

Vestibüler İmplantlar: Literatür Derlemesi

Vestibular Implants: A Literature Review

¹ Mustafa KARABULUT^a, ² Banu MÜJDECİ^b

^aMaastricht Üniversitesi Tıp Merkezi, Kulak Burun Boğaz Hastalıkları ABD, Maastricht, Hollanda

^bAnkara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Odyoloji Bölümü, Ankara, Türkiye

ÖZET Vestibüler implant (Vİ), bilateral olarak fonksiyonu bozulmuş periferik vestibüler sistemi tekrar onarmayı amaçlayan bir protezdir. Temel olarak 3 bileşenden oluşmaktadır: (1) Jiroskoplar ve/veya ivmeölçerler (2) dış işlemci ve (3) implante edilmiş bir uyarıcıdır. Vİ bilateral vestibülopatisi (BVP) olan hastalara uygulanmaktadır. BVP'si olan bireylerde, vestibüler fizyolojinin bozulması nedeniyle sistemi restore edebilmek için, yapay olarak (elektriksel) yeni bir temel ateşleme hızının oluşturulması gerekmektedir. Vestibüler implant ile yeni temel ateşleme hızı ayarlanmasının ardından, baş hareket modülasyonları uygulanarak, bireyin yeni elektriksel uyarıma uyumu sağlanmaktadır. Vİ araştırma bazlı implantasyon kriterleri temelde 2 ana süreçten oluşmaktadır: (1) Kalorik test, rotasyonel sandalye testi (video), baş savurma testi sonucunda her iki kulakta azalmış veya mevcut olmayan vestibüler fonksiyonun saptanması ve (2) kronik dengesizlik ve osilopsi gibi kronik semptomların var olduğu ileri derecede vestibüler fonksiyon kaybıdır. Ancak ekstra kriterlerin varlığına dikkat edilmelidir. Vİ cerrahisinde intralabirentin ve ekstralabirentin olmak üzere iki farklı cerrahi yaklaşım kullanılabilir. Her iki yaklaşımın avantaj ve dezavantajları olmasına rağmen en çok tercih edilen intralabirentin yaklaşımıdır. Cerrahi süreç esnasında implantın bütünlüğünü ve elektrotların yerleşiminin uygunluğunu değerlendirmek için intraoperatif ölçümler uygulanmaktadır. Vestibüler implantlar, hayvan deneyleri ile başlamış olup günümüzde insanlar üzerinde araştırma tabanlı olarak uygulanmaya devam etmektedir. Bu gözden geçirme yazısında Vİ'ye yönelik temel bilgilerin ele alınması ve literatür sonuçlarının aktarılması amaçlanmıştır.

ABSTRACT Vestibular implant (VI) is a prosthesis that aims to restore bilaterally damaged peripheral vestibular function. VI fundamentally consists of three key components. (1) Gyroscopes and/or accelerometers, (2) An external processor, and (3) implanted stimulator. VI is applied to patients with bilateral vestibulopathy (BVP). In order to restore peripheral vestibular function, a new artificial (electrical) baseline stimulation needs to be created as the peripheral vestibular physiology is bilaterally damaged in patients with BVP. After adjusting the new artificial baseline stimulation with the vestibular implant, motion modulations are applied in order to adapt the individuals to the new electrical stimulation. VI research-based implantation criteria basically consist of 2 main processes: Bilaterally reduced or absent peripheral vestibular function as a result of the calorik test, rotational chair test (video) head impulse test and (2) the presence of severe vestibular function with the chronic symptoms such as imbalance and oscillopsia. However, one should pay attention to the existence of extra criteria. Regarding VI surgery, two different types of surgical approaches, intralabyrinthine and extralabyrinthine, can be used. Although both approaches have pros and cons, the most preferred approach is the intralabyrinthine approach. Intraoperative measurements are also performed during the surgery in order to assess the integrity of the implant and the appropriateness of the placement of the electrodes. The VI started with animal experiments and has been currently continuing with research based on humans. The aim of this review is to address fundamental knowledge and convey the scientific results on vestibular implants.

Anahtar Kelimeler: Vestibüler implant; bilateral vestibülopati; bilateral vestibüler bozukluk; elektriksel uyarım; vestibüler protez; vestibülooküler refleks

Keywords: Vestibular implant; bilateral vestibulopathy; bilateral vestibular loss; electrical stimulation; vestibular prosthesis; vestibulo-ocular reflex

Vestibüler implant (Vİ), fonksiyon görmeyen periferik vestibüler sistemi yeniden restore etmeyi amaçlayan bir nöroprotezdür. Vİ, baş hareket bilgisini algılar ve bunları vestibüler sinir uçlarını uyara-

bilen elektrik sinyallerine dönüştürür. Bu süreçte elektriksel uyarım, vestibüler *end* organı baypas eder ve vestibüler siniri doğrudan uyararak vestibüler işlevi eski hâline getirir.¹

Correspondence: Mustafa KARABULUT

Maastricht Üniversitesi Tıp Merkezi, Kulak Burun Boğaz Hastalıkları ABD, Maastricht, Hollanda

E-mail: mustafa.karabulut@mumc.nl



Peer review under responsibility of Journal of Ear Nose Throat and Head Neck Surgery.

