

# HİTİT SAĞLIK DERGİSİ

## HITIT HEALTH JOURNAL

e-ISSN: 3023-7297 Sayı|Issue: 3 - Eylül|September 2024

### Alt Ekstremitte Amputelerinde Kaybedilen Duyusal Geribildirimlerin Giyilebilir ve İmplant Edilebilir Sensörlerle Yeniden Sağlanmasının Oluşturduğu İyileştirmeler ve Kazanımlar: Derleme Makale

Improvements and Gains from Restoration of Lost Sensory Feedback in Lower Extremity Amputees  
with Wearable and Implantable Sensors: Review Article

Cem SAMUT<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi Havza Meslek Yüksekokulu, Fizyoterapi Programı, Samsun, Türkiye.

#### Sorumlu Yazar | Correspondence Author

Cem SAMUT

cem.samut@omu.edu.tr

Address for Correspondence: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Havza Meslek Yüksekokulu, Fizyoterapi Programı, Samsun, Türkiye.

ROR ID: <https://ror.org/028k5qw24>

#### Makale Bilgisi | Article Information

Makale Türü | Article Type: Derleme | Review

Doi: [doi.org/10.69563/hititsaglikderg.1499590](https://doi.org/10.69563/hititsaglikderg.1499590)

Geliş Tarihi | Received: 11.06.2024

Kabul Tarihi | Accepted: 27.08.2024

Yayın Tarihi | Published: 30.09.2024

#### Atıf | Cite As

Samut, C. (2024). Alt Ekstremitte Amputelerinde Kaybedilen Duyusal Geribildirimlerin Giyilebilir ve İmplant Edilebilir Sensörlerle Yeniden Sağlanmasının Oluşturduğu İyileştirmeler ve Kazanımlar: Derleme Makale. Hitit Sağlık Dergisi, 3, 30-36. <https://doi.org/10.69563/hititsaglikderg.1499590>

**Hakem Değerlendirmesi:** İki Dış Hakem / Çift Taraflı Körlleme.

**Etik Beyanı:** Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

**İntihal Kontrolleri:** Yapıldı - Turnitin

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

**Şikayetler:** [hmj@hitit.edu.tr](mailto:hmj@hitit.edu.tr)

**Katkı Beyanı:** Fikir/Kavram: C.S, Tasarım: C.S, Denetleme/ Danışmanlık: C.S, Veri Toplama ve/veya İşleme: C.S, Analiz ve/veya Yorum: C.S, Kaynak Taraması: C.S, Makalenin Yazımı: C.S, Eleştirel İnceleme: C.S,

**Finansal Destek:** Finansal destek alınmamıştır.

**Telif Hakkı & Lisans:** Dergi ile yayın yapan yazarlar, CC BY-NC 4.0 kapsamında lisanslanan çalışmalarının telif hakkını elinde tutar.

**Peer Review:** Double anonymized - Two External.

**Ethical Statement:** It is declared that scientific and ethical principles have been followed while carrying out and writing this study and that all the sources used have been properly cited.

**Plagiarism Check:** Yes - Turnitin

**Conflict of Interest:** The author(s) has no conflict of interest to declare.

**Complaints:** [hmj@hitit.edu.tr](mailto:hmj@hitit.edu.tr)

**Authorship Contribution:** Concept/Idea: C.S. Design: C.S, Supervision/Consultation: C.S, Data Collection / Data Processing: C.S. Analysis/Interpretation: C.S, Literature Review: C.S. Manuscript Writing: C.S, Critical Review: C.S,

**Informed Consent:** Not applicable.

**Financial Disclosure:** There are no financial funds for this article.

**Copyright & License:** Authors publishing with the journal retain the copyright of their work licensed under CC BY-NC 4.0.

# Alt Ekstremitte Amputelerinde Kaybedilen Duyusal Geribildirimlerin Giyilebilir ve İmplant Edilebilir Sensörlerle Yeniden Sağlanması Oluşturduğu İyileştirmeler ve Kazanımlar: Derleme Makale

## Öz

**Amaç:** Bu derleme, alt ekstremitte amputasyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan duyusal geribildirim eksikliği, protez kullanıcılarında giyilebilir veya implant edilebilir sensörler ile giderildiğinde oluşan iyileştirmeleri ve kazanımları belirlemek amacıyla yapılmıştır.

