri üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p > 0,05$). Özellikle, 4000 Hz ve 8000 Hz frekansları ile bazı gürültü kombinasyonlarının, aralık tespit etme eşiklerinde başlangıç koşulna göre belirgin bir değişikliğe neden olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek frekansların bu modeldeki diğer frekanslar kadar duyarlı olmayabileceğini veya sabit durum olan gürültüsüz durumda 250 Hz uyarın ile elde edilen aralık tespit etme eşikleri ile benzer özellikler sergilediğini göstermektedir.

5.6. BEKLENEN VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Çalışmamızda başlangıçta MATE eşiklerinin sessizlikte en düşük seviyede olacağı, gürültü varlığında yükseleceği, çentikli gürültü varlığında ise çentiğin merkez frekansı uyarın frekansına yaklaştıkça aralık tespit etme eşiklerinin iyileşeceği öngörülmüştür. Ayrıca, çentikli gürültüde çentik merkez frekansının uyarın frekansına eşit olduğu durumda, aralık tespit etme eşisinin sessizlikteki aralık tespit etme eşisine benzer olacağı ve aralarında istatistiksel anlamlı düzeyde farklar görülmeyeceği düşünülmüştür.

Fakat çalışmamızda elde edilen bulgular çentikli gürültülerin ileri maskeleme kullanıldığında aralık tespit etme eşiklerinin gürültüsüz durumdan daha iyi seviyelere getirebileceğine işaret etmektedir. Çalışmamızda öngörülen hipotezlerden farklı olarak elde edilen bulguların olası nedenleri ve bu nedenlerin bulgularımızla uyumlu olup olmadığı,

uyumlu olmadıkları durumlarda ise neden uyumlu olmadıkları literatür ışığında aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

1. Kokleada, ilgili bölgenin karakteristik frekansı dışındaki uyaranların temporal bilgilerini işlemeye yarayan iyon kanalları bulunabilir.

Bu hususun araştırılması ve tartışılması bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Ancak, böyle bir mekanizmanın varlığı, çalışmamızın bulgularıyla uyumlu olabilir. Güncel çalışmalar, kokleada yeni keşfedilen veya mekanizması yeni anlaşılan iyon kanallarını bildirmektedir (Carlton ve diğ., 2023; Heil ve Peterson, 2019; Holt ve diğ., 2024; Nguyen ve Bergles, 2024). Özellikle, oksidatif stres tespitinde rol oynayan ve gürültü etkilerini azalttığı düşünülen Geçici Reseptör Potansiyeli (Transient Receptor Potential – TRP) kanallarının işitsel uyaranlara nasıl yanıt verdiği henüz tam olarak anlaşılmamıştır (Nguyen ve Bergles, 2024). Kokleada, işitsel uyaranlarla meşgul edilen işitsel filtreler için bir belirteç olarak kullanılabilecek iyon kanallarının varlığı ve bu bilginin daha üst merkezlere iletilmesi, çalışmamızın bulgularıyla örtüşebilir. Bu bağlamda, TRP kanalları gibi mekanizmaları araştıran çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2. İşitsel uyarana ait ilerleyen dalgalar, maskelemenin yukarı yayılımı fenomeninde olduğu gibi (Oxenham ve Plack, 1998; Pickett ve Martin, 1968), frekans dışı bölgelerde uyarılmasına neden oluyor olabilir. Bu küçük görülen bilgiler işitsel uyaranların temporal işlenmesine olanak tanıyor olabilir.

Bu sürecin gerçekleşebilmesi için işitme sisteminin ilerleyen dalganın bu minimal etkilerini çözümleyebilecek kadar hassaslaşması gerekmektedir. 3. maddede yer alan bilgiler bu hususa ışık tutmaktadır.

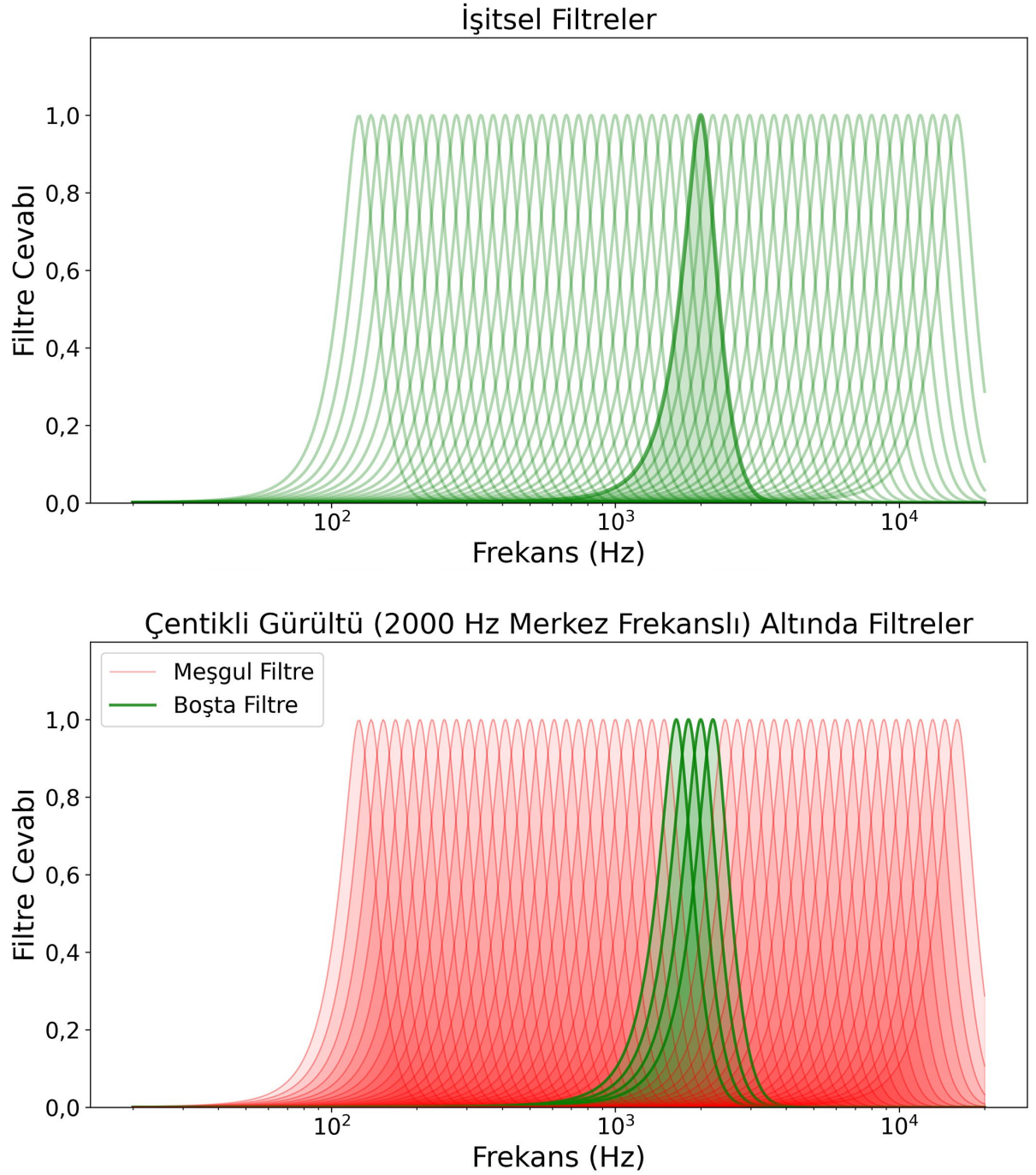
3. Teorik olarak, çentikli gürültü kokleanın işitsel filtrelerinin çoğunu uyarırken, çentiğin merkez frekansı çevresindeki küçük bir bölümü uyarmamaktadır. Bu durum, kokleada uyaranla satüre olmuş meşgul işitsel filtrelerin ve gürültüden etkilenmeyen (veya göreceli olarak daha az etkilenen) boşta işitsel filtrelerin oluşmasına neden olarak frekans dışı temporal bilgilerin daha kolay işlenmesine olanak tanıyabilir (Şekil 5.2).

Bu mekanizmanın, spektral ayıklama (Spectral Glimpsing) fenomeni ve kokleada yer alan işitsel filtrelerin adaptasyonu ile sağlanabileceği düşünülmüştür (Cooke, 2006; Eggermont, 2015b; Steinmetzger ve Rosen, 2023). Spektral ayıklama, işitsel sistemin maskeleyici gürültünün spektral boşluklarında veya zayıf olduğu frekans bantlarında hedef sesi "görebilmesi" (duyabilmesi) anlamına gelir (Steinmetzger ve Rosen, 2023). Çentikli gürültü sunulduktan sonra bir süre daha baziler membranda titreşim devam etmektedir. Bu nedenle MATE uyarıları sunulduğunda koklea içerisinde bazı işitsel filtreler uyarılmış durumdayken, çentikli gürültünün merkez frekansı çevresindeki işitsel filtreler daha az uyarılmış bir durumdadır (Şekil 5.2). İşitme sistemi, daha az uyarılmış olan bu işitsel filtrelere odaklanarak, bu bölgelerdeki spektrot temporal bilgiyi çözümleyip aralık tespit etme becerisini iyileştiriyor olabilir. Önerdiğimiz bu mekanizma, Eggermont (2015b)'un temporal işitsel işlemlerde adaptasyon modeli ile de uyumludur. Bu mekanizmanın gerçekleşmesi için kokleada meşgul işitsel filtreleri işaretleyen iyon kanalları olabileceği gibi, koklear nükleus veya daha üst merkezlerde bu bilgiyi çözümleyen nöral yapılar da rol oynayabilir. İlk bakışta bu durumun lateral inhibisyon nedeniyle mümkün olmayacağı düşünülebilir (Arslanova ve diğ., 2020). Ancak, burada efferent süreçler devreye girerek, işitme sistemini hassasiyeti azalmış filtrelerin hassasiyetini artırmaya yönlendirebilir ve böylece gelen kısıtlı bilgilerin daha iyi işlenmesini sağlayabilir. Bu görüş ile uyumlu olarak, Rotondo ve Bieszczad (2021) oluşturdukları hayvan modelinde, işitme sisteminin lateral inhibisyon ile işitsel uyarıların temporal bilgisini daha iyi çözümlediğini bildirmiştir.

4. Çentikli gürültüde yer alan çentik ardından gelen işitsel uyarılarla baziler membranda kompleks bir etkileşime girerek aralığın daha kolay tespit edilmesine olanak tanıyor olabilir.

Koklea geometrik olarak oldukça kompleks bir yapıya sahiptir (Altoè ve Shera, 2020; Potrusil ve diğ., 2020). Bu nedenle çentikli gürültü ile uyarının koklea içindeki kompleks etkileşimleri matematiksel olarak aralık tespitini kolaylaştırıyor olabilir. Steinmetzger ve Rosen (2023), harmonik maskeleyicilerin, harmonik iptal yoluyla konuşma anlaşılabilirliğini artırmadığını, aksine, harmonik seslerin maskeleyicilerin etkinliğinin azalmasının, spektral bileşenlerinin düzenli aralıkları sayesinde daha iyi spektral ayıklama fırsatları sunmasıyla ilişkili olduğunu bildirmiştir. Çalışmamızda da çentikli gürültüler aralık tespit etme uyarıları

ile kompleks etkileşimler sergileyerek spektral ayıklama becerisini iyileştirmiş olabilir. Ancak bu mekanizmanın açıklanması çalışmamızın kapsamı dışındadır.



Şekil 5.2: Kokeda yer alan teorik işitsel filtreler (Oxenham ve Shera, 2003) ve işitsel filtrelerin çentikli gürültüye maruz kaldıktan sonra işitsel filtrelerin durumu.