Received: 08 Sep 2022

Received in revised form: 20 Sep 2022

Accepted: 23 Sep 2022

Available online: 26 Sep 2022

1307-7384 / Copyright © 2022 Turkey Association of Society of Ear Nose Throat and Head Neck Surgery. Production and hosting by Türkiye Klinikleri.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

VESTİBÜLER İMPLANTIN TARİHÇESİ

1960'lı yıllarda Cohen ve Suzuki tarafından maymunlarda ve kedilerde, vestibüler sinirin ampuller dallarının seçici elektriksel stimülasyonu ile kompanse edici göz hareketleri ve postüral yanıtların ortaya çıkabileceği gösterilmiştir.^{2,3} 2000 yılında Gong ve Merfeld ko-baylarda Vİ'nin ilk konseptini doğrulamış ve vestibüler sinirlerin elektriksel uyarımı yoluyla, rotasyonel ipuçlarının merkezi sinir sistemine (MSS) iletebileceğini göstermişlerdir.^{4,8} Hayvan çalışmalarından elde edilen olumlu sonuçlar ve koklear implantların (Kİ) artan başarısına dayanarak, Vİ kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, bilateral vestibülopati (BVP) olan bir hasta üzerinde ilk Vİ ameliyatı 2007 yılında İsviçre-Cenevre'de uygulanmıştır.⁹ Vİ'nin amacı, Kİ'ye benzer şekilde, doğrudan vestibüler siniri uyararak işlevsiz bir vestibüler *end* organın yerini almaktır.

VESTİBÜLER İMPLANT PARÇALARI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Vİ genel olarak 3 ana bileşenden oluşur. Bunlar; baş hareketlerini algılayabilen jiroskoplar ve/veya ivmeölçerler (*gyroscopes and accelerometers*), baş hareket bilgisini elektriksel sinyallere dönüştüren bir işlemci (*external processor*), elektriksel sinyalleri elektrotlar aracılığı ile vestibüler sinirlere ileten, implante edilmiş bir uyarıcıdır (*implanted stimulator*).¹⁰ Elektriksel sinyaller, vestibüler elektrotlar aracılığıyla vestibüler sistemin normal işlevine benzer bir şekilde, vestibüler sinirlerin ateşleme hızını düzenler. Bu durum, MSS tarafından bir baş hareketi olarak algılanır. Bu işlemlerle birlikte vestibüler fonksiyon yapay olarak restore edilir.¹¹

VESTİBÜLER İMPLANT TASARIMLARI

Semisirküler kanal (SSK) ve/veya otolit organlara veya her ikisinin kombinasyonuna yerleştirilen elektrotlara sahip olan Vİ ile ilgili literatürde çeşitli tasarımlar bulunmaktadır. Bu tasarımlar; kokleo-vestibüler implant, çok kanallı Vİ, vestibüler *pacemaker* ve otolit implanttır.¹²⁻¹⁵

a. Kokleovestibüler implant

Maastricht-Cenevre grubu ve Washington Üniversitesi grubu tarafından kullanılmaktadır. Üç boyutlu

rotasyonel hareketleri algılayabilen jiroskoplara ve duyu tabanlı (*sensory-based*) bir implant tasarımına sahiptir. Kokleaya yerleştirilmesi için bir intrakoklear elektrot dizisi (en az 9 elektrot teması ile) ve SSK'lere yerleştirilmesi için bir ekstrakoklear elektrot dizisi (1-3 vestibüler elektrot) bulunmaktadır. Vestibüler elektrotlar her bir SSK'nin içine (anterior, posterior ve lateral) birer elektrot olacak şekilde yerleştirilmektedir.¹⁰

b. Çok kanallı vestibüler implant

Hopkins Üniversitesi grubu tarafından kullanılmaktadır. Üç boyutlu rotasyonel hareketleri ve doğrusal ivmeleri algılayabilen ve kodlayabilen jiroskoplara, ivmeölçerlere ve duyu tabanlı bir implant tasarımına sahiptir. Elektrotlar sadece SSK'lerin sinir uçlarına yerleştirilir. Her bir kanalda 3 elektrot ve bir referans elektrot bulunmaktadır. Kokleaya elektrot yerleşimi yapılmamaktadır.¹²

c. Vestibüler *pacemaker*

Washington Üniversitesi grubu tarafından önceki araştırmalarda kullanılmıştır. Bu cihazın diğer implant türlerinden farkı *pacemaker* tabanlı olması, hareket sensörü (jiroskop ve ivmeölçer vs.) olmamasıdır. Vestibüler *pacemaker* 2 ekstrakoklear referans elektrottan (plaka ve top elektrot) ve 3 uyarıcı SSK elektrot dizisinden (her biri üç elektrot kontağı içerir) oluşmaktadır. Vestibüler *pacemaker*, Ménière hastalığı atağının neden olduğu semptomlara karşı koymak için tasarlanmış bir cihazdır ve tasarımı, SSK afferent stimülasyonu için modifiye edilmiş Kİ'ye dayanmaktadır. Vestibüler ve işitme sisteminde olumsuz sonuçlara yol açması nedeniyle günümüzde uygulanmamaktadır.¹⁶

d. Otolit implant

Las Palmas Üniversitesi grubu tarafından kullanılmaktadır. Bu implant tipi doğrudan otolit organların uyarımı ile gerçekleşmektedir. Vestibüler yanıtlar, standart Kİ'nin 3 apikal elektrodunun vestibüle geçici olarak yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Referans elektrot olarak *plate* ya da *ball* elektrot kullanılmaktadır.¹⁷

VESTİBÜLER İMPLANTIN TEMELLERİ

Sağlıklı bireylerin vestibüler sisteminde düzenli ateşlenen sinirler, saniyede yaklaşık 90 aksiyon potansiyeli dinlenme deşarj ateşleme hızına (temel ateşleme