**Yöntem:** Alt ekstremitte amputasyonuna bağlı protez kullanıcılarında duyusal geribildirim sağlayan uygulamalar sonucundaki kazanımları belirlemek için Science Direct, Medline/Pubmed, Google scholar, Scopus ve Cochrane veri tabanları taranmıştır. Tarama yapılırken “sensory feedback (duyusal geribildirim), wearable sensors (giyilebilir sensörler), neuroprosthesis (nöroprotez), sensory substitution (duyusal ikame) ve postural control (postural kontrol) anahtar sözcükleri kullanılmış olup güncel yaklaşımlar hakkında bilgiler verilmiştir.

**Sonuçlar:** Duyusal geribildirime göre uygun motor yanıt oluşturması beklenen merkezi yapı yanlış veya yetersiz komutlarla alt ekstremitte amputelerine postural kontrolün, yürüme hızının ve simetrisinin sağlanmasında, günlük yaşam aktivitelerinde ve egzersizlerde tüketilen enerji miktarında ve güven duygusunun korunmasında problemler çıkarmaktadır. Teknolojik cihaz ve uygulamalarla yeterli ve uygun duyusal geribildirim sağlandığında doğru motor yanıtların verilmesiyle bahsedilen problemlerin azaldığı veya ortadan kaybolduğu belirlenmiştir.

**Tartışma:** Protez ayağın altına yerleştirilen sensörler ile duyusal geribildirim uyluğa aktarılmasıyla postural kontrolün iyileştiği, özellikle görsel bildirim ihtiyacının azaldığını belirtilmiştir.

Uyluk seviyesinde protez soketinin altına yerleştirilen yüzeysel deri elektrotlarını kullanarak hafif, invazif olmayan ve giyilebilir bir teknoloji olarak geliştirilen “NeuroLegs” sisteminin denendiği bir çalışmada düz zeminde artan yürüyüş simetrisi kaydedilmiştir. Eğimli ve düz yürümenin test edildiği bir çalışmada ise adım uzunluğundaki artışın ve adım genişliğindeki azalmanın duyusal geribildirimle sağlandığı tespit edilmiştir.

Giyilebilir duyusal geribildirim sağlayan sistemlerin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda yürüyüş simetrisinin artışına bağlı olarak, yürürken güvenin artmasına ve daha az telafi edici hareketlere yol açmasıyla daha az yorgunluğa ve metabolik tüketime katkı sağladığı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Duyusal geribildirim, Giyilebilir sensörler, Nöroprotez, Postural kontrol

## Improvements and Gains from Restoration of Lost Sensory Feedback in Lower Extremity Amputees with Wearable and Implantable Sensors: Review Article

### Abstract

**Objective:** This review was conducted to determine the improvements and gains that occur when the lack of sensory feedback due to lower extremity amputations is addressed with wearable or implantable sensors in prosthesis users.

**Method:** Science Direct, Medline/Pubmed, Google scholar, Scopus and Cochrane databases were searched to determine the gains as a result of applications providing sensory feedback in prosthesis users due to lower extremity amputation. The keywords ‘sensory feedback, wearable sensors, neuroprosthesis, neuroprosthesis, sensory substitution and postural control’ were used and information about current approaches was provided.

**Results:** The central structure, which is expected to generate an appropriate motor response according to sensory feedback, causes problems in providing postural control, walking speed and symmetry, the amount of energy consumed in daily life activities and exercises, and maintaining a sense of confidence in lower extremity amputees with incorrect or inadequate commands. When adequate and appropriate sensory feedback is provided with technological devices and applications, it has been determined that the mentioned problems are reduced or disappeared by giving correct motor responses.

**Discussion:** It has been reported that postural control is improved by transferring sensory feedback to the thigh with sensors placed under the prosthetic foot, especially reducing the need for visual feedback.

In a study in which the ‘NeuroLegs’ system, which was developed as a lightweight, non-invasive and wearable technology using superficial skin electrodes placed under the prosthesis socket at the thigh level, increased gait symmetry on flat ground was recorded. In a study testing inclined and level walking, it was found that the increase in step length and decrease in step width were provided by sensory feedback.

In studies investigating the effect of wearable sensory feedback systems, it was found that due to the increase in gait symmetry, it contributes to less fatigue and metabolic consumption by increasing confidence while walking and causing less compensatory movements.