5. **Çentikli gürültünün, beyaz gürültüye kıyasla aralık tespit etme eşiklerini iyileştirmesi, Benzi ve diğ. (1981) tarafından ilk olarak tanımlanan ve sonrasında işitsel işleme süreçleri ile de ilişkilendirilen stokastik rezonans (SR) fenomeni ile açıklanabilir (McDonnell ve Abbott, 2009; Ward ve diğ., 2006). SR, zayıf bir sinyalin belirli bir miktarda rastgele gürültü eklendiğinde daha belirgin hale gelmesi olgusudur. İşitme sistemi, zayıf ya da kısa süreli temporal ipuçlarının algılanmasını güçlendiren bir etki oluşturabilir (McDonnell ve Abbott, 2009).**

SR işitme sisteminde optimal bilgi iletimini sürdürmek için kritik bir mekanizma olarak işlev görür. SR, işitsel girdinin azaldığı durumlarda, özellikle dorsal koklear nükleus (DCN) üzerinden somatosensoriyel projeksiyonların disinhibisyonu ile işitme eşiklerini iyileştirerek adaptasyona katkı sağlar (Gao ve diğ., 2016; Krauss ve diğ., 2016; Veronesi ve Milotti, 2022; Zeng ve diğ., 2012). Bu mekanizma, tinnitus ve Zwicker Sesi gibi işitsel fenomenlerle de ilişkilendirilmiştir. Örneğin, işitme kaybıyla azalmış işitsel girdiye karşılık olarak artan içsel gürültü, DCN'deki nöronal hiperaktiviteyi tetikleyebilir ve bu durum tinnitus olarak algılanabilir (Krauss ve diğ., 2016; Tang ve Trussell, 2015). Benzer şekilde, çentikli gürültü sunumu da SR kaynaklı hiperaktiviteyi tetikleyebilir ve dinleyicinin uyararı içinde bulunmayan bir saf sesi (Zwicker Sesi) duymasına neden olabilir (Hullfish ve diğ., 2019; Noreña ve Eggermont, 2003; Veronesi ve Milotti, 2022). SR'nin bu adaptif kontrolü, işitme sisteminin çevresel gürültü seviyelerine hızlı uyum sağlamasına ve bilgi iletimini optimize etmesine olanak tanır (Krauss ve diğ., 2017; Krauss ve diğ., 2018; Mitaim ve Kosko, 2004; Shukla ve Bidelman, 2021). Bu mekanizmanın santral işitsel yolların hemen her yerinde yer aldığına dair literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Gao ve diğ., 2016; Noda ve Takahashi, 2023; Noreña ve Eggermont, 2003; Shukla ve Bidelman, 2021). Çalışmamızda gözlemlediğimiz çentikli gürültünün aralık tespit etme eşiklerini iyileştirme etkisi, SR'nin bu kritik rolüyle uyumlu olarak değerlendirilebilir.

- 6. İleri maskeleye yöntemi ile sunulan gürültüler ardından gelen uyarılar ile aralarında 25 ms'lik bir boşluk içerdiğinden bu boşluk işitsel uyarılarla kompleks bir etkileşime girerek aralığın daha kolay tespit edilmesini sağlıyor olabilir.**

Çalışmamızın bulguları bu görüş ile uyuşmamaktadır. Eğer uyarılar ile gürültü arasında yer alan boşluk nedeniyle aralık tespit etme becerisi kolaylaşıyor olsaydı beyaz gürültü varlığında da aralık tespit etme iyileşmeli veya beyaz gürültünün aralık tespit etmeye anlamlı bir etkisi bulunmamalıydı. Oysa çalışmamızda ileri maskeleye ile sunulan beyaz gürültü tüm uyarı frekanslarında aralık tespit etme eşiklerini yükseltirken ($p < 0,001$), tüm çentikli gürültüler bu duruma kıyasla aralık tespit etme eşiklerini azaltmıştır ($p < 0,001$).

- 7. Beyaz gürültü tüm frekanslarda aynı şiddet seviyesine sahiptir. Ancak, insan işitme sistemi düşük ve yüksek frekanslara daha az hassastır, bu nedenle farklı frekanslarda farklı etkiler gözlemlenebilir.**

Bu bilgi doğru olmakla birlikte, çalışmamızda bu tür etkileri en aza indirmek amacıyla, gürültü ve sinyal seviyeleri katılımcıların işitme eşiklerine göre adaptif olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, çentikli gürültülerin şiddetleri de özenle kalibre edilmiştir. Bu nedenle, bulgularımız, aynı şiddet seviyesine sahip fakat farklı merkez frekansları olan çentikli gürültülerin aralık tespit etme üzerine farklı etkileri olduğunu göstermektedir.

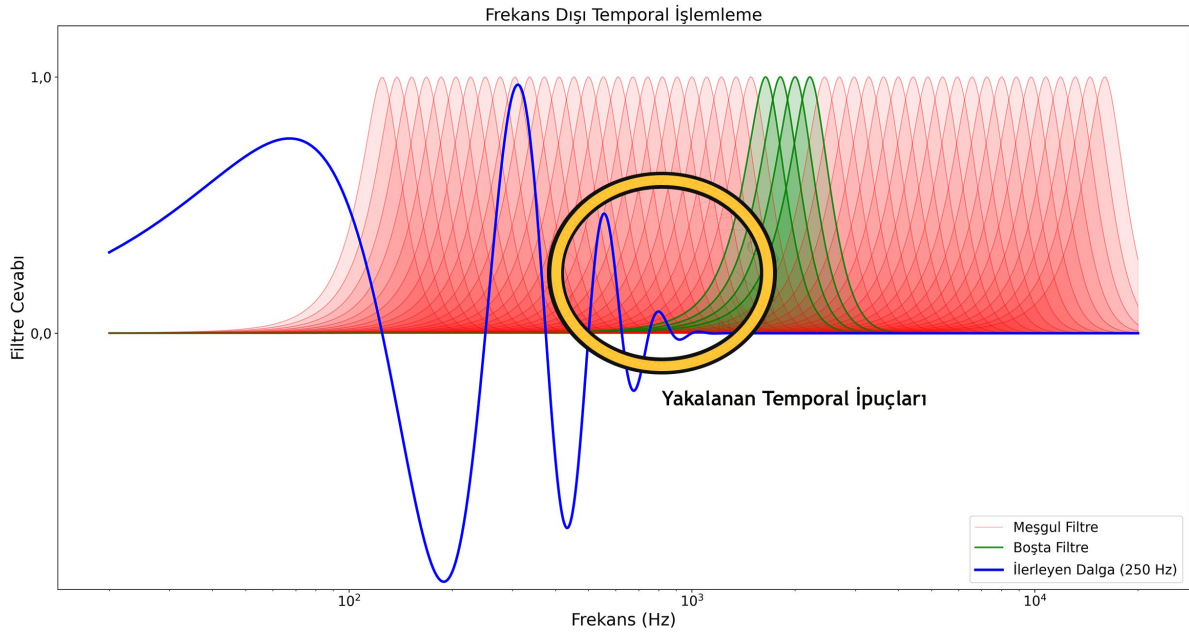
5.7. ÖNGÖRÜLEN TEMPORAL ÇÖZÜNÜRLÜK MODELİ

Çentikli gürültünün belirli frekanslarda enerjisinin düşük olması, kokleadaki işitsel filtrelerin bazılarını meşgul ederken diğerlerini boşta bırakabilir. Bu durumda, işitme sistemi, koklea ve merkezi nöral yapılarda, meşgul ve boşta kalan bu işitsel filtreleri ayırt edebilme yeteneğine sahiptir. Bu ayırım süreci, işitsel bilgi işlemlemeyi optimize etmek için önemlidir. İşitme sistemi, meşgul filtrelerden gelen güçlü sinyaller varlığında dikkatini boşta kalan filtrelerin zayıf ama önemli bilgilerine yönlendirerek temporal bilgiyi optimal düzeyde işler.

Bu aşamadan sonra, işitme sistemindeki diğer adaptif mekanizmalar, özellikle de stokastik rezonans devreye girer. Lateral inhibisyonun etkisi altında, meşgul filtreler boşta kalan filtrelerin aktivitesini sınırlandırabilir. Ancak, stokastik rezonans gibi süreçler, işitme sistemini boşta ve hassasiyeti azalmış olan filtrelere odaklayarak hassasiyetini artırır. Bu adaptif mekanizmalar, spektral ayıklama becerisi ile birleştiğinde, işitme sistemi, sadece belirli bir

frekansla sınırlı kalmayarak, kendi karakteristik frekansı dışındaki uyarılardan kaynaklanan minimal nöral ateşleme değişimlerini dahi algılayabilir hale gelir. Böylece, çentikli gürültü varlığında aralık tespit etme eşikleri önemli ölçüde iyileşir.

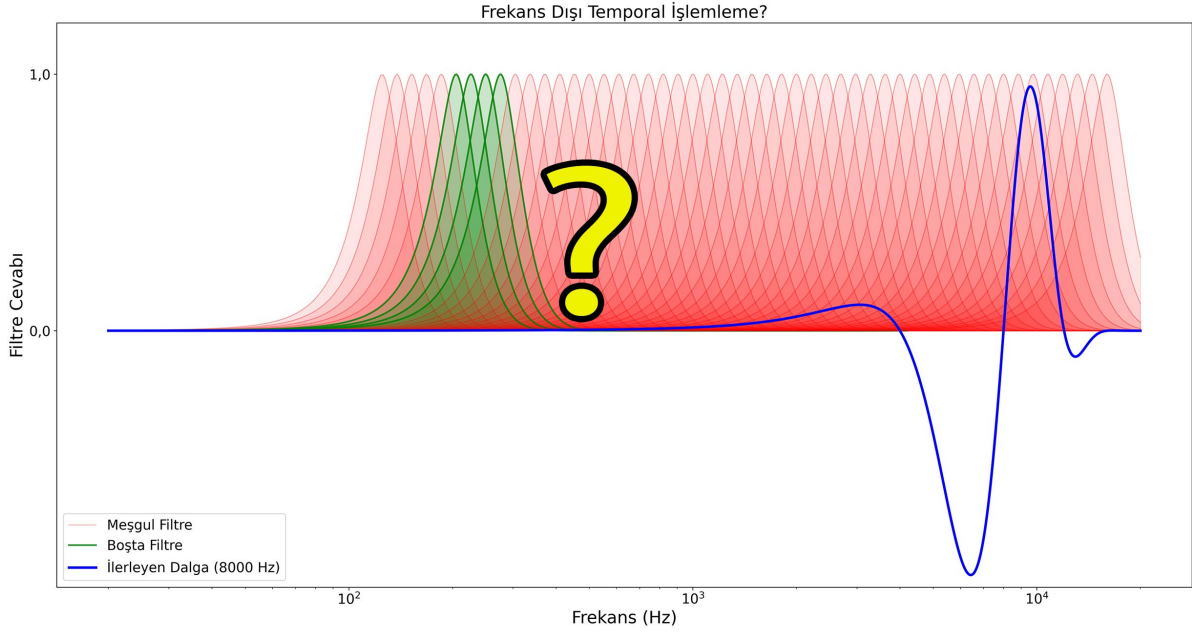
Çentikli gürültünün çentiğinin merkez frekansı, aralık tespit etme uyarısının 3-4 oktav üzerine çıkmasının ardından bu etki azalmaya başlasa da genel olarak aralık tespit etme eşikleri iyileşmeye devam eder. Bu iyileşmenin, ilerleyen dalganın koklea boyunca yayılmasıyla ateşleme paternlerini değiştirmesi ve stokastik rezonans ile spektral ayıklama mekanizmalarının, normalde ayırtılamayan temporal bilgileri işlenebilir hale getirmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu süreç Şekil 5.3'te görselleştirilmiştir. Şekilde, 2000 Hz'de bir çentiğe sahip çentikli gürültüden 25 ms sonra sunulan 250 Hz frekanslı tonal uyarının oluşturduğu ilerleyen dalganın, 2000 Hz ve çevresindeki işitsel filtrelerle nasıl etkileştiği gösterilmektedir. Normalde, 250 Hz'lik bir uyarının bu filtreler tarafından işlenmesi zordur. Ancak, stokastik rezonans sayesinde bu filtrelerin hassasiyeti artar ve spektral ayıklama ile bu temporal bilgiler işlenebilir hale gelir.



Şekil 5.3: 2000 Hz çentikli gürültü sonrası sunulan 250 Hz uyarının temporal özelliklerinin frekans dışı işlenmesi.

Çalışmamızın bulgularına dayanarak öngördüğümüz bu model, işitme sisteminin kokleanın tamamını bir temporal çözümleyici olarak değerlendirdiğini ve spektral-temporal bilgi işleme için boşta kalan işitsel filtrelerle odaklandığını ileri sürmektedir. Bu model, işitme sisteminin dinamik adaptasyon yeteneğini ve karmaşık ses ortamlarında bilgi işleme

süreçlerini optimize etme kabiliyetini anlamak için önemli bir adım sunmaktadır. Koklea ve santral işitsel yolların bu dinamik adaptasyonu, zor koşullarda dahi temporal bilgiyi nasıl etkili bir şekilde işleyebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.4: 8000 Hz ilerleyen dalga kokleanın alçak frekans bölgelerinde işlemlenebilecek düzeyde ipucu oluşturamamaktadır.