hızı) sahiptir.^{18,19} Kafa hareketleri bu ateşleme hızını değiştirebilir. Örneğin sola doğru bir rotasyonel baş hareketi, lateral SSK'nın sinirlerinde ateşleme hızında bir artışa yol açar (eksitator yanıt). Hıza bağlı olarak, ateşleme hızı 300 aksiyon potansiyeline kadar çıkabilir.²⁰ Sağa doğru bir hareket ise bu sinirlerde ateşleme hızında bir azalmaya yol açar (inhibitör yanıt). Hıza bağlı olarak, ateşleme hızı 0 aksiyon potansiyeline kadar düşebilir.²¹ Eksitator ve inhibitör yanıtlar arasında bir asimetri bulunmakla birlikte 2 vestibüler organ, MSS'ye baş hareketi hakkında bilgi sağlamak için uyum içinde çalışır (itme-çekme sistemi). Bu sayede eksitator ve inhibitör yanıtlardaki bu asimetri, MSS'ye uygun bir şekilde iletilmekte ve MSS bunu normal bir durum gibi algılamaktadır. BVP'li hastalarda saniyede 90 aksiyon potansiyeli temel ateşleme hızı olmasına rağmen uygulanan baş hareketleri ile bu temel ateşleme hızı değişkenlik göstermemekte, eksitator ve inhibitör yanıtlar oluşmamaktadır. Sonuç olarak artması/azalması gereken temel ateşleme hızının bilgisi, periferik sistemden MSS'ye doğru bir şekilde iletilmemekte ve bireyler dengesizlik ve osilopsi semptomları yaşamaktadır.²² Bu durumda, Vİ ile vestibüler fonksiyonu eski hâline getirmek için elektriksel uyarı kullanılarak, bir temel ateşleme hızı oluşturulması gerekmektedir.^{19,23} Bu temel ateşleme hızı daha sonra vestibüler yanıtlar oluşturmak için (bakış stabilizasyonu, postüral yanıtlar, uzamsal oryantasyon vs.) modüle edilir.^{24,25} SSK uyarılması durumunda, bu yanıtlar, her SSK düzlemi boyunca her iki yönde göz hareketlerini içerir.

İnsan Vİ çalışmaları, günümüzde tek taraflı vestibüler implantasyonla sınırlıdır.^{10,16,26} Tek taraflı elektriksel uyarım temel ateşleme hızı, uyarı aralığının (dinamik aralık) orta noktasının altında olduğu için yanıt olarak bir asimetriye yol açar. Bu yanıt, inhibe edici bir yanıtta daha güçlü bir uyarıcı yanıtta neden olur. Bu nedenle Vİ'nin temel uyarımı, yapay olarak daha yüksek ayarlanabilir (suprafizyolojik ateşleme hızı).^{27,28} Böylece asimetri ortadan kaldırılır. Dinamik aralığın %50'sine karşılık gelen bir suprafizyolojik ateşleme hızının kullanılması, uyarıcı ve inhibe edici yönde eşit bir stimülasyon aralığı sağlar. Doğal sistemle karşılaştırıldığında, suprafizyolojik ateşleme hızı, vestibüler sistemin inhibe edici cevaplarını artırırken uyarıcı yanıtlarını azaltır. Sonuç ola-

rak daha simetrik bir cevap ortaya çıkar. Suprafizyolojik temel ateşleme hızının ayarlanması, beyin tarafından uyarıcı bir hareket olarak yorumlanır ve nistagmus ile sonuçlanır. Ayrıca vertigo ve/veya mide bulantısı semptomları da ortaya çıkabilmektedir.⁹ Bu istenmeyen semptomlar, yeni başlangıç uyarınının adaptasyonuna bağlı olarak, sürekli uyarımdan sonraki 30 dk içinde kaybolur.⁹ Adaptasyonu takiben cihazı kapatmak tekrar baş dönmesi, mide bulantısı ve nistagmus başlatabilir, ancak nistagmusun hızlı fazı bu durumda tersi yöndedir.^{9,29} Bunun sebebi ise elektriksel uyarının yokluğunun, beyin tarafından inhibe edici bir durum olarak yorumlanmasıdır. Bu şekilde birden fazla aç-kapa metodu ile MSS, her iki koşul (elektriksel uyarının açık ve kapalı olması) arasında geçiş yapmaya uyum sağlar ve adapte olur. Literatürde bu kavrama "çift durum adaptasyonu" (*dual state adaptation*) adı verilmektedir.^{9,29,30} Adaptasyon sürecinde, cihazın birkaç kez aç-kapa ve kapa-aç geçişinden sonra, nistagmusun şiddeti azalır ve yeni ateşleme hızına olan adaptasyon daha hızlı hâle gelir. Vestibüler implantın "açık" ve "kapalı" koşulları arasındaki geçiş, istenmeyen bulguları (vertigo, nistagmus, vb.) tetiklemez.^{9,28,31} Ancak cihazın uzun süre devre dışı kalması durumunda, adaptasyon süresi kademeli olarak uzar.²⁹ Bu *dual state* adaptasyon süreci, Vİ kullanıcılarının herhangi bir yan etki olmaksızın (örneğin pilleri değiştirirken veya duş alırken) cihazlarını açıp kapatmalarına olanak sağlar.

Vİ'de suprafizyolojik temel ateşleme hızına adaptasyondan sonra hareket tabanlı modülasyon uygulanır. Suprafizyolojik temel ateşleme hızı, kafa hareketinin yönüne ve hızına bağlı olarak, yukarı ve aşağı modüle edilir.^{32,33} Örneğin bir hasta (sağ tarafta bir Vİ olan, suprafizyolojik ateşleme hızına ayarlanmış) sağa doğru horizontal düzlemde baş rotasyonu yaptığında, sağ lateral ampuller sinirde [lateral ampullary nerve (LAN)] eksitasyon meydana gelir. Eksitasyon miktarı, hareketin hızına bağlıdır. Yavaş bir kafa hareketi, hızlı bir kafa hareketinden daha küçük bir eksitasyona yol açar. Ters yöne (bu durumda sola) bir kafa hareketi zıt yönde bir cevaba neden olur.^{18,32} Belirli bir açısal hız için uyarının artış (veya azalma) miktarına "modülasyon sensitivitesi" denir ve her elektrot için yapay olarak ayarlanır.^{30,34}