**Keywords:** Sensory feedback, Wearable sensors, Neuroprosthesis, Postural control

## Giriş

İnsan vücudu, yüksek bir kütle merkezi ve nispeten küçük bir destek tabanı nedeniyle denge, postural kontrol ve yürüme gibi çoklu görevleri başarıyla yerine getirirken fazlaca bilgiye ihtiyaç duymaktadır ( Maurer vd., 2001; Simoneau vd., 1995). Vücut ile yer arasında doğrudan ve çoğu zaman tek arayüz olan ayaklar, çevremizi algılamamıza ve çevremizle etkileşim kurmamıza izin vermektedir ( Viseux, 2020). Ayak tabanından gelen dokunsal girdiler, basınç merkezi ve destek tabanına göre konumu dahil olmak üzere ayak-zemin teması hakkında geri bildirim sağlarlar. Bu bilgi, motor kontrol sisteminin destek yüzeyi özelliklerini belirlemesine, ayak-zemin etkileşimlerindeki değişiklikleri algılamasına ve diğer duyuşal girdilerle entegre edildiğinde vücut oryantasyonunu tanımlamasına yardımcı olmaktadır (Winter, 1995; Chien vd., 2014; Chien vd., 2016; Ku vd., 2014). Periferik sinir sisteminin işlevi bozulduğunda veya tamamen yok olduğunda, denge, hareket koordinasyonu ve yürüme paternleri gibi görevlerin başarı ile sürdürülmesi olumsuz etkilenmektedir (Nurse ve Nigg, 2001).

Alt ekstremitte amputeleri, merkezi sinir sistemi ile kayıp ekstremitte arasındaki duyuşal iletişimin yokluğuna bağlı olarak çeşitli fonksiyonel eksikliklerden muzdariptir. Gerçekten de, yaşam kalitelerini önemli ölçüde azaltan yüksek düşme riski, asimetrik yürüme ve denge ile yetersiz ve uygun olmayan protez uygulaması yaşamaktadırlar. Alt ekstremitte amputasyonuna bağlı denge ve yürüme problemlerinin çoğu, ampute edilmiş ekstremitenin propriyoseptif ve dokunma duyuşlarının olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu duyuşal geri bildirim eksikliği, amputelerin günlük yaşamlarında birçok zorlukla karşılaşmasına ve protez kullanımının bırakılmasına yol açmaktadır. Başlıca karşılaşılan zorluklar yavaş yürüme, düşme riski, oldukça asimetrik ve düzensiz yürüme paterni ve buna bağlı olarak sağlam ekstremitteye aşırı yüklenme, sırt ağrısı, osteoartrit, bilişsel yükte artış ve metabolik maliyet ile birlikte %120 daha yüksek kalp krizi olasılığıdır. Ayrıca, amputelerin %50-80'i periferden gelen bilgi eksikliğinden kaynaklanan hayalet uzuv ağrısından da etkilenmektedir (Basla vd., 2022).

EMG Sensörleri (Elektromiyografi), IMU Sensörleri (Inertial Measurement Unit), Basınç Sensörleri, Pozisyon Sensörleri, Giyilebilir Yüksek Hassasiyetli Sensörler, İmplant Edilebilir EMG Elektrotları, Biyosensörler, İmplant Edilebilir Basınç Sensörleri, Nöral İmplantlar, Sensörlü Protez Bağlantı Elemanları kullanılarak amputasyon sonrasında ortaya çıkan geribildirim eksiklikleri azaltılmaya ve ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır.

Geliştirilmiş kontrol ve fonksiyon, denge ve stabilite, gerçek zamanlı veri ve analiz, esneklik ve kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, daha iyi entegrasyon ve konfor, kapsamlı veri toplama, düşük müdahale gereksinimi, yaşam kalitesini artırma, daha doğal hareket ve kişiselleştirilmiş tedavi gibi avantajları sayesinde amputelerde kullanım alanı artmaktadır.

Bu derleme, alt ekstremitte amputasyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan duyuşal geribildirim eksikliği, protez kullanıcıları için giyilebilir veya implant edilebilir sensörler ile giderildiğinde ortaya çıkan iyileştirmeleri ve kazanımları belirlemek amacıyla yapılmıştır.