Çalışmamızda 8000 Hz tonal uyarılarla yapılan MATE testinde 250 Hz çentikli gürültü bile, beyaz gürültüye kıyasla, aralık tespit etme eşiğini iyileştirici bir etki sergilemiştir ($p < 0,05$). Fakat ilerleyen dalga teorisine göre yüksek frekanslı bu uyarının alçak frekans bölgesinde işlemlenebilir bir ipucu oluşturması güçtür. Bunun nedeni ilerleyen dalga teorisinin kokleadaki aktif süreçleri açıklamamasıdır. Şekil 5.4'te 8000 Hz ilerleyen dalganın üretebileceği maksimum dalga zarfı görülmektedir. Görüldüğü üzere alçak frekanslarda, yüksek uyarın şiddetlerinde bile, ilerleyen dalga zarfının etkisi yok denecek kadar azdır. Günümüzde işitmenin koklea düzeyinde birçok aktif ve non-lineer süreci içerdiği bilinmektedir. Bu nedenle, literatürdeki mevcut bulguları bir araya getirip bu etkileri bütüncül bir şekilde açıklayacak, daha kapsamlı ve tutarlı bir teoriye ihtiyaç olduğu açıktır.

5.8. ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI VE İLERİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elde edilen bulgular, işitme sisteminin temporal çözünürlük becerilerine dair önemli ipuçları sunmakla birlikte, çalışmanın bazı sınırlılıkları da mevcuttur.

1. **Katılımcı Profili:** Çalışmada sadece normal işiten bireyler yer almıştır. Bu durum, bulguların işitme kaybı olan bireyler veya farklı yaş grupları için genellenebilirliğini sınırlayabilir. İşitme kaybı olan bireylerde, özellikle yaşa bağlı işitme kaybı durumlarında, işitme sisteminin stokastik rezonans ve spektral ayıklama mekanizmalarının nasıl etkilendiği tam olarak bilinmemektedir. İlerleyen çalışmalarda daha geniş bir örneklem ile işitme kayıplılar da dahil edilerek modelimizin sınırlarının araştırılması hedeflenmektedir.
2. **Uyaran ve Gürültü Seçimi:** Bu çalışmada kullanılan çentikli gürültü ve tonal uyaranlar, kokleada oluşturulan mekanizmaların belirli frekans bölgeleri için geçerli olduğunu göstermektedir. Ancak, diğer frekans bantları için veya farklı türde gürültüler altında benzer sonuçlar elde edilip edilemeyeceği henüz test edilmemiştir. Dolayısıyla, bulguların genelleştirilebilmesi için, sonraki çalışmalarda, saf ses uyaranlar kullanılarak yapılan aralık tespit etme görevlerine ek olarak farklı frekans bantlarında dar bant gürültüler ve klik uyaranlar kullanılarak modelin doğrulanması hedeflenmektedir.
3. **Modelleme Yaklaşımı:** Çalışmada öngörülen psikoakustik model, kokleanın tümünü bir temporal çözümleyici olarak ele alırken, işitme sisteminin daha yüksek merkezlerinde gerçekleşen nöral süreçleri incelememiştir. Önerilen psikoakustik modelin tam olarak nasıl ve hangi nöral yollarla gerçekleştiği, sonraki çalışmalarda daha ileri elektrofizyolojik yöntemler kullanılarak araştırılacaktır.
4. **Tekrar Edilebilirlik:** Bu çalışmada elde edilen bulgular, mevcut literatürde nadir görülen bir psikoakustik model ve ileri maskeleme paradigması kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle çalışma bulgularımızın önemli bir kısmını destekleyecek literatür bilgisi kısıtlıdır. Çalışma bulgularının tekrar edilebilirliği ve diğer laboratuvar koşullarında doğrulanabilirliğini araştırarak ileri çalışmalar, çalışmanın güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmamız, işitme sisteminin kokleadaki meşgul ve boşta kalan işitsel filtreleri ayırt ederek, spektral ayıklama ve stokastik rezonans gibi mekanizmalar aracılığıyla temporal bilgiyi daha etkin bir şekilde işleyebildiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, çentikli gürültünün ileri maskeleye yöntemiyle sunulmasının aralık tespit etme eşiklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Çentikli gürültüde, çentiğin merkez frekansının uyaran frekansına yakın olduğu durumlarda aralık tespit etme eşiklerinin belirgin şekilde iyileştiği görülmüştür. Bu etkinin, çentiğin merkez frekansı uyaran frekansından uzaklaştıkça azaldığı, ancak çentiğin merkez frekansı ile uyaran frekansı arasında 3-4 oktav olduğunda dahi aralık tespit etme eşiklerinin beyaz gürültüye kıyasla daha iyi seviyelere ulaştığı saptanmıştır.

Aralık tespit etme eşiklerini modellemek için kullanılan Weibull CDF modeli, gözlemlenen verilere diğer psikometrik modellerden daha iyi uyum sağlamış ve %75 olasılıkla aralık tespit etme eşiği hesaplamalarında güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmamızda, cinsiyet ve işitsel uyaranın sunulduğu kulak faktörleri açısından yapılan analizlerde aralık tespit etme eşiklerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Çalışmanın genelleştirilebilirliğini artırmak amacıyla, yaşa bağlı işitme kaybı, farklı derecelerde işitme kaybı olan bireyler ve çocuklar gibi farklı popülasyon gruplarında benzer deneylerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle yaşa bağlı işitme kaybı yaşayan bireylerde, stokastik rezonans ve spektral ayıklama mekanizmalarının nasıl değiştiğini anlamak, bu mekanizmaların işlevselliği hakkında daha geniş bir perspektif sağlayacaktır. İlerleyen çalışmalarda, bu popülasyon gruplarında önerilen modelin geçerliliği test edilecektir.

Bulguların genelleştirilebilmesi için, sonraki çalışmalarda saf ses uyaranları kullanılarak yapılan aralık tespit etme görevlerine ek olarak, farklı frekans bantlarında dar bant gürültüler ve klik uyaranlar kullanılarak modelin doğrulanması hedeflenmelidir. Bu kapsamda, farklı uyaran türlerinin ve frekans bantlarının temporal çözünürlük üzerindeki etkileri daha

geniş bir perspektifle değerlendirilecektir. Gelecek çalışmalar, bu uyaran ve gürültü çeşitliliğini dikkate alarak modelin doğruluğunu artırmayı amaçlayacaktır.

Çalışmada önerilen psikoakustik modelin nörofizyolojik temellerini daha iyi anlamak için, ileri elektrofizyolojik yöntemler kullanılarak koklea ve merkezi işitsel yolların nöral süreçleri detaylı olarak incelenmelidir. Özellikle işitsel uyaranların frekans dışı ipuçlarının nöral işitsel yollarda nasıl işlendiğine dair daha fazla bilgi edinmek önemlidir. Bu doğrultuda, gelecekteki çalışmalar nörofizyolojik süreçleri daha derinlemesine inceleyerek modelin biyolojik geçerliliğini ortaya koymayı amaçlayacaktır.

Son olarak, işitme cihazları ve koklear implantlar gibi yardımcı işitme teknolojilerinin, çentikli gürültü ve stokastik rezonans gibi doğal işitme süreçlerini nasıl optimize edebileceği üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Bu, özellikle işitme kaybı olan bireyler için daha etkili rehabilitasyon yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir. İleri çalışmalarda, bu teknolojilerin modelle entegrasyonu sağlanarak daha etkili rehabilitasyon yöntemleri geliştirilmesi hedeflenecektir.

KAYNAKLAR

- Afolabi, O. A., 2020. Foreign body in the ear: a review of methods of management. *Savannah J. Med. Res. Pract.*, 8, 1.
- Aizenberg, M., Mwilambwe-Tshilobo, L., Briguglio, J. J., Natan, R. G. & Geffen, M. N., 2015. Bidirectional Regulation of Innate and Learned Behaviors That Rely on Frequency Discrimination by Cortical Inhibitory Neurons. *PLoS Biol*, 13, e1002308.
- Albernaz, P., e Maia, F. Z., Carmona, S., Cal, R. V. R. & Zalazar, G., 2019. Anatomy and Clinical Physiology of the Organs of Equilibrium. *The New Neurotology: A Comprehensive Clinical Guide*. Switzerland: Springer Nature.
- Alberts, G. & Puria, S., 2023. Wavenumber-frequency relationships in the cochlea: Measurements and models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154, A239-A239.
- Alenzi, H. & Lineton, B., 2021. Transient otoacoustic emissions and audiogram fine structure in the extended high-frequency region. *International Journal of Audiology*, 60, 985-994.
- Alizadeh, M., Rezaei, S. & Bagheri, S. F., 2015. On the Estimation for the Weibull Distribution. *Annals of Data Science*, 2, 373-390.
- Allen, E. J., Mesik, J., Kay, K. N. & Oxenham, A. J., 2022. Distinct representations of tonotopy and pitch in human auditory cortex. *J. Neurosci.*, 42, 416-434.
- Altoè, A. & Charaziak, K. K., 2023. Intracochlear overdrive: Characterizing nonlinear wave amplification in the mouse apex. *J Acoust Soc Am*, 154, 3414-3428.
- Altoè, A. & Shera, C. A., 2020. The cochlear ear horn: geometric origin of tonotopic variations in auditory signal processing. *Scientific Reports*, 10, 20528.
- Alvord, L. S. & Farmer, B. L., 1997. Anatomy and orientation of the human external ear. *J Am Acad Audiol*, 8, 383-90.
- Angelborg, C., Hultcrantz, E. & Agerup, B., 1977. The cochlear blood flow. *Acta Otolaryngol*, 83, 92-7.
- Angeloni, C. & Geffen, M. N., 2018. Contextual modulation of sound processing in the auditory cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 49, 8-15.
- Anschuetz, L., Presutti, L., Marchioni, D., Bonali, M., Wimmer, W., Villari, D. & Caversaccio, M., 2018. Discovering Middle Ear Anatomy by Transcanal Endoscopic Ear Surgery: A Dissection Manual. *J Vis Exp*.
- Arslanova, I., Wang, K., Gomi, H. & Haggard, P., 2020. Somatosensory evoked potentials, indexing lateral inhibition, are modulated according to the mode of perceptual processing: comparing or combining multi-digit tactile motion. *bioRxiv*, 2020.10.15.338111.
- Ashmore, J., 2008. Cochlear outer hair cell motility. *Physiol Rev*, 88, 173-210.
- Ashmore, J., 2020. Tonotopy of cochlear hair cell biophysics (excl. mechanotransduction). *Curr. Opin. Physiol.*, 18, 1-6.
- Ashmore, J. F., 1987. A fast motile response in guinea-pig outer hair cells: the cellular basis of the cochlear amplifier. *J Physiol*, 388, 323-47.

- Atkinson, P. J., Huarcaya Najarro, E., Sayyid, Z. N. & Cheng, A. G., 2015. Sensory hair cell development and regeneration: similarities and differences. *Development*, 142, 1561-71.
- Augustine, G. J., 2018. Neural Signaling. In: Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., Mooney, R. D., Platt, M. L. & White, L. E. (eds.) *Neuroscience*. 6th ed. New York: Oxford University Press.
- Bai, J.-P., Moeini-Naghani, I., Zhong, S., Li, F.-Y., Bian, S., Sigworth, F. J., Santos-Sacchi, J. & Navaratnam, D., 2017. Current carried by the Slc26 family member prestin does not flow through the transporter pathway. *Sci. Rep.*, 7.
- Banda, G., 2018. A Brief Review of Independent, Dependent and One Sample t-test. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, 4, 50-54.
- Bavi, N., Clark, M. D., Contreras, G. F., Shen, R., Reddy, B. G., Milewski, W. & Perozo, E., 2021. The conformational cycle of prestin underlies outer-hair cell electromotility. *Nature*, 600, 553-558.
- Békésy, G. V. & Wever, E. G., 1960. *Experiments in hearing*, New York, McGraw-Hill.
- Bell, A., 2004. Hearing: Travelling Wave or Resonance? *PLOS Biology*, 2, e337.
- Ben, G., Nelson, M. & Dan, E., 2011. The Auditory System as a Filter Bank. *Speech and Audio Signal Processing: Processing and Perception of Speech and Music*. Wiley.
- Benzi, R., Sutera, A. & Vulpiani, A., 1981. The mechanism of stochastic resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 14, L453.
- Berkson, J., 1944. Application of the Logistic Function to Bio-Assay. *Journal of the American Statistical Association*, 39, 357-365.
- Bidelman, G. M., Jennings, S. G. & Strickland, E. A., 2015. PsyAcoustX: A flexible MATLAB® package for psychoacoustics research. *Frontiers in Psychology*, 6.
- Bonferroni, C., 1936. Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità. Pubbl Del R Ist Super Di Sci Econ e Commer Di Firenze. Seeber.
- Branco, T. & Staras, K., 2009. The probability of neurotransmitter release: variability and feedback control at single synapses. *Nat Rev Neurosci*, 10, 373-83.
- Branstetter, B. K., Nease, K., Accomando, A. W., Davenport, J., Felice, M., Peters, K. & Robeck, T., 2023. Temporal integration of tone signals by a killer whale (*Orcinus orca*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154 6, 3906-3915.
- Bregman, A. S., 1990. *Auditory Scene Analysis*, The MIT Press.
- Brown, S. & Nicholls, M. E., 1997. Hemispheric asymmetries for the temporal resolution of brief auditory stimuli. *Percept Psychophys*, 59, 442-7.
- Brownell, W. E., Bader, C. R., Bertrand, D. & de Ribaupierre, Y., 1985. Evoked mechanical responses of isolated cochlear outer hair cells. *Science*, 227, 194-6.
- Brughera, A., Dunai, L. & Hartmann, W. M., 2013. Human interaural time difference thresholds for sine tones: The high-frequency limit. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133, 2839-2855.
- Buran, B. N., Strenzke, N., Neef, A., Gundelfinger, E. D., Moser, T. & Liberman, M. C., 2010. Onset coding is degraded in auditory nerve fibers from mutant mice lacking synaptic ribbons. *J Neurosci*, 30, 7587-97.
- Burford, C. M. & Mason, M. J., 2016. Early development of the malleus and incus in humans. *J Anat*, 229, 857-870.
- Burt, C., 1960. Gustav Theodor Fechner elemente Der psychophysik 1860. *Br. J. Stat. Psychol.*, 13, 1-10.
- Buss, E. & Dai, H., 2023. Steep temporal integration for tone detection in a multi-tone, random-frequency masker. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154 5, 3429-3437.