Suprafizyolojik temel ateşleme hızı etrafındaki hareket modülasyonu; darbe hızı modülasyonu (*pulse rate modulation*), darbe genlik modülasyonu (*pulse amplitude modulation*) veya her ikisinin bir kombinasyonu (ko-modülasyon) ile yürütülebilir.^{25,35} Vestibüler sistemin doğal sinirsel kodlamasına en çok darbe hızı modülasyonunun benzer olduğu kanıtlanmıştır.³⁶ Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalar, darbe genlik modülasyonunun, göz hareketi tepkilerinin elde edilmesinde, darbe hızı modülasyonundan daha etkili olduğunu göstermiştir.^{23,35} Hayvan çalışmaları, bu iki modülasyonun kombinasyonunun (ko-modülasyon), tek başına darbe genlik veya darbe hız modülasyonundan daha büyük göz hareketi tepkileri uyandırdığını göstermiştir.^{25,35,37}

VESTİBÜLER İMPLANTASYONDA ADAY DEĞERLENDİRMESİ

Geçmişte Vİ adayları için farklı implantasyon kriterleri kullanılmıştır ancak belirli bir standardizasyon sağlanamamıştır. 2020 yılında Van de Berg ve ark. vestibüler implantasyon üzerine yapılan çalışmalar arasında karşılaştırmaları kolaylaştırmak için vestibüler implantasyon kriterleri hakkında bir bildiri yayımlamıştır.³⁸

Vİ için implantasyon kriterleri, her iki kulakta azalmış veya mevcut olmayan vestibüler fonksiyonun kuantitatif belirtileri (kalorik test, rotasyonel sandalye testi ve video baş savurma testi) ile kronik dengesizlik ve osilopsi gibi kronik semptomların var olduğu, ileri derecede vestibüler fonksiyon kaybını içerir. Vestibüler implantasyon cerrahisi, BVP'li hastalara uygulanmaktadır. Ancak BVP tanı kriterleri ile Vİ implantasyon kriterleri farklılık göstermektedir. Vİ tanı kriterlerinin BVP'nin tanı kriterlerinden farklı olmasının ana nedenlerinden birincisi; vestibüler implantasyonun, iç kulaktaki vestibüler yapılarda geri dönüşü olmayan hasara neden olabilmesidir. Bu nedenle tanı birden fazla vestibüler test ile doğrulanmalıdır. İkincisi; implantasyonun lateral SSK'ler ile sınırlı olmayıp diğer SSK'leri ve otolit organları da içerebilmesidir. Bu nedenle implant yapılacak yapılarda bozukluk olduğu kanıtlanmalıdır. Üçüncüsü; Vİ cerrahisinin rezidüel vestibüler fonksiyonu bozabilmesidir (örneğin SSK'lerin cerrahi olarak tıkanması

ile- *plugging*). Vİ cerrahisi, vestibüler sistemin restorasyonundan daha fazla zarar vermemelidir.³⁸

BVP'nin tanı kriterinde yer alan kalorik test ve/veya rotasyon sandalyesi testi ve/veya video "head impulse" testlerin herhangi birisindeki anormalliğin aksine Vİ kriterlerinde tüm testlerin anormallik göstermesi gerekir.³⁹ Ayrıca vertikal SSK'ler da anormal bulgular göstermelidir. Otolit implantasyon uygulaması yapılacak ise vestibüler uyarılmış miyojenik potansiyel cevapları elde edilmemelidir. Sonuç olarak yalnızca periferik orijinli BVP'li hastalara implantasyon yapmak ve olası tıbbi ve psikiyatrik kontrendikasyonları değerlendirmek de dâhil olmak üzere, güvenli ve potansiyel olarak etkili stimülasyon gereksinimleri karşılanmalıdır.³⁸

VESTİBÜLER İMPLANTASYONDA CERRAHİ YAKLAŞIMLAR

Günümüze kadar vestibüler implantasyon için 2 tip cerrahi yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar, intralabirentin yaklaşım ve ekstralabirentin yaklaşımlardır.⁴⁰ En sık kullanılan cerrahi yaklaşım, intralabirentin yaklaşımıdır.^{27,28,41,42} Bu yaklaşımda mastoidektomi yapılır, labirent açılır ve duyu epitelinin yakınındaki SSK'lere ve/veya otolitlere elektrotlar yerleştirilir. Ekstralabirentin yaklaşımda ise elektrotlar, SSK'leri ve vestibülü açmadan, direkt olarak labirente yakın lateral, superior ve posterior ampuller sinirlere [posterior ampullary nerve (PAN)] yerleştirilir. Ekstralabirentin yaklaşım, 2 farklı yaklaşımı içerir. Bunlar; PAN yaklaşımı ile superior ampuller sinir (SAN) ve LAN yaklaşımıdır. PAN yaklaşımı, yuvarlak pencere nişinin delinmesiyle gerçekleştirilir. PAN tanımlanır ve sinir ucuyla temas edecek şekilde elektrot/elektrotlar yerleştirilir. LAN ve SAN yaklaşımı, malleus başı ve inkus kaldırılarak yapılır. Fasiyal sinirden kraniyal olarak delinerek, SAN ve LAN tanımlanabilir. Elektrot/elektrotlar sinir uçlarına temas edecek şekilde yerleştirilir. LAN ve SAN birbirine çok yakın konumlandıkları için ayrı ayrı uyarılamayacağına dikkat edilmelidir.⁴⁰

Her iki yaklaşımın da avantajları ve riskleri bulunmaktadır. İntralabirentin yaklaşımın avantajları; çoğu cerrah için cerrahi sürecin daha az zorlayıcı olması ve orta kulak yapılarının korunmasıdır.^{43,44} Riskler ve

zorlukları ise labirentin açılması ve elektrotların yerleştirilmesi nedeniyle olası sensörinöral işitme kaybına sebep olunabilmesi ve elektrotları duyu epiteline yaklaştırma zorluğudur.^{45,46}

Ekstralabirentin yaklaşımın temel avantajı, labirentin açılmasına gerek olmaması ve bu sayede sensörinöral işitme kaybı riskini en aza indirgemesidir. Ekstralabirent yaklaşımının riskleri ve zorlukları arasında, sensörinöral işitme kaybına yol açabilecek şekilde labirentin yanlışlıkla açılması, fasiyal sinir hasarı, elektrotların doğru şekilde sabitlenememesi veya PAN'a ulaşamama yer almaktadır.⁴³ Her iki cerrahi yaklaşım da başarıyla uygulanmış ve ampuller sinirlerin vestibüler elektrotlarla seçici olarak uyarıldığı gösterilmiştir.