## Yöntem

Alt ekstremitte amputasyonuna bağlı protez kullanıcılarında duyuşal geribildirim sağlayan uygulamalar sonucundaki kazanımları belirlemek için Science Direct, Medline/Pubmed, Google scholar, Scopus ve Cochrane veri tabanları taranmıştır. Tarama yapılırken "sensory feedback (duyuşal geribildirim), wearable sensors (giyilebilir sensörler), neuroprosthesis (nöroprotez), sensory substitution (duyuşal ikame) ve postural control (postural kontrol) anahtar sözcükleri kullanılmış olup 2018-2024 yılları arasında amputelerde geribildirim sağlayan sensörlerin kullanıldığı ve sonuçlarının rapor edildiği güncel yaklaşımlara yer verilmiştir.

## Bulgular

Alt ekstremitte amputeleri, merkezi sinir sistemi ile kayıp ekstremitte arasındaki duyuşal iletişimin yokluğuna bağlı olarak çeşitli fonksiyonel eksikliklerden muzdariptir (Basla vd., 2022). Bozulmuş bir sensorimotor döngü ile, amputasyonlu kişiler genellikle düşme korkusu ve yüksek düşme prevalansı ile zayıf denge ve yürüme işlevi gösterirler (Chen vd., 2021). Giyilebilir ve implante edilebilir sensörler aracılığıyla duyuşal geribildirim sağlandığında meydana gelen gelişmeler aşağıda sunulmuştur.

## Postural Kontrol

Plantar basıncın gerçek zamanlı geri bildirimini sağlamak için basit bir dokunsal stimülasyon sisteminin tasarladığı,

transtibial amputasyonlu ve engelli olmayan kişilerde postüral kontrolü iyileştirmedeki etkinliğinin test edildiği bir çalışmada eksik plantar basınç bilgisini değiştirmek için vibrotaktil stimülasyonun kullanılması, görsel olarak tedirgin ayakta durma sırasında postüral stabilitede iyileşmelere yol açtığı ayrıca hem engelli olmayan katılımcılar hem de alt ekstremitte amputasyonu olan kişilerin özellikle büyük görsel bozulmaların duruşlarını zorladığında duysal ikameden yararlanabileceğini belirtilmiştir (Chen vd., 2021). Tek taraflı transfemoral amputasyonunun neden olduğu bozulmuş bir sensorimotor sistemden kaynaklanan nöromüsküler adaptasyonları Berg testi, Zamanlı kalk ve yürü testi ve gözleri açık/kapalı ayakta duruş ile inceleyen Claret ve arkadaşları, protez ayağın altına yerleştirilen sensörler ile duysal geribildirim uyuğa aktararak çalışmalarını tamamlamış ve postural kontrolün iyileştiğini, özellikle görsel bildirim azaldığı durumlarda duysal geribildirim ihtiyacının arttığını belirtmişlerdir (Claret vd., 2019). Shell ve arkadaşları, ampute tarafta elektriksel olarak ortaya çıkan dokunma duyumları ve sağlam ayağın altındaki titreşimi kullanarak üç transtibial amputede gözler kapalıyken ayakta denge sırasında duysal bozulmalara verilen tepkileri belirlemek üzere eksik olan biyolojik mekanoreseptörlerin yerine iletilen stimülasyonu değiştirerek modüle edilebilen spesifik dokunma duysusu sağlayan periferik sinir stimülasyonu (PNS) sistemi geliştirmişlerdir. PNS duysal girdileri, protez ayağın altına yerleştirilen basınç sensörlerinden gelen okumalara yanıt olarak PNS'yi modüle ederek ayak-yer teması hakkında bilgi sağlayarak amputelerde postural kontrol mekanizmalarını hızlıca devreye sokabildiklerini tespit etmişlerdir (Shell vd., 2021).

### **Yürüme Simetrisi Ve Hızı**

Alt ekstremitte transfemoral amputelere hem dokunsal hem de diz eklemi açısı geri bildirim sağlamak için uyulmuş seviyesinde protezin soketinin altına yerleştirilen yüzeysel deri elektrotlarını kullanarak hafif, invazif olmayan ve giyilebilir bir teknoloji olarak geliştirilen "NeuroLegs" sisteminin denendiği çalışmada düz zeminde yürüme görevleri sırasında genel olarak artan yürüyüş simetrisi kaydedilmiştir. Yürüme simetrisinde gözlemlenen artış, sağlıklı taraftaki bir değişikliğin aksine, protetik taraftaki duruş/sallanma oranındaki artışa bağlanmıştır (Nurse ve Nigg, 2001). Eğimli ve düz yürüme görevlerinin test edildiği bir çalışmada protez adım uzunluğundaki artış ve adım genişliğindeki azalma duysal geribildirim ile sağlanmıştır (Chee vd., 2022). Yürüme asimetrisinin transfemoral amputelerde değerlendirildiği bir başka çalışmada duysal geribildirim sağlandığında asimetriyi ve aşırı bilişsel yüklenmeyi azalttığı bildirilmiştir (Martini vd., 2021). İki transfemoral ampute üzerinde yapılan çalışmada duysal geribildirim sağlandığında yürüme hızının önemli ölçüde arttığı bulunmuştur (Petrini vd., 2019).