- Buss, E., Whittle, L. N., Grose, J. H. & Hall, J. W., 3rd. 2009. Masking release for words in amplitude-modulated noise as a function of modulation rate and task. *J Acoust Soc Am*, 126, 269-80.
- Buus, S. r., 1985. Release from masking caused by envelope fluctuations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 1958-1965.
- Buz, E., Dwyer, N. C., Lai, W., Watson, D. G. & Gifford, R. H., 2023. Integration of fundamental frequency and voice-onset-time to voicing categorization: Listeners with normal hearing and bimodal hearing configurations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153 3, 1580.
- Cabrera, L. & Lau, B. K., 2022. The development of auditory temporal processing during the first year of life. *Hearing Balance Commun*, 20, 155-165.
- Cai, D., Han, R., Liu, M., Xie, F., You, L., Zheng, Y., Zhao, L., Yao, J., Wang, Y., Yue, Y., Schreiner, C. E. & Yuan, K., 2018. A Critical Role of Inhibition in Temporal Processing Maturation in the Primary Auditory Cortex. *Cerebral Cortex*, 28, 1610–1624.
- Calandruccio, L., Wasiuk, P. A., Buss, E., Leibold, L. J., Kong, J., Holmes, A. & Oleson, J., 2019. The effect of target/masker fundamental frequency contour similarity on masked-speech recognition. *J Acoust Soc Am*, 146, 1065.
- Carlton, A. J., Jeng, J. Y., Grandi, F. C., De Faveri, F., Ceriani, F., De Tomasi, L., Underhill, A., Johnson, S. L., Legan, K. P., Kros, C. J., Richardson, G. P., Mustapha, M. & Marcotti, W., 2023. A critical period of prehearing spontaneous Ca(2+) spiking is required for hair-bundle maintenance in inner hair cells. *Embo j*, 42, e112118.
- Carmichael, M. E., Hall, S. E. & Phillips, D. P., 2008. Ear and contralateral masker effects on auditory temporal gap detection thresholds. *Hear Res*, 245, 18-23.
- Carricondo, F. & Romero-Gómez, B., 2019. The Cochlear Spiral Ganglion Neurons: The Auditory Portion of the VIII Nerve. *Anat Rec (Hoboken)*, 302, 463-471.
- Cerracchio, E., Miletić, S. & Forstmann, B. U., 2023. Modelling decision-making biases. *Front Comput Neurosci*, 17, 1222924.
- Chapeau-Blondeau, F. & Rousseau, D., 2002. NOISE IMPROVEMENTS IN STOCHASTIC RESONANCE: FROM SIGNAL AMPLIFICATION TO OPTIMAL DETECTION. *Fluctuation and Noise Letters*, 02.
- Chatfield, M. D., Cole, T. J., de Vet, H. C. W., Marquart-Wilson, L. & Farewell, D. M., 2023. blandaltman: A command to create variants of Bland–Altman plots. *The Stata Journal*, 23, 851-874.
- Chen, F., Zha, D., Yang, X., Hubbard, A. & Nuttall, A., 2018. Hydromechanical Structure of the Cochlea Supports the Backward Traveling Wave in the Cochlea In Vivo. *Neural Plast*, 2018, 7502648.
- Cho, N. H., Wang, H. & Puria, S., 2022. Cochlear Fluid Spaces and Structures of the Gerbil High-Frequency Region Measured Using Optical Coherence Tomography (OCT). *J Assoc Res Otolaryngol*, 23, 195-211.
- Cloes, M., Renson, T., Johnen, N., Thelen, N. & Thiry, M., 2013. Differentiation of Boettcher's cells during postnatal development of rat cochlea. *Cell Tissue Res*, 354, 707-16.
- Cogen, T., Cetin Kara, H., Kara, E., Telci, F. & Yener, H. M., 2024. Investigation of the relationship between hyperacusis and auditory processing difficulties in individuals with normal hearing. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 281, 469-477.
- Cohen, J., 1988. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, New York, NY, Routledge Member of the Taylor and Francis Group.
- Constantian, M. B., 1982. Use of auricular cartilage in orbital floor reconstruction. *Plast Reconstr Surg*, 69, 951-5.

- Cooke, M., 2006. A glimpsing model of speech perception in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119, 1562-1573.
- Cooper, N. P., Vavakou, A. & van der Heijden, M., 2018. Vibration hotspots reveal longitudinal funneling of sound-evoked motion in the mammalian cochlea. *Nature Communications*, 9, 3054.
- Cronbach, L. J., 1951. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16, 297-334.
- da Costa Monsanto, R., Pauna, H. F. & Cureoglu, S., 2023. The Anatomy of the Vestibular System. In: Crane, B. T., Lustig, L. & de Souza, C. (eds.) *Disorders of the Vestibular System: Diagnosis and Management*. Cham: Springer International Publishing.
- Dallos, P., 2008. Cochlear amplification, outer hair cells and prestin. *Curr Opin Neurobiol*, 18, 370-6.
- DeBruine, L. M. & Barr, D. J., 2021. Understanding Mixed-Effects Models Through Data Simulation. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 4, 2515245920965119.
- Delacroix, L. & Malgrange, B., 2015. Cochlear afferent innervation development. *Hearing Research*, 330, 157-169.
- Dewey, J. B., Applegate, B. E. & Oghalai, J. S., 2019. Amplification and Suppression of Traveling Waves along the Mouse Organ of Corti: Evidence for Spatial Variation in the Longitudinal Coupling of Outer Hair Cell-Generated Forces. *The Journal of Neuroscience*, 39, 1805-1816.
- Dias, K. Z., Jutras, B., Acrani, I. O. & Pereira, L. D., 2012. Random Gap Detection Test (RGDT) performance of individuals with central auditory processing disorders from 5 to 25 years of age. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 76, 174-8.
- Dong, W. & Olson, E. S., 2008. Supporting evidence for reverse cochlear traveling waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123, 222-240.
- Dreyer, A. & Delgutte, B., 2006. Phase locking of auditory-nerve fibers to the envelopes of high-frequency sounds: implications for sound localization. *J Neurophysiol*, 96, 2327-41.
- Driver, E. C. & Kelley, M. W., 2020. Development of the cochlea. *Development*, 147.
- Easwar, V., Banyard, A., Aiken, S. J. & Purcell, D. W., 2018. Phase-locked responses to the vowel envelope vary in scalp-recorded amplitude due to across-frequency response interactions. *Eur J Neurosci*, 48, 3126-3145.
- Eckhard, A., Gleiser, C., Arnold, H., Rask-Andersen, H., Kumagami, H., Müller, M., Hirt, B. & Löwenheim, H., 2012. Water channel proteins in the inner ear and their link to hearing impairment and deafness. *Molecular Aspects of Medicine*, 33, 612-637.
- Eddins, A. C. & Peterson, J. R., 1999. Time-Intensity Trading in the Late Auditory Evoked Potential. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42, 516-525.
- Eddins, D. A. & Green, D. M., 1995. Temporal integration and temporal resolution. *Hearing*. San Diego, CA, US: Academic Press.
- Eddins, D. A., Hall, J. W., 3rd & Grose, J. H., 1992. The detection of temporal gaps as a function of frequency region and absolute noise bandwidth. *J Acoust Soc Am*, 91, 1069-77.
- Eggermont, J. J., 1995. Neural correlates of gap detection and auditory fusion in cat auditory cortex. *NeuroReport*, 6, 1645-1648.
- Eggermont, J. J., 1999. Neural correlates of gap detection in three auditory cortical fields in the Cat. *Journal of neurophysiology*, 81 5, 2570-81.
- Eggermont, J. J., 2000. Neural responses in primary auditory cortex mimic psychophysical, across-frequency-channel, gap-detection thresholds. *Journal of neurophysiology*, 84 3, 1453-63.

- Eggermont, J. J., 2003. Central tinnitus. *Auris Nasus Larynx*, 30 Suppl, S7-12.
- Eggermont, J. J., 2015a. Animal models of auditory temporal processing. *Int J Psychophysiol*, 95, 202-15.
- Eggermont, J. J., 2015b. *Auditory Temporal Processing and its Disorders*, Oxford University Press.
- Eggermont, J. J., 2019. Cochlea and auditory nerve. *Handb Clin Neurol*, 160, 437-449.
- Eggermont, J. J. & Odenthal, D. W., 1974. Electrophysiological investigation of the human cochlea. Recruitment, masking and adaptation. *Audiology*, 13, 1-22.
- Eggink, M. C., Frijns, J. H. M., Sagers, J. E., O'Malley, J. T., Liberman, M. C. & Stankovic, K. M., 2022. Human vestibular schwannoma reduces density of auditory nerve fibers in the osseous spiral lamina. *Hear Res*, 418, 108458.
- Egorova, M. A., Akimov, A. G., Khorunzhii, G. D. & Ehret, G., 2020. Frequency response areas of neurons in the mouse inferior colliculus. III. Time-domain responses: Constancy, dynamics, and precision in relation to spectral resolution, and perception in the time domain. *PLoS ONE*, 15.
- Ehrenberger, K., Felix, D. & Svozil, K., 1999. Stochastic resonance in cochlear signal transduction. *Acta Otolaryngol*, 119, 166-70.
- Ekdale, E. G., 2016. Form and function of the mammalian inner ear. *J Anat*, 228, 324-37.
- Elangovan, S. & Stuart, A., 2008. Natural boundaries in gap detection are related to categorical perception of stop consonants. *Ear Hear*, 29, 761-74.
- Engstrom, H., 1960. The cortilymph, the third lymph of the inner ear. *Acta Morphol Neerl Scand*, 3, 195-204.
- Erinc, M. & Derinsu, U., 2020. Turkish Adaptation of Khalfa Hyperacusis Questionnaire. *Medeni Med J*, 35, 142-150.
- Evans, E. F., 1972. The frequency response and other properties of single fibres in the guinea-pig cochlear nerve. *J Physiol*, 226, 263-87.
- Fallah, E., Strimbu, C. E. & Olson, E. S., 2019. Nonlinearity and amplification in cochlear responses to single and multi-tone stimuli. *Hear. Res.*, 377, 271-281.
- Faran, M. & Furst, M., 2023. Inner-hair-cell induced hearing loss: A biophysical modeling perspective. *J Acoust Soc Am*, 153, 1776.
- Fereczkowski, M., Dau, T. & Macdonald, E. N., 2021. Comparison of Behavioral and Physiological Measures of the Status of the Cochlear Nonlinearity. *Trends in Hearing*, 25, 233121652110161.
- Fetter, M., Vestibular System Disorders. 2010.
- Fettiplace, R., 2023. Cochlear tonotopy from proteins to perception. *Bioessays*, 45, e2300058.
- Fitzgibbons, P. J., 1983. Temporal gap detection in noise as a function of frequency, bandwidth, and level. *J Acoust Soc Am*, 74, 67-72.
- Fitzgibbons, P. J., 1984. Temporal gap resolution in narrow-band noises with center frequencies from 6000-14000 Hz. *J Acoust Soc Am*, 75, 566-9.
- Fitzpatrick, D. & Mooney, R. D., 2018. Sensation and Sensory Processing. In: Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., Mooney, R. D., Platt, M. L. & White, L. E. (eds.) *Neuroscience*. 6th ed.: Oxford University Press.
- Fletcher, H., 1940. Auditory Patterns. *Reviews of Modern Physics*, 12, 47-65.
- Fletcher, H. & Munson, W. A., 1933. Loudness, its definition, measurement and calculation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5, 82-108.
- Florentine, M. & Buus, S., 1984. Temporal gap detection in sensorineural and simulated hearing impairments. *J Speech Hear Res*, 27, 449-55.
- Florentine, M., Buus, S. & Geng, W., 1999. Psychometric functions for gap detection in a yes-no procedure. *J Acoust Soc Am*, 106, 3512-20.