VESTİBÜLER İMPLANTASYONDA İNTRAOPERATİF ÖLÇÜMLER

Vİ cerrahisi sırasında implantın bütünlüğünü ve elektrotların yerleşiminin uygunluğunu değerlendirmek için intraoperatif ölçümler yapılmaktadır.⁴⁷ Optimum elektrot konumunu elde etmek için çeşitli stratejiler araştırılmıştır. Bu stratejilerden biri, elektrotların SSK'lere doğru yerleştirilmesini sağlamak için gerçek zamanlı radyasyon tabanlı bir görüntüleme tekniği olan floroskopi tekniğidir. Elektrotlar SSK'lerde gerçek zamanlı olarak görselleştirilir ve elektrotların SSK'lerdeki yerleşiminin ince ayarının yapılması sağlanır.⁴⁸ Daha önce Kİ cerrahi sürecinde de elektrotların konumu hakkında doğrudan geri bildirim sağlamak için floroskopi tekniği uygulanmıştır.⁴⁹ İkinci strateji, ameliyat sırasında direkt elektriksel uyarım sonucu göz hareketlerinin gözlemlenmesidir. Uygun göz hareketleri (doğru büyüklük ve açı) elde edilene kadar elektrot konumu manipüle edilerek, en iyi elektrot konumu belirlenir. Ancak genel anestezi-nin nistagmus yanıtını değiştiren ve baskılayan etkisinden dolayı en iyi sonucun alınabilmesi için bu işlemin lokal anestezi altında yapılması gerekmektedir. Üçüncü strateji, vestibüler elektriksel uyarılmış bileşik aksiyon potansiyellerinin [vestibular electrically evoked compound action potential (vECAP)], intraoperatif vECAP ölçümleri aracılığı ile elektrot konumunu optimize etmek için kullanılmasıdır. Akımın iç kulağa yayılmasına ilişkin bilgiler elde edilir ve Vİ'nin uyumunu optimize etmek için bir kılavuz

olarak kullanılabilir. Ancak tek başına vECAP'lara dayanarak bileşik aksiyon potansiyelinin kökenini belirlemek zordur.^{50,51}

LİTERATÜRDE VESTİBÜLER İMPLANT UYGULAMALARI

İnsanlar üzerinde yapılan Vİ uygulamalarının sonuçları, 2 temel başlık altında incelenebilir. Bunlar; objektif bulgular ve subjektif bulgulardır.

a. Objektif bulgular

Vİ uyarımının etkisini değerlendirmek için vestibüloküler refleks (VOR), vestibülokolik refleks [vestibulocollic reflex (VCR)] ve vestibülospinal refleks [vestibulospinal reflex (VSR)] değerlendirilmiştir. Vİ ile BVP'li hastalarda düşük ve yüksek frekanslı elektriksel olarak uyarılmış VOR'u restore etmenin mümkün olduğu bulunmuştur.^{23,52} Elektriksel olarak uyarılmış VOR'un, artmış elektriksel uyarım (amplitüd) ile arttığı, frekans bağımlılığı özelliği gösterdiği (*frequency-dependency*) ve yanlış hizalama (*misalignment*) meydana gelse de göz hareketlerinin uyarılan kanalın düzlemi ile hizalanabilir olduğu saptanmıştır.^{53,54} VSR ve VCR ile ilgili olarak, BVP'li hastalarda Vİ ile postüral yanıtlar oluşturmanın mümkün olduğu gösterilmiştir.^{55,56} Genel olarak, bu sonuçlar insanlarda vestibüler *end* organın elektriksel uyarılmasının hem kompanse edici göz hareketlerini hem de kompanse edici vücut ve boyun hareketlerini ortaya çıkardığını ve potansiyel olarak sırasıyla bakış stabilizasyonunu ve postüral kontrolü geri kazandırdığını göstermektedir.^{23,52,55,56}

BVP'nin ana semptomlarından biri dengesizliktir.⁵⁷ Elektriksel olarak uyarılmış VSR ve VCR'nin, hastalar için fonksiyonel fayda sağlayıp sağlayamayacağını araştırmak için duruş ve yürüyüş fonksiyonları incelenmiştir. Vİ'nin uzun süreli kullanıcılarında duruş (Bruininks-Oseretsky Motor yeterlilik Testi) ve yürüyüş (Dinamik Yürüyüş İndeksi) için sonuç çıktılarının, elektriksel uyarı olmayan kontrol durumuna kıyasla iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir.¹² Dengesizliğin yanı sıra osilopsi de BVP'nin sıklıkla bildirilen bir semptomudur.²² Osilopsi, kafa hareketleri sırasında görme keskinliği kaybıdır. "Dinamik görme keskinliği" olarak adlandırılan dinamik koşullardaki (kafa hareketleri gibi) görme

keskinliği, statik koşullardaki görme keskinliği ile karşılaştırılabilir.⁵⁸ Dinamik görme keskinliğinin ölçülmesi, VOR kazancında iyileşmenin daha fonksiyonel bir düzeyde değerlendirilmesini sağlar. Vİ uyarımının, yürürken ve hızlı pasif baş hareketleri sırasında dinamik görme keskinliğini önemli ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur.^{59,60}