### **Proprioseptif Duyu**

Ayrıca "NeuroLegs" sistemi ampute deneklere farklı hızlarda yürüme modelleriyle eşleşen dokunsal ve benzetilmiş diz açısı proprioseptif geri bildirim sağladığı gösterilmiştir (Nurse ve Nigg, 2001). Transtibial amputasyonu olan iki kişide diz ve güdüğün üzerindeki periferik sinirlerin duysal liflerinin seçici olarak uyarılmasını araştıran bir çalışmada yüksek yoğunluklu kompozit düz arayüz sinir elektrotlar kullanılarak uyarılan bölgelerde ortaya çıkan duyumlar anında algılanır ve katılımcılar tarafından eksik uzuvdan kaynaklandığı şeklinde yorumlanır. Bildirilen modaliteler, proprioseptif duyumların yanı sıra dokunsal duyumları içerir ve her biri, değişen stimülasyon parametreleriyle modüle edilebilir (Charkhkar vd., 2018). Gardetto ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada duysal geribildirim ile sanki kayıp ayağa dokunulmuş veya yerle temas ettirilmiş gibi gerçekten hissedildiği ayrıca protez ayağın uzaydaki pozisyonu ve yük taşıması ile ilgili gelişmiş geri bildirim nedeniyle, protez rehabilitasyonun kolaylaştığı ve fonksiyonel parametrelerin iyileştirildiği bulunmuştur (Gardetto vd., 2021).

### **Metabolik Tüketim**

Ayak basıncını ve diz eklemi açısını transfemoral amputelerin güdüğü üzerindeki elektro-kutanöz stimülasyona eşleyen giyilebilir bir duysal geribildirim sağlayan sistemin etkisinin araştırıldığı çalışmada yürüyüş simetrisinin artışına bağlı olarak, yürürken güvenin artmasına ve daha az telafi edici hareketlere yol açması, bu durumun da yürürken daha az yorgunluğa ve dolayısıyla daha az metabolik tüketime katkı sağladığı bulunmuştur (Chee vd., 2022). Petrini ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada iki transfemoral amputenin ayak tabanına yerleştirilen sensörler rezidüel tibial sinire duysal geribildirim yapmıştır. Oksijen tüketimini ölçmek için bir bilgisayara kablosuz telemetri ile donatılmış bir mobil spirometri sistemi (Oxycon Mobile; Erich Jaeger, VIASYS Healthcare) kullanılmış olup, ölçümlerde daha düşük oksijen ve metabolik tüketimi ayrıca zihinsel ve fiziksel yorgunluğun azalmış olduğu sonuçları elde edilmiştir (Petrini vd., 2019).

### **Güven**

Daha önce bahsettiğimiz "NeuroLegs" sisteminin denendiği çalışmada duysal geri bildirim kullanıcının

işlevsel kabiliyetine fayda sağladığı ve aynı zamanda protezlerine duydukları güveni arttırdığı belirtilmiştir (Nurse ve Nigg, 2001). Topuk vuruş zirvesindeki azalma, adım uzunluğundaki artış, adım genişliğindeki azalma ve buna bağlı itme kuvvetindeki artışlar gibi mikroskobik yürüyüş değişikliklerin belirlendiği çalışmada duyu geribildirim proteze olan güveni arttırdığı kaydedilmiştir (Chee vd., 2022). Bağımsız yaşamın önemli bir parçası olan merdiven inişi, protez kullanıcıları için özellikle zorlu bir görevdir (de Laat vd., 2013). Denge, yüksek derecede motor kontrol, uzuv simetrisi ve ayağın nereye yerleştirildiğinin farkında olmayı gerektiren düz zeminde yürümenin aynı zorluklarının çoğunu içerir (Lythgo vd., 2007). Rokhmanova ve Rombokas'ın tek taraflı transtibial amputelerde yapmış olduğu bir çalışmada ayak parmağından topuğa doğru düzenlenmiş dört kuvvet sensörlü bir iç tabandan alınan geribildirim uyluğa medio-lateral yönde aktarıldığı bir sistem kullanılmıştır. Alınan duyu geribildirim merdiven çıkma sırasında ayak pozisyonu algısını iyileştirdiği ve dinamik görevlerde performansı arttırdığı belirtilmiştir (Rokhmanova ve Rombokas, 2019).