- Flores, Emma N., Duggan, A., Madathany, T., Hogan, Ann K., Márquez, Freddie G., Kumar, G., Seal, Rebecca P., Edwards, Robert H., Liberman, M. C. & García-Añoveros, J., 2015. A Non-canonical Pathway from Cochlea to Brain Signals Tissue-Damaging Noise. *Current Biology*, 25, 606-612.
- Fogerty, D., Carter, B. L. & Healy, E. W., 2018. Glimpsing speech in temporally and spectro-temporally modulated noise. *J Acoust Soc Am*, 143, 3047.
- Fogerty, D., Sevich, V. A. & Healy, E. W., 2020. Spectro-temporal glimpsing of speech in noise: Regularity and coherence of masking patterns reduces uncertainty and increases intelligibility. *J Acoust Soc Am*, 148, 1552.
- Formby, C., Gerber, M. J., Sherlock, L. P. & Magder, L. S., 1998. Evidence for an across-frequency, between-channel process in asymptotic monaural temporal gap detection. *J Acoust Soc Am*, 103, 3554-60.
- Formby, C. & Muir, K., 1989. Effects of randomizing signal level and duration on temporal gap detection. *Audiology*, 28, 250-7.
- Forrest, T. G. & Green, D. M., 1987. Detection of partially filled gaps in noise and the temporal modulation transfer function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82, 1933-1943.
- Fournier, P. & Hébert, S., 2016. The gap-startle paradigm to assess auditory temporal processing: Bridging animal and human research. *Psychophysiology*, 53 5, 759-66.
- Fox, N. P., Leonard, M. K., Sjerps, M. J. & Chang, E. F., 2020. Transformation of a temporal speech cue to a spatial neural code in human auditory cortex. *eLife*, 9.
- Frank, G., Hemmert, W. & Gummer, A. W., 1999. Limiting dynamics of high-frequency electromechanical transduction of outer hair cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 96, 4420-4425.
- Fuchs, P. A. & Lauer, A. M., 2019. Efferent Inhibition of the Cochlea. *Cold Spring Harb Perspect Med*, 9.
- Gabor, D., 1946. Theory of Communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General*, 94, 58-58.
- Gagov, H., Chichova, M. & Mladenov, M., 2018. Endolymph composition: paradigm or inevitability? *Physiol Res*, 67, 175-179.
- Galeano-Naranjo, C., Veléz-Ortega, A. C. & Frolenkov, G. I., 2021. Stereocilia Bundle Imaging with Nanoscale Resolution in Live Mammalian Auditory Hair Cells. *J Vis Exp*.
- Gao, Y., Manzoor, N. & Kaltenbach, J. A., 2016. Evidence of activity-dependent plasticity in the dorsal cochlear nucleus, in vivo, induced by brief sound exposure. *Hear Res*, 341, 31-42.
- Ge, J., Elferich, J., Dehghani-Ghahnaviyeh, S., Zhao, Z., Meadows, M., von Gersdorff, H., Tajkhorshid, E. & Gouaux, E., 2021. Molecular mechanism of prestin electromotive signal amplification. *Cell*, 184, 4669-4679.e13.
- Gelfand, S. A., 2016. Anatomy and Physiology of the Auditory System. *Essentials of Audiology*. 4 ed. New York: Thime.
- Gelfand, S. A. & Calandruccio, L., 2023. *Essentials of audiology*.
- Giraudi, D., Salvi, R., Henderson, D. & Hamernik, R., 1980. Gap detection by the chinchilla. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68, 802-806.
- Goodman, S. S., Lee, C., Guinan, J. J. & Lichtenhan, J. T., 2020. The Spatial Origins of Cochlear Amplification Assessed by Stimulus-Frequency Otoacoustic Emissions. *Biophysical Journal*, 118, 1183-1195.
- Goodman, S. S., Lefler, S. M., Lee, C., Guinan, J. J., Jr. & Lichtenhan, J. T., 2024. The Origin Along the Cochlea of Otoacoustic Emissions Evoked by Mid-Frequency Tone Pips. *J Assoc Res Otolaryngol*.

- Green, D. M. & Swets, J. A., 1966. *Signal detection theory and psychophysics*, New York: Wiley.
- Grisold, W., Struhal, W. & Grisold, A., 2023. Cranial Nerve VIII: Vestibular Nerve. *The Cranial Nerves in Neurology: A comprehensive and systematic evaluation of cranial nerves, pathology and specific conditions*. Cham: Springer International Publishing.
- Gu, F., Wong, L., Chen, F., Huang, W.-T., Wang, L. & Hu, A. X., 2018. Lateral Inhibition is a Neural Mechanism Underlying Mismatch Negativity. *Neuroscience*, 385, 38-46.
- Hain, T. C. & Helminski, J. O., 2014. Anatomy and physiology of the normal vestibular system. In: Herman, S. J. & Clendaniel, R. A. (eds.) *Vestibular rehabilitation*. 4 ed. Philadelphia: F.A. Davis Company.
- Hall, J. W., 3rd, Buss, E. & Grose, J. H., 2007. Spectral integration and wideband analysis in gap detection and overshoot paradigms. *J Acoust Soc Am*, 122, 3598-608.
- Hall, J. W., III, Buss, E., Ozmeral, E. J. & Grose, J. H., 2016. The effect of noise fluctuation and spectral bandwidth on gap detection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 1601-1610.
- Harris, D. M. & Dallos, P., 1979. Forward masking of auditory nerve fiber responses. *Journal of neurophysiology*, 42 4, 1083-1107.
- He, W., Burwood, G., Fridberger, A., Nuttall, A. L. & Ren, T., 2022. An outer hair cell-powered global hydromechanical mechanism for cochlear amplification. *Hear Res*, 423, 108407.
- Heil, P. & Peterson, A. J., 2019. Nelson's notch in the rate-level functions of auditory-nerve fibers might be caused by PIEZO2-mediated reverse-polarity currents in hair cells. *Hearing Research*, 381, 107783.
- Helmholtz, H. L. F., 1877. *Sensations of Tone: As a Pyhsiological Basis for The Theory of Music, 4th Ed. [Translated By Ellis, A. J. (1895)]*, Longmans, Green, And Co.
- Henry, K. R., 2000. Low-frequency acoustic modulations generated by the high-frequency portion of the cochlea, noninvasively recorded from the scalp of mice (*Mus musculus*). *Journal of comparative psychology*, 114 1, 22-35.
- Henson, M. M., Henson, O. W. & Jenkins, D. B., 1984. The attachment of the spiral ligament to the cochlear wall: Anchoring cells and the creation of tension. *Hearing Research*, 16, 231-242.
- Herrmann, B. & Johnsrude, I. S., 2018. Neural Signatures of the Processing of Temporal Patterns in Sound. *The Journal of Neuroscience*, 38, 5466-5477.
- Hodge, S. E., Menezes, D. C., Brown, K. D. & Grose, J. H., 2018. Forward Masking of the Speech-Evoked Auditory Brainstem Response. *Otol Neurotol*, 39, 150-157.
- Holt, J. R., Fettiplace, R. & Müller, U., 2024. Sensory transduction in auditory hair cells-PIEZOs can't touch this. *J Gen Physiol*, 156.
- Hoshino, N., Altarshan, Y., Alzein, A., Fernando, A. M., Nguyen, H. T., Majewski, E. F., Chen, V. C. F., Rochlin, M. W. & Yu, W.-M., 2021. Ephrin-A3 is required for tonotopic map precision and auditory functions in the mouse auditory brainstem. *J. Comp. Neurol.*, 529, 3633-3654.
- Hsiao, W. C., Chen, Y. C. & Liu, Y. W., 2021. Measuring Distortion-Product Otoacoustic Emission With a Single Loudspeaker in the Ear: Stimulus Design and Signal Processing Techniques. *Front Digit Health*, 3, 724539.
- Hudspeth, A. J., 2013. The Inner Ear. In: Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessel, T. M., Siegelbaum, S. A. & Hudspeth, A. J. (eds.) *Principles of Neural Science*. 5 ed. New York, USA: McGraw-Hill Medical.
- Hullfish, J., Sedley, W. & Vanneste, S., 2019. Prediction and perception: Insights for (and from) tinnitus. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 102, 1-12.

- Jabeen, T., Holt, J. C., Becker, J. R. & Nam, J.-H., 2020. Active outer hair cell motility can suppress vibrations in the organ of Corti. *bioRxiv*, 2020.01.03.893933.
- Jarque, C. M. & Bera, A. K., 1980. Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics Letters*, 6, 255-259.
- Jennings, S. G. & Chen, J., 2020. Masking of short tones in noise: Evidence for envelope-based, rather than energy-based detection. *J Acoust Soc Am*, 148, 211.
- Jerger, J., 1970. Clinical experience with impedance audiometry. *Arch Otolaryngol*, 92, 311-24.
- John, A. B., Hall, J. W., 3rd & Kreisman, B. M., 2012. Effects of advancing age and hearing loss on gaps-in-noise test performance. *Am J Audiol*, 21, 242-50.
- Johnson, S. L., Beurg, M., Marcotti, W. & Fettiplace, R., 2011. Prestin-driven cochlear amplification is not limited by the outer hair cell membrane time constant. *Neuron*, 70, 1143-54.
- Johnsson, L. G., 1971. Reissner's membrane in the human cochlea. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 80, 425-38.
- Johnstone, B. M. & Boyle, A. J., 1967. Basilar membrane vibration examined with the Mössbauer technique. *Science*, 158, 389-90.
- Joris, P. X., 2018. Phase-locking in acoustic hearing: Upper limits, enhancement, and transformations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 143, 1783-1783.
- Joris, P. X., Schreiner, C. E. & Rees, A., 2004. Neural Processing of Amplitude-Modulated Sounds. *Physiological Reviews*, 84, 541-577.
- Joris, P. X. & Smith, P. H., 2008. The volley theory and the spherical cell puzzle. *Neuroscience*, 154, 65-76.
- Kamrava, B. & Roehm, P. C., 2017. Systematic Review of Ossicular Chain Anatomy: Strategic Planning for Development of Novel Middle Ear Prostheses. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 157, 190-200.
- Kato, H. K., Gillet, S. N. & Isaacson, J. S., 2015. Flexible Sensory Representations in Auditory Cortex Driven by Behavioral Relevance. *Neuron*, 88, 1027-1039.
- Kaushal, N. & Kaushal, P., 2011. Human Earprints: A Review. *Journal of biometrics & biostatistics*, 2, 1-5.
- Kawaguchi, M., Mino, H. & Durand, D. M., 2011. Stochastic Resonance Can Enhance Information Transmission in Neural Networks. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58, 1950-1958.
- Keithley, E. M., 2020. Pathology and mechanisms of cochlear aging. *J Neurosci Res*, 98, 1674-1684.
- Kelly, J. B., van Adel, B. A. & Ito, M., 2009. Anatomical projections of the nuclei of the lateral lemniscus in the albino rat (*rattus norvegicus*). *Journal of Comparative Neurology*, 512, 573-593.
- Kemp, D. T., 1978. Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64, 1386-1391.
- Khalfa, S., Dubal, S., Veuillet, E., Perez-Diaz, F., Jouvent, R. & Collet, L., 2002. Psychometric normalization of a hyperacusis questionnaire. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*, 64, 436-42.
- Korrapati, S., Taukulis, I., Olszewski, R., Pyle, M., Gu, S., Singh, R., Griffiths, C., Martin, D., Boger, E., Morell, R. J. & Hoa, M., 2019. Single Cell and Single Nucleus RNA-Seq Reveal Cellular Heterogeneity and Homeostatic Regulatory Networks in Adult Mouse Stria Vascularis. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 12.
- Krauss, P., Metzner, C., Schilling, A., Schütz, C., Tziridis, K., Fabry, B. & Schulze, H., 2017. Adaptive stochastic resonance for unknown and variable input signals. *Sci Rep*, 7, 2450.