Vİ uygulamalarından elde edilen olumlu sonuçların yanı sıra işitme kaybı vestibüler implantasyon cerrahisinin sıklıkla bildirilen bir yan etkisidir. Büyük olasılıkla cerrahi travma ve elektrotların iç kulağa yerleştirilmesinin bir kombinasyonu nedeniyle ameliyattan önce implante edilen kulakta fonksiyonel işitmesi olan çoğu hastada işitme kaybı rapor edilmiştir (vestibüler *pacemaker* ve çok kanallı Vİ uygulamalarında).^{12,51}

b. Subjektif bulgular

Vİ'nin günlük yaşamdaki etkilerini göstermek için çeşitli öznel sonuç çıktıları kullanılmıştır. Öznel sonuç çıktıları, niteliksel (hasta tarafından bildirilen bulgular) ve niceliksel sonuç çıktıları (anket bulguları) olarak 2'ye ayrılabilir. Niteliksel ölçümlerle ilgili olarak, Vİ kullanıcılarında daha kararlı görme ve artmış postüral yanıtlar rapor edilmiştir. Ayrıca Vİ'nin bazı hastaların günlük yaşam aktivitelerini güvenli bir şekilde yerine getirme yeteneklerini artırdığı bildirilmiştir (örneğin baston kullanımını bırakma, engembeli zeminde yürüme yeteneğinin iyileşmesi, ağırlık taşıyabilme vs.).⁵⁴ Niceliksel ölçümlerde, yaşam kalitesi anketleri (Kısa Form 36, Sağlık Fayda İndeksi 3) kullanılmıştır ve implantasyon öncesi ve sonrası uygulanan anketlerde, implantasyon sonrası

hastaların yaşam kalitesi skorlarında iyileşmeler elde edilmiştir.¹²

SONUÇ

Vİ'nin temel fizyolojisinden tanı kriterlerine, cerrahi yaklaşımlarından intraoperatif ölçümlerine kadar birçok aşamada önemli gelişmeler elde edilmiştir. Farklı araştırma grupları, kendi implant tasarımları ile Vİ uygulamaları yapmakta ve bulgularını yayımlamaktadır. Günümüze kadar elde edilen sonuçlar, BVP'li hastaların rehabilitasyonunda Vİ'nin uygulanabilirliğini güçlü bir şekilde desteklemektedir. Araştırmalardan elde edilen pozitif bulguların, Vİ'nin klinik kullanıma geçiş sürecinin hızlanmasında önemli rol oynayacağı düşünülmektedir.

Finansal Kaynak

Bu çalışma sırasında, yapılan araştırma konusu ile ilgili doğrudan bağlantısı bulunan herhangi bir ilaç firmasından, tıbbi alet, gereç ve malzeme sağlayan ve/veya üreten bir firma veya herhangi bir ticari firmadan, çalışmanın değerlendirme sürecinde, çalışma ile ilgili verilecek kararı olumsuz etkileyebilecek maddi ve/veya manevi herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışma ile ilgili olarak yazarların ve/veya aile bireylerinin çıkar çatışması potansiyeli olabilecek bilimsel ve tıbbi komite üyeliği veya üyeleri ile ilişkisi, danışmanlık, bilirkişilik, herhangi bir firmada çalışma durumu, hissedarlık ve benzer durumları yoktur.

Yazar Katkıları

Fikir/Kavram: Mustafa Karabulut; **Tasarım:** Banu Müjdecı; **Denetleme/Danışmanlık:** Banu Müjdecı; **Kaynak Taraması:** Mustafa Karabulut; **Makalenin Yazımı:** Mustafa Karabulut; **Eleştirel İnceleme:** Banu Müjdecı.

KAYNAKLAR

- Guyot JP, Perez Fornos A. Milestones in the development of a vestibular implant. *Curr Opin Neurol*. 2019;32(1):145-53. [Crossref] [PubMed] [PMC]
- Cohen B, Suzuki JI. Eye movements induced by ampullary nerve stimulation. *Am J Physiol*. 1963;204:347-51. [Crossref] [PubMed]
- Cohen B, Suzuki JI, Bender MB. Nystagmus induced by electric stimulation of ampullary nerves. *Acta Oto-Laryngologica*. 1965;60(1-6):422-36. [Crossref]
- Gong W, Merfeld DM. Prototype neural semicircular canal prosthesis using patterned electrical stimulation. *Ann Biomed Eng*. 2000;28(5):572-81. [Crossref] [PubMed]
- Dai C, Fridman GY, Chiang B, Davidovics NS, Melvin TA, Cullen KE, et al. Cross-axis adaptation improves 3D vestibulo-ocular reflex alignment during chronic stimulation via a head-mounted multichannel vestibular prosthesis. *Exp Brain Res*. 2011;210(3-4):595-606. [Crossref] [PubMed] [PMC]
- Lewis RF, Gong W, Ramsey M, Minor L, Boyle R, Merfeld DM. Vestibular adaptation studied with a prosthetic semicircular canal. *J Vestib Res*. 2002-2003;12(2-3):87-94. [Crossref] [PubMed]
- Migliaccio AA, Meierhofer R, Della Santina CC. Characterization of the 3D angular vestibulo-ocular reflex in C57BL6 mice. *Exp Brain Res*. 2011;210(3-4):489-501. [Crossref] [PubMed] [PMC]