### **Fantom Ağrısı**

Lauren Chee ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada hedeflenen duyu inervasyonun, non-invaziv dokunuş yoluyla ortaya çıkabilen somatotopik duyumların yeniden eşlenmesi yoluyla fantom uzuv ağrısını azalttığı gösterilmiştir (Chee vd., 2022). Bir başka çalışmada ayak tabanına yerleştirilen sensörler aracılığıyla sağlanan duyu geribildirim ile transfemoral amputelerde fantom ağrısında azalma tespit edilmiştir (Petrini vd., 2019). Amputelerde, eksik uzuvdan gelen duyu bilgi eksikliği, beyinde kendiliğinden üretilen sinyallerle aşırı telafiye ve sonuç olarak fantom ağrısına yol açar. Amputeler sadece fantom ağrısından muzdarip olmakla kalmaz, aynı zamanda sıklıkla amputasyon sonrası nöroma ağrısı yaşarlar. Mevcut çalışmada "Saphenus Medical Technology" tarafından geliştirilen titreşimli uyarana bağlı geri bildirim sistemi kullanılarak Sural sinirin uyarılması ile alt ekstremitenin güdük kısmındaki bir alanın yeniden aktifleştirildiği ve mevcut otolog sinirlerle yeniden inerve edilerek ayağa gerçek hissinin geri verildiği ve fantom ile nöroma ağrısını azalttığı veya önlediği bildirilmiştir (Gardetto vd., 2021).