- Krauss, P., Tziridis, K., Metzner, C., Schilling, A., Hoppe, U. & Schulze, H., 2016. Stochastic Resonance Controlled Upregulation of Internal Noise after Hearing Loss as a Putative Cause of Tinnitus-Related Neuronal Hyperactivity. *Frontiers in Neuroscience*, 10.
- Krauss, P., Tziridis, K., Schilling, A. & Schulze, H., 2018. Cross-Modal Stochastic Resonance as a Universal Principle to Enhance Sensory Processing. *Front Neurosci*, 12, 578.
- Kuhl, P. K. & Miller, J. D., 1978. Speech perception by the chinchilla: identification function for synthetic VOT stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63 3, 905-17.
- Kumar, P., Sanju, H. K. & Nikhil, J., 2016. Temporal Resolution and Active Auditory Discrimination Skill in Vocal Musicians. *Int Arch Otorhinolaryngol*, 20, 310-314.
- La, Y., 2014. Clinical Application of Random Gap Detection Test. *Chinese Journal of Otology*.
- Langenberg, B., Helm, J. L. & Mayer, A., 2022. Repeated Measures ANOVA with Latent Variables to Analyze Interindividual Differences in Contrasts. *Multivariate Behavioral Research*, 57, 2-19.
- Lass, N. J. & Donai, J. J., 2023. Hearing science fundamentals. *Anatomy and Physiology of the Conductive Auditory Mechanism*. 2 ed. San Diego, CA: Plural Publishing.
- Lee, K. J., 2012. Anatomy of the Ear. In: Lee, K. J., Chan, Y. & Das, S. (eds.) *Essential Otolaryngology*. 10 ed.: The McGraw-Hill Companies.
- Leite Filho, C. A., Rocha-Muniz, C. N., Pereira, L. D. & Schochat, E., 2023. Auditory temporal resolution and backward masking in musicians with absolute pitch. *Front Neurosci*, 17, 1151776.
- Leschke, J., Rodriguez Orellana, G., Shera, C. A. & Oxenham, A. J., 2022. Auditory filter shapes derived from forward and simultaneous masking at low frequencies: Implications for human cochlear tuning. *Hear Res*, 420, 108500.
- Li, L., Chen, G. D. & Salvi, R., 2021. The increase in the degree of neural forward masking of cochlea following salicylate application. *Hear Res*, 407, 108279.
- Li, L. Y., Xiong, X. R., Ibrahim, L. A., Yuan, W., Tao, H. W. & Zhang, L. I., 2015. Differential Receptive Field Properties of Parvalbumin and Somatostatin Inhibitory Neurons in Mouse Auditory Cortex. *Cereb Cortex*, 25, 1782-91.
- Liberman, M. C., 1982. Single-Neuron Labeling in the Cat Auditory Nerve. *Science*, 216, 1239-1241.
- Liberman, M. C., Gao, J., He, D. Z. Z., Wu, X., Jia, S. & Zuo, J., 2002. Prestin is required for electromotility of the outer hair cell and for the cochlear amplifier. *Nature*, 419, 300-304.
- Licklider, J. C. R., 1951. A Duplex Theory of Pitch Perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 23, 147-147.
- Lister, J. J., Maxfield, N. D. & Pitt, G. J., 2007. Cortical evoked response to gaps in noise: within-channel and across-channel conditions. *Ear Hear*, 28, 862-78.
- Lister, J. J., Roberts, R. A., Shackelford, J. & Rogers, C. L., 2006. An adaptive clinical test of temporal resolution. *Am J Audiol*, 15, 133-40.
- Liu, C., Glowatzki, E. & Fuchs, P. A., 2015. Unmyelinated type II afferent neurons report cochlear damage. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 112, 14723-7.
- Liugan, M., Zhang, M. & Cakmak, Y. O., 2017. Neuroprosthetics for Auricular Muscles: Neural Networks and Clinical Aspects. *Front Neurol*, 8, 752.
- Luers, J. C. & Hüttenbrink, K. B., 2016. Surgical anatomy and pathology of the middle ear. *J Anat*, 228, 338-53.
- Lugo, E., Doti, R. & Faubert, J., 2008. Ubiquitous Crossmodal Stochastic Resonance in Humans: Auditory Noise Facilitates Tactile, Visual and Proprioceptive Sensations. *PLoS ONE*, 3.

- Lüscher, E. & Zwislocki, J., 1949. Adaptation of the Ear to Sound Stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 21, 135-139.
- Lyon, R. F., 2017. *Human and Machine Hearing*, Cambridge University Press.
- Mackey, C. A., Tarabillo, A. L. & Ramachandran, R., 2021. Three psychophysical metrics of auditory temporal integration in macaques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150 4, 3176.
- Majak, J., Zamysłowska-Szmytko, E., Rajkowska, E. & Śliwińska-Kowalska, M., 2015. Auditory Temporal Processing Tests - Normative Data For Polish-Speaking Adults. *Med Pr*, 66, 145-52.
- Mancheño, M., Aristegui, M. & Sañudo, J. R., 2017. Round and Oval Window Anatomic Variability: Its Implication for the Vibroplasty Technique. *Otology & Neurotology*, 38.
- Mao, B., Balasubramanian, T. & Kelley, M. W., 2020. Cochlear development, cellular patterning and tonotopy. *Curr. Opin. Physiol.*, 18, 116-122.
- Marchioni, D., Rubini, A. & Soloperto, D., 2021. Endoscopic Ear Surgery: Redefining Middle Ear Anatomy and Physiology. *Otolaryngol Clin North Am*, 54, 25-43.
- Matsunaga, T. & Morimoto, N., 2016. The auditory phenotype of children harboring mutations in the prestin gene. *Acta Otolaryngol*, 136, 397-401.
- Mattingly, M. M., Donell, B. M. & Rosen, M. J., 2018. Late maturation of backward masking in auditory cortex. *J Neurophysiol*, 120, 1558-1571.
- McCroskey, R. & Keith, R., 1996. Auditory Fusion Test-Revised (AFT-R). *Auditory Processing Disorders*.
- McDonnell, M. D. & Abbott, D., 2009. What Is Stochastic Resonance? Definitions, Misconceptions, Debates, and Its Relevance to Biology. *PLOS Computational Biology*, 5, e1000348.
- Meenderink, S. W. F. & Dong, W., 2022. Organ of Corti vibrations are dominated by longitudinal motion in vivo. *Commun Biol*, 5, 1285.
- Melloui, J., Bouattane, O. & Bakkoury, J., Study of the effect of a cause of tinnitus on the resonant frequency of the outer ear. 2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 16-19 April 2020. 1-4.
- Mishra, S. K. & Panda, M. R., 2016. Rapid auditory learning of temporal gap detection. *J Acoust Soc Am*, 140, E150.
- Mitaim, S. & Kosko, B., 2004. Adaptive stochastic resonance in noisy neurons based on mutual information. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 15, 1526-1540.
- Mocanu, H., Mocanu, A. I., Dascălu, I. T., Schipor, M. A. & Rădulescu, M., 2023. Materials for ossicular chain reconstruction: History and evolution (Review). *Med Int (Lond)*, 3, 13.
- Moore, B. C., Glasberg, B. R., Plack, C. J. & Biswas, A. K., 1988. The shape of the ear's temporal window. *J Acoust Soc Am*, 83, 1102-16.
- Moore, B. C., Glasberg, B. R. & Roberts, B., 1984. Refining the measurement of psychophysical tuning curves. *J Acoust Soc Am*, 76, 1057-66.
- Moore, B. C., Peters, R. W. & Glasberg, B. R., 1993. Detection of temporal gaps in sinusoids: effects of frequency and level. *J Acoust Soc Am*, 93, 1563-70.
- Mori, S., Oyama, K., Kikuchi, Y., Mitsudo, T. & Hirose, N., 2015. Between-Frequency and Between-Ear Gap Detections and Their Relation to Perception of Stop Consonants. *Ear Hear*, 36, 464-70.
- Moss, F., Ward, L. M. & Sannita, W. G., 2004. Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application. *Clin Neurophysiol*, 115, 267-81.

- Musiek, F. E. & Baran, J. A., 2020. The Auditory System: Anatomy, Physiology, and Clinical Correlates. 2 ed. San Diego, CA: Plural Publishing.
- Musiek, F. E. & Chermak, G. D., 2015. Psychophysical and behavioral peripheral and central auditory tests. *Handb Clin Neurol*, 129, 313-32.
- Musiek, F. E., Shinn, J. B., Jirsa, R., Bamiau, D. E., Baran, J. A. & Zaida, E., 2005. GIN (Gaps-In-Noise) test performance in subjects with confirmed central auditory nervous system involvement. *Ear Hear*, 26, 608-18.
- Naidu, R. C. & Mountain, D. C., 1998. Measurements of the stiffness map challenge a basic tenet of cochlear theories. *Hear Res*, 124, 124-31.
- Nanda, A., Mohapatra, D. B. B., Mahapatra, A. P. K., Mahapatra, A. P. K. & Mahapatra, A. P. K., 2021. Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. *Int. J. Stat. Appl. Math.*, 6, 59-65.
- Naumann, A., 2007. Otoplasty - techniques, characteristics and risks. *GMS Curr Top Otorhinolaryngol Head Neck Surg*, 6, Doc04.
- Nayagam, B. A., Muniak, M. A. & Ryugo, D. K., 2011. The spiral ganglion: connecting the peripheral and central auditory systems. *Hear Res*, 278, 2-20.
- Neal, M. T. & Zahorik, P., 2022. The impact of head-related impulse response delay treatment strategy on psychoacoustic cue reconstruction errors from virtual loudspeaker arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151, 3729-3744.
- Nelson, D. A. & Pavlov, R., 1989. Auditory time constants for off-frequency forward masking in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *Journal of speech and hearing research*, 32 2, 298-306.
- Nelson, D. A., Schroder, A. C. & Wojtczak, M., 2001. A new procedure for measuring peripheral compression in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *J Acoust Soc Am*, 110, 2045-64.
- Nguyen, T. & Bergles, D. E., 2024. Transient Receptor Potential (TRP) Channels in Cochlear Function: Looking Beyond Mechanotransduction. *J Assoc Res Otolaryngol*.
- Nilsen, K. E. & Russell, I. J., 2000. The spatial and temporal representation of a tone on the guinea pig basilar membrane. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 97, 11751-8.
- Noda, T. & Takahashi, H., 2023. Stochastic resonance in sparse neuronal network: functional role of ongoing activity to detect weak sensory input in awake auditory cortex of rat. *Cerebral Cortex*, 34.
- Noreña, A. J. & Eggermont, J. J., 2003. Neural Correlates of an Auditory Afterimage in Primary Auditory Cortex. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 4, 312-328.
- Noussios, G., Chouridis, P., Kostretzis, L. & Natsis, K., 2016. Morphological and Morphometrical Study of the Human Ossicular Chain: A Review of the Literature and a Meta-Analysis of Experience Over 50 Years. *J Clin Med Res*, 8, 76-83.
- Nuttall, A. L., 1988. Cochlear blood flow: measurement techniques. *Am J Otolaryngol*, 9, 291-301.
- Obando-Leitón, M., Dietze, A., Castañeda González, C. M., Saeedi, A., Karg, S. & Hemmert, W., 2023. On the Effect of High Stimulation Rates on Temporal Loudness Integration in Cochlear Implant Users. *Trends Hear*, 27, 23312165231207229.
- Oliver, D. L. & Morest, D. K., 1984. The central nucleus of the inferior colliculus in the cat. *J Comp Neurol*, 222, 237-64.
- Olson, E. S., 1999. Direct measurement of intra-cochlear pressure waves. *Nature*, 402, 526-9.
- Osen, K. K., 1969. Cytoarchitecture of the cochlear nuclei in the cat. *J Comp Neurol*, 136, 453-84.