8. Thompson LA, Haburcakova C, Gong W, Lee DJ, Wall C 3rd, Merfeld DM, et al. Responses evoked by a vestibular implant providing chronic stimulation. *J Vestib Res.* 2012;22(1):11-5. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
9. Guyot JP, Sigrist A, Pelizzone M, Kos MI. Adaptation to steady-state electrical stimulation of the vestibular system in humans. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2011;120(3):143-9. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
10. van de Berg R, Guinand N, Stokroos RJ, Guyot JP, Kingma H. The vestibular implant: quo vadis? *Front Neurol.* 2011;2:47. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
11. Guinand N, van de Berg R, Cavuscens S, Stokroos RJ, Ranieri M, Pelizzone M, et al. Vestibular implants: 8 years of experience with electrical stimulation of the vestibular nerve in 11 patients with bilateral vestibular loss. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec.* 2015;77(4):227-40. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
12. Chow MR, Ayiotis AI, Schoo DP, Gimmon Y, Lane KE, Morris BJ, et al. Posture, gait, quality of life, and hearing with a vestibular implant. *N Engl J Med.* 2021;384(6):521-32. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
13. Guinand N, van de Berg R, Ranieri M, Cavuscens S, DiGiovanna J, Nguyen TA, et al. Vestibular implants: Hope for improving the quality of life of patients with bilateral vestibular loss. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2015;2015:7192-5. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
14. Ramos de Miguel A, Falcon Gonzalez JC, Ramos Macias A. Vestibular response to electrical stimulation of the otolith organs. implications in the development of a vestibular implant for the improvement of the sensation of gravito-inertial accelerations. *J Int Adv Otol.* 2017;13(2):154-61. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
15. Rubinstein JT, Bierer S, Kaneko C, Ling L, Nie K, Oxford T, et al. Implantation of the semicircular canals with preservation of hearing and rotational sensitivity: a vestibular neurostimulator suitable for clinical research. *Otol Neurotol.* 2012;33(5):789-96. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
16. Golub JS, Ling L, Nie K, Nowack A, Shepherd SJ, Bierer SM, et al. Prosthetic implantation of the human vestibular system. *Otol Neurotol.* 2014;35(1):136-47. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
17. Ramos Macias A, Ramos de Miguel A, Rodriguez Montesdeoca I, Borkoski Barreiro S, Falcón González JC. Chronic electrical stimulation of the otolith organ: preliminary results in humans with bilateral vestibulopathy and sensorineural hearing loss. *Audiol Neurootol.* 2020;25(1-2):79-90. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
18. Goldberg JM, Fernandez C. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. 3. Variations among units in their discharge properties. *J Neurophysiol.* 1971;34(4):676-84. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
19. Guyot JP, Sigrist A, Pelizzone M, Feigl GC, Kos MI. Eye movements in response to electrical stimulation of the lateral and superior ampullary nerves. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2011;120(2):81-7. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
20. Faan RWBM, Dmsc VHM, Kerber K. Baloh and Honrubia's Clinical Neurophysiology of the Vestibular System. 4th ed. New York: Oxford University Press; 2010.
21. Bronté-Stewart HM, Lisberger SG. Physiological properties of vestibular primary afferents that mediate motor learning and normal performance of the vestibulo-ocular reflex in monkeys. *J Neurosci.* 1994;14(3 Pt 1):1290-308. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
22. Lucieer F, Duijn S, Van Rompaey V, Pérez Fornos A, Guinand N, Guyot JP, et al. Full spectrum of reported symptoms of bilateral vestibulopathy needs further investigation—a systematic review. *Front Neurol.* 2018;9:352. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
23. Perez Fornos A, Guinand N, van de Berg R, Stokroos R, Micera S, Kingma H, et al. Artificial balance: restoration of the vestibulo-ocular reflex in humans with a prototype vestibular neuroprosthesis. *Front Neurol.* 2014;5:66. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
24. Guyot JP, Perez Fornos A, Guinand N, van de Berg R, Stokroos R, Kingma H. Vestibular assistance systems: promises and challenges. *J Neurol.* 2016;263 Suppl 1:S30-5. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
25. Davidovics NS, Fridman GY, Della Santina CC. Co-modulation of stimulus rate and current from elevated baselines expands head motion encoding range of the vestibular prosthesis. *Exp Brain Res.* 2012;218(3):389-400. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
26. Boutros PJ, Schoo D, Rahman M, Valentin NS, Chow M, Gimmon Y, et al. First-in-human safety and preliminary efficacy results for the MVI™ Multichannel Vestibular Implant. *Journal of Hearing Science.* 2018;8(2):195-6. [[Link](#)]
27. Gong W, Haburcakova C, Merfeld DM. Vestibulo-ocular responses evoked via bilateral electrical stimulation of the lateral semicircular canals. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2008;55(11):2608-19. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
28. Merfeld DM, Gong W, Morrissey J, Saginaw M, Haburcakova C, Lewis RF. Acclimation to chronic constant-rate peripheral stimulation provided by a vestibular prosthesis. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2006;53(11):2362-72. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
29. Guinand N, Guyot JP, Kingma H, Kos I, Pelizzone M. Vestibular implants: the first steps in humans. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2011;2011:2262-4. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
30. Gong W, Merfeld DM. System design and performance of a unilateral horizontal semicircular canal prosthesis. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2002;49(2):175-81. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
31. Lewis RF, Haburcakova C, Gong W, Makary C, Merfeld DM. Vestibulo-ocular reflex adaptation investigated with chronic motion-modulated electrical stimulation of semicircular canal afferents. *J Neurophysiol.* 2010;103(2):1066-79. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
32. Hain TC, Helminski JO. Anatomy and physiology of the normal vestibular system. *Vestibular Rehabilitation.* 2007;1(1):2. [[Link](#)]
33. Halmagyi GM, Curthoys IS. Otolith function tests. In: Herdman SJ, Clendaniel RA, eds. *Vestibular Rehabilitation.* 4th ed. New York, NY: F. A. Davis Company; 2014.
34. Merfeld DM, Haburcakova C, Gong W, Lewis RF. Chronic vestibulo-ocular reflexes evoked by a vestibular prosthesis. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007;54(6 Pt 1):1005-15. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
35. Nguyen TA, DiGiovanna J, Cavuscens S, Ranieri M, Guinand N, van de Berg R, et al. Characterization of pulse amplitude and pulse rate modulation for a human vestibular implant during acute electrical stimulation. *J Neural Eng.* 2016;13(4):046023. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
36. Fernandez C, Goldberg JM. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. II. Response to sinusoidal stimulation and dynamics of peripheral vestibular system. *J Neurophysiol.* 1971;34(4):661-75. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
37. DiGiovanna J, Nguyen TA, Guinand N, Pérez-Fornos A, Micera S. Neural network model of vestibular nuclei reaction to onset of vestibular prosthetic stimulation. *Front Bioeng Biotechnol.* 2016;4:34. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
38. van de Berg R, Ramos A, van Rompaey V, Bisdorff A, Perez-Fornos A, Rubinstein JT, et al. The vestibular implant: opinion statement on implantation criteria for research. *J Vestib Res.* 2020;30(3):213-23. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
39. Strupp M, Kim JS, Murofushi T, Straumann D, Jen JC, Rosengren SM, et al. Bilateral vestibulopathy: diagnostic criteria consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society. *J Vestib Res.* 2017;27(4):177-89. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
40. van de Berg R, Guinand N, Guyot JP, Kingma H, Stokroos RJ. The modified ampullar approach for vestibular implant surgery: feasibility and its first application in a human with a long-term vestibular loss. *Front Neurol.* 2012;3:18. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]