### **Sonuç ve Öneriler**

Amputasyon sonrasında kullanılan sensörlerle birlikte protezlerin kas sinyalleri ile daha hassas ve doğal bir şekilde kontrol edilmesi, yürüyüş sırasında dengeyi ve hareketlerin doğruluğunu izleyerek protez kullanıcılarının daha güvenli ve dengeli yürümeleri, düşme riskinin azaltılması, protezlerin daha hassas ve doğal bir şekilde kontrol edilmesi, vücutla entegre bir şekilde çalışarak uzun süreli konfor ve performans sağlanması, enerji harcamasının ve fantom ağrısının azaltılması sağlık, konfor ve fonksiyonellik açısından ampute bireylere sağlanan oldukça önemli kazanımlardır. Amputasyon sonrası kullanılacak sensörlerin maliyet azaltılma çalışmalarının yapılması, protez rehabilitasyonu alanında çalışan sağlık personelinin sayısının ve eğitimine gösterilen önemin artırılması, teknolojik gelişimleri kullanarak daha fazla hasta üzerinde protez ve sensörlerin kullanımıyla birlikte doğru hastaya uygun teknolojik yaklaşımın tercih edilerek kazanımların artırılması sağlanmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Basla, C., Chee, L., Valle, G., & Raspopovic, S. (2022). A non-invasive wearable sensory leg neuroprosthesis: Mechanical, electrical and functional validation. *Journal of Neural Engineering*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac43f8>
- Charkhkar, H., Shell, C. E., Marasco, P. D., Pinault, G. J., Tyler, D. J., & Triolo, R. J. (2018). High-density peripheral nerve cuffs restore natural sensation to individuals with lower-limb amputations. *Journal of Neural Engineering*, 15(5), 056002. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aac964>
- Chee, L., Valle, G., Marazzi, M., Preatoni, G., Haufe, F. L., Xiloyannis, M., Riener, R., & Raspopovic, S. (2022). Optimally-calibrated non-invasive feedback improves amputees' metabolic consumption, balance and walking confidence. *Journal of Neural Engineering*, 19(4). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac883b>
- Chen, L., Feng, Y., Chen, B., Wang, Q., & Wei, K. (2021). Improving postural stability among people with lower-limb amputations by tactile sensory substitution. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 18(1), 159. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00952-x>
- Chien, J. H., Eikema, D.-J. A., Mukherjee, M., & Stergiou, N. (2014). Locomotor sensory organization test: A novel paradigm for the assessment of sensory contributions in gait. *Annals of Biomedical Engineering*, 42(12), 2512-2523. <https://doi.org/10.1007/s10439-014-1112-7>
- Chien, J. H., Mukherjee, M., Siu, K.-C., & Stergiou, N. (2016). Locomotor Sensory Organization Test: How Sensory Conflict Affects the Temporal Structure of Sway Variability During Gait. *Annals of Biomedical Engineering*, 44(5), 1625-1635. <https://doi.org/10.1007/s10439-015-1440-2>
- Claret, C. R., Herget, G. W., Kouba, L., Wiest, D., Adler, J., von Tscharnner, V., Stieglitz, T., & Pasluosta, C. (2019). Neuromuscular adaptations and sensorimotor integration following a unilateral transfemoral amputation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 16(1), 115. <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0586-9>
- de Laat, F. A., Rommers, G. M., Dijkstra, P. U., Geertzen, J. H., & Roorda, L. D. (2013). Climbing stairs after outpatient rehabilitation for a lower-limb amputation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(8), 1573-1579. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.01.020>
- Gardetto, A., Baur, E.-M., Prahm, C., Smekal, V., Jeschke, J., Peternell, G., Pedrini, M. T., & Kolbenschlag, J. (2021). Reduction of Phantom Limb Pain and Improved Proprioception through a TSR-Based Surgical Technique: A Case Series of Four Patients with Lower Limb Amputation. *Journal of Clinical Medicine*, 10(17), 4029. <https://doi.org/10.3390/jcm10174029>
- Ku, P. X., Abu Osman, N. A., & Wan Abas, W. A. B. (2014). Balance control in lower extremity amputees during quiet standing: A systematic review. *Gait & Posture*, 39(2), 672-682. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.07.006>
- Lythgo, N., Begg, R., & Best, R. (2007). Stepping responses made by elderly and young female adults to approach and accommodate known surface height changes. *Gait & Posture*, 26(1), 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.07.006>
- Martini, E., Cesini, I., D'Abbraccio, J., Arnetoli, G., Doronzio, S., Giffone, A., Meoni, B., Oddo, C. M., Vitiello, N., & Crea, S. (2021). Increased Symmetry of Lower-Limb Amputees Walking With Concurrent Bilateral Vibrotactile Feedback. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 74-84. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2020.3034521>
- Maurer, C., Mergner, T., Bolha, B., & Hlavacka, F. (2001). Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neuroscience Letters*, 302(1), 45-48. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)01655-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)01655-x)
- Nurse, M. A., & Nigg, B. M. (2001). The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 16(9), 719-727. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(01\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(01)00090-0)
- Petrini, F. M., Bumbasirevic, M., Valle, G., Ilic, V., Mijović, P., Čvančara, P., Barberi, F., Katic, N., Bortolotti, D., Andreu, D., Lechler, K., Lesic, A., Mazic, S., Mijović, B., Guiraud, D., Stieglitz, T., Alexandersson, A., Micera, S., & Raspopovic, S. (2019). Sensory feedback restoration in leg amputees improves walking speed, metabolic cost and phantom pain. *Nature Medicine*, 25(9), Article 9. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0567-3>
- Rokhmanova, N., & Rombokas, E. (2019). Vibrotactile Feedback Improves Foot Placement Perception on Stairs for Lower-Limb Prosthesis Users. *IEEE ... International Conference on Rehabilitation Robotics: [Proceedings]*, 2019, 1215-1220. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779518>
- Shell, C. E., Christie, B. P., Marasco, P. D., Charkhkar, H., & Triolo, R. J. (2021). Lower-Limb Amputees Adjust

Quiet Stance in Response to Manipulations of Plantar Sensation. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 611926. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.611926>

Simoneau, G., Ulbrecht, J., Derr, J., & Cavanagh, P. (1995). Role of somatosensory input in the control of human posture. *Gait & Posture*, 3(3), 115-122. [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(95\)99061-O](https://doi.org/10.1016/0966-6362(95)99061-O)

Viseux, F. J. F. (2020). The sensory role of the sole of the foot: Review and update on clinical perspectives. *Neurophysiologie Clinique*, 50(1), 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.12.003>

Winter, D. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, 3(4), 193-214. [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(96\)82849-9](https://doi.org/10.1016/0966-6362(96)82849-9)