- Ota, C. Y. & Kimura, R. S., 1980. Ultrastructural Study of the Human Spiral Ganglion. *Acta Oto-Laryngologica*, 89, 53-62.
- Oxenham, A. J. & Plack, C. J., 1998. Suppression and the upward spread of masking. *J Acoust Soc Am*, 104, 3500-10.
- Oxenham, A. J. & Plack, C. J., 2000. Effects of masker frequency and duration in forward masking: further evidence for the influence of peripheral nonlinearity. *Hearing Research*, 150, 258-266.
- Oxenham, A. J. & Shera, C. A., 2003. Estimates of human cochlear tuning at low levels using forward and simultaneous masking. *J Assoc Res Otolaryngol*, 4, 541-54.
- Ozmeral, E. J., Eddins, A. C., Frisina, D. R., Sr. & Eddins, D. A., 2016. Large cross-sectional study of presbycusis reveals rapid progressive decline in auditory temporal acuity. *Neurobiol Aging*, 43, 72-8.
- Palmer, A. R. & Russell, I. J., 1986. Phase-locking in the cochlear nerve of the guinea-pig and its relation to the receptor potential of inner hair-cells. *Hear Res*, 24, 1-15.
- Paraouty, N., Stasiak, A., Lorenzi, C., Varnet, L. & Winter, I. M., 2018. Dual Coding of Frequency Modulation in the Ventral Cochlear Nucleus. *The Journal of Neuroscience*, 38, 4123 - 4137.
- Parker, A., Parham, K. & Skoe, E., 2022. Noise exposure levels predict blood levels of the inner ear protein prestin. *Sci Rep*, 12, 1154.
- Patel, A. D. & Balaban, E., 2004. Human Auditory Cortical Dynamics During Perception of Long Acoustic Sequences: Phase Tracking of Carrier Frequency by the Auditory Steady-state Response. *Cerebral Cortex*, 14, 35-46.
- Pecka, M., Siveke, I., Grothe, B. & Lesica, N. A., 2010. Enhancement of ITD Coding Within the Initial Stages of the Auditory Pathway. *Journal of Neurophysiology*, 103, 38-46.
- Penner, M. J., 1977. Detection of temporal gaps in noise as a measure of the decay of auditory sensation. *J Acoust Soc Am*, 61, 552-7.
- Peterson, A. J. & Heil, P., 2019. Phase locking of auditory-nerve fibers reveals stereotyped distortions and an exponential transfer function with a level-dependent slope. *J. Neurosci.*, 39, 4077-4099.
- Pfeiffer, R. R., 1966. Classification of response patterns of spike discharges for units in the cochlear nucleus: tone-burst stimulation. *Exp Brain Res*, 1, 220-35.
- Phillips, D. P. & Hall, S. E., 2002. Auditory temporal gap detection for noise markers with partially overlapping and non-overlapping spectra. *Hear Res*, 174, 133-41.
- Phillips, D. P., Taylor, T. L., Hall, S. E., Carr, M. M. & Mossop, J. E., 1997. Detection of silent intervals between noises activating different perceptual channels: Some properties of "central" auditory gap detection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 3694-3705.
- Pickett, J. M. & Martin, E. S., 1968. Upward Spread of Masking in Normal and Sensorineural Subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44, 389-389.
- Pickles, J. O., 2012. The subcortical nuclei. *An introduction to the physiology of hearing*. 4 ed. Bingley, England: Emerald Group Publishing.
- Pickles, J. O., 2015. Auditory pathways: anatomy and physiology. *Handb Clin Neurol*, 129, 3-25.
- Plack, C. J., 2024. *The Sense of Hearing*, New York, Routledge.
- Plack, C. J. & Skeels, V., 2007. Temporal integration and compression near absolute threshold in normal and impaired ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122, 2236-2244.
- Plomp, R., 1964. Rate of decay of auditory sensation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36, 277-282.

- Pohl, P., 1984. Ear advantages for temporal resolution in baboons. *Brain Cogn*, 3, 438-44.
- Potrusil, T., Heshmat, A., Sajedi, S., Wenger, C., Johnson Chacko, L., Glueckert, R., Schrott-Fischer, A. & Rattay, F., 2020. Finite element analysis and three-dimensional reconstruction of tonotopically aligned human auditory fiber pathways: A computational environment for modeling electrical stimulation by a cochlear implant based on micro-CT. *Hearing Research*, 393, 108001.
- Profant, O., Škoch, A., Tintěra, J., Svobodová, V., Kuchárová, D., Svobodová Burianová, J. & Syka, J., 2020. The Influence of Aging, Hearing, and Tinnitus on the Morphology of Cortical Gray Matter, Amygdala, and Hippocampus. *Front Aging Neurosci*, 12, 553461.
- Rabbitt, R. D., 2019. Semicircular canal biomechanics in health and disease. *Journal of Neurophysiology*, 121, 732-755.
- Rabbitt, R. D. & Bidone, T. C., 2023. A parametric blueprint for optimum cochlear outer hair cell design. *J R Soc Interface*, 20, 20220762.
- Rabbitt, R. D. & Brownell, W. E., 2011. Efferent modulation of hair cell function. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*, 19, 376-81.
- Rabelo, C. M., Weihing, J. A. & Schochat, E., 2015. Temporal resolution in individuals with neurological disorders. *Clinics (Sao Paulo)*, 70, 606-11.
- Recio-Spinoso, A., Dong, W. & Oghalai, J. S., 2023. On the tonotopy of the low-frequency region of the cochlea. *J. Neurosci.*, 43, 5172-5179.
- Ren, T., 2002. Longitudinal pattern of basilar membrane vibration in the sensitive cochlea. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 17101-17106.
- Richter, C. P., Emadi, G., Getnick, G., Quesnel, A. & Dallos, P., 2007. Tectorial membrane stiffness gradients. *Biophys J*, 93, 2265-76.
- Robles, L. & Ruggero, M. A., 2001. Mechanics of the Mammalian Cochlea. *Physiological Reviews*, 81, 1305-1352.
- Rotondo, E. K. & Bieszczad, K. M., 2021. Memory Specific to Temporal Features of Sound Is Formed by Cue-Selective Enhancements in Temporal Coding Enabled by Inhibition of an Epigenetic Regulator. *J Neurosci*, 41, 9192-9209.
- Rönblom, A., Thornell, L. E., Shah, F., Tano, K. & Stål, P., 2023. Unique fiber phenotype composition and metabolic properties of the stapedius and tensor tympani muscles in the human middle ear. *J Anat*, 243, 39-50.
- Rutherford, M. A., von Gersdorff, H. & Goutman, J. D., 2021. Encoding sound in the cochlea: from receptor potential to afferent discharge. *J. Physiol.*, 599, 2527-2557.
- Ryzenman, J. M. & Kumar, A., 2015. Anatomy and Embryology of the Ear. In: Pensak, M. L. & Choo, D. I. (eds.) *Clinical Otolaryngology*. 4 ed. New York: Thime.
- Saldeitis, K., Jeschke, M., Michalek, A., Henschke, J. U., Wetzel, W., Ohl, F. W. & Budinger, E., 2022. Selective Interruption of Auditory Interhemispheric Cross Talk Impairs Discrimination Learning of Frequency-Modulated Tone Direction But Not Gap Detection and Discrimination. *The Journal of Neuroscience*, 42, 2025 - 2038.
- Samelli, A. G. & Schochat, E., 2008. Study of the right ear advantage on gap detection tests. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 74, 235 - 240.
- Sanayi, R., Ghassem, M., Nematollah, R., Shohreh, J., Amir Salar, J. & Hamid, J., 2021. Evaluation of spatial and spectro-temporal cues in release from masking in normal hearing listeners. *Applied Acoustics*, 173, 107731.
- Santos-Sacchi, J., 1993. Harmonics of outer hair cell motility. *Biophys J*, 65, 2217-27.
- Santos-Sacchi, J., Bai, J. P. & Navaratnam, D., 2023. Megahertz Sampling of Prestin (SLC26a5) Voltage-Sensor Charge Movements in Outer Hair Cell Membranes Reveals Ultrasonic Activity that May Support Electromotility and Cochlear Amplification. *J Neurosci*, 43, 2460-2468.

- Santos-Sacchi, J., Iwasa, K. H. & Tan, W., 2019. Outer hair cell electromotility is low-pass filtered relative to the molecular conformational changes that produce nonlinear capacitance. Frequency-dependent effects of prestin's kinetics and load. *Journal of General Physiology*, 151, 1369-1385.
- Santos-Sacchi, J., Navaratnam, D., Raphael, R. & Oliver, D., 2017. Prestin: Molecular Mechanisms Underlying Outer Hair Cell Electromotility. In: Manley, G. A., Gummer, A. W., Popper, A. N. & Fay, R. R. (eds.) *Understanding the Cochlea*. Cham: Springer International Publishing.
- Santos-Sacchi, J. & Tan, W., 2018. The Frequency Response of Outer Hair Cell Voltage-Dependent Motility Is Limited by Kinetics of Prestin. *J Neurosci*, 38, 5495-5506.
- Schneider, B. A. & Hamstra, S. J., 1999. Gap detection thresholds as a function of tonal duration for younger and older listeners. *J Acoust Soc Am*, 106, 371-80.
- Schroder, A. C. & Cudahy, E. A., 1983. Temporal tuning curves and their relation to frequency tuning curves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74.
- Sellon, J. B., Ghaffari, R. & Freeman, D. M., 2019. The Tectorial Membrane: Mechanical Properties and Functions. *Cold Spring Harb Perspect Med*, 9.
- Shailer, M. J. & Moore, B. C., 1983. Gap detection as a function of frequency, bandwidth, and level. *J Acoust Soc Am*, 74, 467-73.
- Shepard, A. R., Scheffel, J. L. & Yu, W.-M., 2019. Relationships between neuronal birthdates and tonotopic positions in the mouse cochlear nucleus. *J. Comp. Neurol.*, 527, 999-1011.
- Shera, C. A. & Altoè, A., 2023. Otoacoustic emissions reveal the micromechanical role of organ-of-Corti cytoarchitecture in cochlear amplification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, e2305921120.
- Shera, C. A. & Zweig, G., 1992. Analyzing reverse middle-ear transmission: noninvasive Gedankenexperiments. *J Acoust Soc Am*, 92, 1371-81.
- Shinn, J. B., Chermak, G. D. & Musiek, F. E., 2009. GIN (Gaps-In-Noise) performance in the pediatric population. *J Am Acad Audiol*, 20, 229-38.
- Shukla, B. & Bidelman, G. M., 2021. Enhanced brainstem phase-locking in low-level noise reveals stochastic resonance in the frequency-following response (FFR). *Brain Research*, 1771, 147643.
- Siebold, C., Vincent, P. F. Y., Bottom, R. T., Sun, S., Reijntjes, D. O. J., Manca, M., Glowatzki, E. & Müller, U., 2023. Molecular signatures define subtypes of auditory afferents with distinct peripheral projection patterns and physiological properties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, e2217033120.
- Simon, J. & Winkler, I., 2018. The role of temporal integration in auditory stream segregation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 44, 1683-1693.
- Sinex, D. G. & McDonald, L. P., 1989. Synchronized discharge rate representation of voice-onset time in the chinchilla auditory nerve. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85 5, 1995-2004.
- Sousa, L. L., Dias, K. Z. & Pereira, L. D., 2012. Temporal resolution with click and pure tone stimuli in youngsters with normal hearing sensitivity. *J Soc Bras Fonoaudiol*, 24, 168-73.
- Spicer, S. S. & Schulte, B. A., 1996. The fine structure of spiral ligament cells relates to ion return to the stria and varies with place-frequency. *Hear Res*, 100, 80-100.
- Spoendlin, H., 1969. Innervation Patterns in the Organ of Corti of the Cat. *Acta Oto-Laryngologica*, 67, 239-254.
- Spoendlin, H., 1972. Innervation densities of the cochlea. *Acta Otolaryngol*, 73, 235-48.

- Steinmetzger, K. & Rosen, S., 2023. No evidence for a benefit from masker harmonicity in the perception of speech in noise. *J Acoust Soc Am*, 153, 1064.
- Steinschneider, M., Schroeder, C. E., Arezzo, J. C. & Vaughan, H. G., 1994. Speech-evoked activity in primary auditory cortex: effects of voice onset time. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 92 1, 30-43.
- Stiebler, I. & Ehret, G., 1985. Inferior colliculus of the house mouse. I. A quantitative study of tonotopic organization, frequency representation, and tone-threshold distribution. *J Comp Neurol*, 238, 65-76.
- Strimbu, C. E., Wang, Y. & Olson, E. S., 2020. Manipulation of the Endocochlear Potential Reveals Two Distinct Types of Cochlear Nonlinearity. *Biophys J*, 119, 2087-2101.
- Student. 1908. The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6, 1.
- Studer, F. & Barkat, T. R., 2022. Inhibition in the auditory cortex. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 132, 61-75.
- Sturm, J. J., Zhang-Hooks, Y., Roos, H., Nguyen, T. D. & Kandler, K., 2017. Noise Trauma-Induced Behavioral Gap Detection Deficits Correlate with Reorganization of Excitatory and Inhibitory Local Circuits in the Inferior Colliculus and Are Prevented by Acoustic Enrichment. *The Journal of Neuroscience*, 37, 6314 - 6330.
- Surjanovic, N., Lockhart, R. A. & Loughin, T. M., 2024. A generalized Hosmer–Lemeshow goodness-of-fit test for a family of generalized linear models. *TEST*, 33, 589-608.
- Takahashi, S., Zhou, Y., Kojima, T., Cheatham, M. A. & Homma, K., 2023. Prestin's fast motor kinetics is essential for mammalian cochlear amplification. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 120, e2217891120.
- Tamim, N. & Hamann, S., Voicing Contrasts in the Singleton Stops of Palestinian Arabic: Production and Perception. *Interspeech*, 2021.
- Tanaka, K., Nemoto, I., Kawakatsu, M. & Uchikawa, Y., 2010. Stochastic resonance in connectivity between both auditory areas obtained by auditory stimuli. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010, 166-9.
- Tang, Z. Q. & Trussell, L. O., 2015. Serotonergic regulation of excitability of principal cells of the dorsal cochlear nucleus. *J Neurosci*, 35, 4540-51.
- Tellis, G. M., Manasco, M.H. . 2023a. Anatomy of Hearing. *Fundamentals of Anatomy and Physiology of Speech, Language, and Hearing*. San Diego, CA: Plural Publishing.
- Tellis, G. M., Manasco, M.H. . 2023b. Physiology of Hearing and Balance. *Fundamentals of Anatomy and Physiology of Speech, Language, and Hearing*. San Diego, CA: Plural Publishing.
- Thulasiram, M. R., Ogier, J. M. & Dabdoub, A., 2022. Hearing Function, Degeneration, and Disease: Spotlight on the Stria Vascularis. *Front Cell Dev Biol*, 10, 841708.
- Trinh, F., King, A. J., Willmore, B. D. B. & Harper, N. S., 2023. Cochlear tuning characteristics arise from temporal prediction of natural sounds. *bioRxiv*.
- Tyler, R. S., Pienkowski, M., Roncancio, E. R., Jun, H. J., Brozoski, T., Dauman, N., Coelho, C. B., Andersson, G., Keiner, A. J., Cacace, A. T., Martin, N. & Moore, B. C. J., 2014. A Review of Hyperacusis and Future Directions: Part I. Definitions and Manifestations. *American Journal of Audiology*, 23, 402-419.
- Veronesi, F. & Milotti, E., 2022. A toy model for the auditory system that exploits stochastic resonance. *European Journal of Physics*, 43, 025703.
- Verschooten, E., Shamma, S., Oxenham, A. J., Moore, B. C. J., Joris, P. X., Heinz, M. G. & Plack, C. J., 2019. The upper frequency limit for the use of phase locking to code temporal fine structure in humans: A compilation of viewpoints. *Hear. Res.*, 377, 109-121.