41. Fridman GY, Davidovics NS, Dai C, Migliaccio AA, Della Santina CC. Vestibulo-ocular reflex responses to a multichannel vestibular prosthesis incorporating a 3D coordinate transformation for correction of misalignment. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2010;11(3):367-81. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
42. Rubinstein JT, Bierer S, Kaneko C, Ling L, Nie K, Oxford T, Newlands S, Santos F, Risi F, Abbas PJ, Phillips JO. Implantation of the semicircular canals with preservation of hearing and rotational sensitivity: a vestibular neurostimulator suitable for clinical research. *Otology & Neurotology*. 2012;33(5):789-96. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
43. Feigl GC, Fasel JH, Anderhuber F, Ulz H, Riemüller R, Guyot JP, et al. Superior vestibular neurectomy: a novel transmeatal approach for a denervation of the superior and lateral semicircular canals. *Otol Neurotol*. 2009;30(5):586-91. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
44. Wall C 3rd, Kos MI, Guyot JP. Eye movements in response to electric stimulation of the human posterior ampullary nerve. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2007;116(5):369-74. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
45. Dai C, Fridman GY, Della Santina CC. Effects of vestibular prosthesis electrode implantation and stimulation on hearing in rhesus monkeys. *Hear Res*. 2011;277(1-2):204-10. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
46. Tang S, Melvin TA, Della Santina CC. Effects of semicircular canal electrode implantation on hearing in chinchillas. *Acta Otolaryngol*. 2009;129(5):481-6. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
47. Nguyen TAK, Cavuscens S, Ranieri M, Schwarz K, Guinand N, van de Berg R, et al. Characterization of cochlear, vestibular and cochlear-vestibular electrically evoked compound action potentials in patients with a vestibulo-cochlear implant. *Front Neurosci*. 2017;11:645. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
48. Fishman AJ, Roland JT Jr, Alexiades G, Mierzwinski J, Cohen NL. Fluoroscopically assisted cochlear implantation. *Otol Neurotol*. 2003;24(6):882-6. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
49. Stultiens JJA, Postma AA, Guinand N, Pérez Fornos A, Kingma H, van de Berg R. Vestibular implantation and the feasibility of fluoroscopy-guided electrode insertion. *Otolaryngol Clin North Am*. 2020;53(1):115-26. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
50. Phillips C, Ling L, Oxford T, Nowack A, Nie K, Rubinstein JT, et al. Longitudinal performance of an implantable vestibular prosthesis. *Hear Res*. 2015;322:200-11. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
51. Phillips JO, Ling L, Nie K, Jameyson E, Phillips CM, Nowack AL, et al. Vestibular implantation and longitudinal electrical stimulation of the semicircular canal afferents in human subjects. *J Neurophysiol*. 2015;113(10):3866-92. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
52. Guinand N, Van de Berg R, Cavuscens S, Ranieri M, Schneider E, Lucieer F, et al. The video head impulse test to assess the efficacy of vestibular implants in humans. *Front Neurol*. 2017;8:600. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
53. van de Berg R, Guinand N, Nguyen TA, Ranieri M, Cavuscens S, Guyot JP, et al. The vestibular implant: frequency-dependency of the electrically evoked vestibulo-ocular reflex in humans. *Front Syst Neurosci*. 2015;8:255. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
54. Boutros PJ, Schoo DP, Rahman M, Valentin NS, Chow MR, Ayiotis AI, et al. Continuous vestibular implant stimulation partially restores eye-stabilizing reflexes. *JCI Insight*. 2019;4(22):e128397. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
55. Fornos AP, van de Berg R, Armand S, Cavuscens S, Ranieri M, Crétalaz C, et al. Cervical myogenic potentials and controlled postural responses elicited by a prototype vestibular implant. *J Neurol*. 2019;266(Suppl 1):33-41. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
56. Phillips C, Defrancisci C, Ling L, Nie K, Nowack A, Phillips JO, et al. Postural responses to electrical stimulation of the vestibular end organs in human subjects. *Exp Brain Res*. 2013;229(2):181-95. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
57. Lucieer FMP, Van Hecke R, van Stiphout L, Duijn S, Perez-Fornos A, Guinand N, et al. Bilateral vestibulopathy: beyond imbalance and oscillopsia. *J Neurol*. 2020;267(Suppl 1):241-55. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
58. Guinand N, Pijnenburg M, Janssen M, Kingma H. Visual acuity while walking and oscillopsia severity in healthy subjects and patients with unilateral and bilateral vestibular function loss. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 2012;138(3):301-6. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
59. Guinand N, Van de Berg R, Cavuscens S, Stokroos R, Ranieri M, Pelizzone M, et al. Restoring visual acuity in dynamic conditions with a vestibular implant. *Front Neurosci*. 2016;10:577. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)] [[PMC](#)]
60. Starkov D, Guinand N, Lucieer F, Ranieri M, Cavuscens S, Pleshkov M, et al. Restoring the high-frequency dynamic visual acuity with a vestibular implant prototype in humans. *Audiol Neurootol*. 2020;25(1-2):91-5. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]