- Viemeister, N. F. & Plack, C. J., 1993. Time Analysis. In: Yost, W. A., Popper, A. N. & Fay, R. R. (eds.) *Human Psychophysics*. Springer-Verlag New York, Inc.
- Von Békésy, G., 1928. *Zur Theorie des Hörens: Die Schwingungsform der Basilarmembran*, Éditeur inconnu.
- Wagner, E. L. & Shin, J. B., 2019. Mechanisms of Hair Cell Damage and Repair. *Trends Neurosci*, 42, 414-424.
- Walton, J. P., Frisina, R. D., Ison, J. R. & O'Neill, W. E., 1997. Neural correlates of behavioral gap detection in the inferior colliculus of the young CBA mouse. *J Comp Physiol A*, 181, 161-76.
- Wang, Y., Ding, N., Ahmar, N., Xiang, J., Poeppel, D. & Simon, J. Z., 2012. Sensitivity to temporal modulation rate and spectral bandwidth in the human auditory system: MEG evidence. *Journal of Neurophysiology*, 107, 2033-2041.
- Wang, Y., Fallah, E. & Olson, E. S., 2019. Adaptation of Cochlear Amplification to Low Endocochlear Potential. *Biophys J*, 116, 1769-1786.
- Ward, L. M., Doesburg, S. M., Kitajo, K., MacLean, S. E. & Roggeveen, A. B., 2006. Neural synchrony in stochastic resonance, attention, and consciousness. *Can J Exp Psychol*, 60, 319-26.
- Weaver, A. J., Hoch, M., Quinn, L. S. & Blumsack, J. T., 2020. Across-Channel Auditory Gap Detection. *Music Perception*, 38, 66-77.
- Wegel, R. L. & Lane, C. E., 1924. The Auditory Masking of One Pure Tone by Another and its Probable Relation to the Dynamics of the Inner Ear. *Physical Review*, 23, 266-285.
- Weible, A. P., Yavorska, I. & Wehr, M., 2020. A Cortico-Collicular Amplification Mechanism for Gap Detection. *Cereb Cortex*, 30, 3590-3607.
- Weihing, J. A., Musiek, F. E. & Shinn, J. B., 2007. The effect of presentation level on the Gaps-In-Noise (GIN) test. *J Am Acad Audiol*, 18, 141-50.
- Wen, H. & Meaud, J., 2022. Link between stimulus otoacoustic emissions fine structure peaks and standing wave resonances in a cochlear model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151, 1875-1894.
- Werner, L. A., Folsom, R. C., Mancl, L. R. & Syapin, C. L., 2001. Human auditory brainstem response to temporal gaps in noise. *J Speech Lang Hear Res*, 44, 737-50.
- Wever, E. G., 1949. *Theory of hearing*, Oxford, England, Wiley.
- Wever, E. G. & Bray, C. W., 1937. The Perception of Low Tones and the Resonance-Volley Theory. *The Journal of Psychology*, 3, 101-114.
- Wojciechowski, T., 2023. Radiologic anatomy of the middle ear and inner ear in computed tomography images. *Otolaryngol. Pol.*, 11, 1-5.
- Wong, A. C. & McPherson, B., 2015. Adaptive tests of temporal resolution: comparison with the gaps-in-noise test in normal-hearing young adults. *Int J Audiol*, 54, 29-36.
- Yasin, I. & Plack, C. J., 2005. The role of suppression in the upward spread of masking. *J Assoc Res Otolaryngol*, 6, 368-77.
- Yates, G. K. & Kirk, D. L., 1998. Cochlear Electrically Evoked Emissions Modulated by Mechanical Transduction Channels. *The Journal of Neuroscience*, 18, 1996 - 2003.
- Yost, W. A., *Psychoacoustics : A Brief Historical Overview From Pythagoras to Helmholtz to Fletcher to Green and Swets , a centuries-long historical overview of psychoacoustics*. 2015.
- Yost, W. A., 2021. David M. green and psychoacoustics. *Acoust. Today*, 17, 51.
- Zeng, C., Yang, Z., Shreve, L., Bledsoe, S. & Shore, S., 2012. Somatosensory projections to cochlear nucleus are upregulated after unilateral deafness. *J Neurosci*, 32, 15791-801.
- Zheng, J., Shen, W., He, D. Z., Long, K. B., Madison, L. D. & Dallos, P., 2000. Prestin is the motor protein of cochlear outer hair cells. *Nature*, 405, 149-55.

- Zhou, L., Shen, N., Feng, M., Liu, H., Duan, M. & Huang, X., 2022a. Morphology of human ear canal and its effect on sound transmission. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 38, e3567.
- Zhou, W., Jabeen, T., Sabha, S., Becker, J. & Nam, J. H., 2022b. Deiters Cells Act as Mechanical Equalizers for Outer Hair Cells. *J Neurosci*, 42, 8361-8372.
- Zweig, G., 1976. Basilar membrane motion. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol*, 40, 619-33.



EKLER

EK-1 Bilgilendirilmiş Gönüllü Olur Formu

NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ

Bilgilendirilmiş Gönüllü Olur Formu

Katıldığınız bu çalışma bilimsel bir araştırma olup, araştırmanın adı ‘Normal İşitmeye Sahip Bireylerde Temporal Psikoakustik Ayar Eğrilerinin Belirlenmesi’dir. Çalışma işitme sisteminin zamansal bilgiyi çözerken kullandığı organizasyonu açığa çıkarmayı amaçlamaktadır. Araştırmaya katılması beklenen gönüllü sayısı en az 60 kişidir.

Çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Kulak Burun Boğaz Anabilim Dalı, Odyoloji ve Konuşma Bozuklukları Merkezi bünyesinde sürdürülecektir ve kurum olarak bu çalışmaları sürdürebilmek için gerekli personel ve cihaz altyapısı mevcuttur.

Uygulanacak İşlemler:

Yapılacak işlemler, herhangi bir tıbbi müdahale içermemektedir. Bu çalışma kapsamında adaylara yapılacak ölçümler herhangi bir zarar verici etki içermemektedir. Öncelikle dış kulak kanalınız bir otoskop ile incelenecektir. Sonrasında kulağınıza bir prob yerleştirilerek akustik immitansmetri testleri yapılacak ve orta kulak fonksiyonlarınız değerlendirilecektir. Ardından kulaklıklar aracılığıyla kulağınıza saf sesler gönderilecek ve farklı frekanslarda duyabildiğiniz en düşük şiddetteki sesler belirlenecektir. Sonrasında yine kulaklıklar aracılığıyla sizlere kelimeler okunacak ve sizden bu kelimeleri tekrar etmeniz istenecektir. Saf ses odyometri ve konuşma odyometrisi ile işitmeniz değerlendirilecektir.

Ardından tekrar kulağınıza bir kulaklık yerleştirilerek sırayla rastgele aralık tespit etme testi ve gürültüde boşluk tanıma testleri uygulanacaktır. Bu testlerde size rahat duyabileceğiniz seviyede sesler dinletilerek sesin içinde boşluk duyup duymadığınızı belirtmeniz istenecektir. Ardından rastgele aralık tespit etme testi 125-8000 Hz aralığında (kalın seslerden ince seslere) değişen sesler için gürültü varlığında tekrar edilecektir. Toplam test süresi yaklaşık 2 saat sürecektir.

Riskler:

Kişinin sağlık bütünlüğünü etkileyecek bir uygulama ve riski bulunmamaktadır.

Katılımcı Hak ve Sorumlulukları:

Elde edilen tüm veriler, gizlilik ilkesine bağlı kalınarak saklanacaktır. Elde edilecek veriler kamuoyuna açıklanmayacaktır. Çalışmada kullanılacak verilerde, kişilerin isimleri gizli tutulacaktır.

Araştırmayla veya araştırma yöntemiyle ilgili bir değişiklik olduğunda, bu durum katılımcılara veya yasal temsilcilerine zamanında iletilecek ve bu kişiler bilgilendirilecektir.

Ölçüm sonuçları ve kişisel bilgiler hiçbir ortamda paylaşılmayacak, ancak ve ancak siz istediğiniz takdirde tarafınıza verilecektir.

Yapılacak işlemlerde; sizden herhangi bir ücret talep edilmeyecektir. Size de herhangi bir ücret verilmeyecektir. Bağlı bulunduğunuz Sosyal Güvenlik Kurumu'ndan (SGK) herhangi bir ücret alınmayacaktır.

Çalışmaya katılım gönüllülük esasına dayanmaktadır. Katılımcı olarak istediğiniz zaman, gerekçeli veya gerekçesiz olarak, herhangi bir cezaya veya yaptırıma maruz kalmaksızın, hiçbir hakkınızı kaybetmeksizin araştırmaya katılmayı reddedebilir veya araştırmadan çekilebilirsiniz.

Çalışma sırasında katılımcı olarak sorumluluğu, çalışmayı yürüten sorumlu tarafından verilen yönergelere dikkatle uymaktır.

Gönüllülük Beyanı:

Söz konusu araştırmaya; hiçbir zorlama yapılmadan, tamamen kendi arzumu ile katılabileceğim, yine arzu ettiğim zaman çalışma grubundan çıkabileceğim, katıldığım takdirde, benden ve kurumdan ücret talep edilmeyeceği, kişisel bilgilerimin hiçbir ortamda paylaşılmayacağı, yapılan bu testlerin hiçbir zararlı etki yaratmayacağı bana açık bir şekilde anlatıldığından ve bu çalışma grubuna katılmakta sakınca görmediğimden kabul ediyorum.

Bilgilendirilmiş Gönüllü Olur Formu'ndaki tüm açıklamaları okudum. Bana, yukarıda konusu ve amacı belirtilen araştırma ile ilgili yazılı ve sözlü açıklama, aşağıda adı geçen uzman tarafından yapıldı. Araştırmaya gönüllü olarak katıldığımı, istediğim zaman gerekçeli veya gerekçesiz olarak araştırmadan ayrılacağımı biliyorum.

Katılımcı Adı Soyadı:

Tarih:

Tel:

İmza:

Açıklamaları Yapan Adı Soyadı:

Talha ÇÖGEN

Tarih:

Tel:

İmza:

EK-2 Khalfa Hiperakuzi Ölçeği Kullanım İzni

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

NORMAL İŞİTMEYE SAHİP BİREYLERDE TEMPORAL PSİKOAKUSTİK AYAR EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ

ORJİNALLİK RAPORU

% 5	% 4	% 2	%
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	% 1
2	www.medipol.edu.tr İnternet Kaynağı	% 1
3	dokumen.pub İnternet Kaynağı	<% 1
4	Bayram, Begüm. "Normal İşiten Yetişkinlerde Yaşın Temporal Çözünürlük ve Anlama Becerileri Üzerine Etkisi", Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey), 2024 Yayın	<% 1
5	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
6	acikerisim.karatay.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<% 1
7	toad.halileksi.net İnternet Kaynağı	<% 1
8	acikerisim.gelisim.edu.tr İnternet Kaynağı	

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☒ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☐ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Talha ÖGEN
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Talha ÇÖGEN
(İmza)



ÖZGEÇMİŞ

