



Zararsız Acısal Uyarımın Etkinliğinin Araştırılması

Investigation of the Efficacy of Innocuous Pain Stimulation

Muhammed Tarık ÇÖPOĞLU

Biyomedikal Mühendisliği
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
mtcopoglu@st.medipol.edu.tr

Elif HOCAOĞLU

Elektrik ve Elektronik
Mühendisliği
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
ehocaoglu@medipol.edu.tr

Özetçe—Bu çalışma, zararsız acısal uyarımının bir nesnenin kavrama başarısı üzerindeki etkisini, kuvvet ve görsel geri bildirim etkisiyle karşılaştırarak incelemektedir. İnsanlı deneylerimizde, sanal parmakların pozisyonu sanal nesnenin sınırlarını aştığında, insan koluna zararsız ağrı uyarımını sağlamak için mikro kontrollü bir haptik cihaz kullanılır. Gönüllülerin kavrama performansı, sanal nesnenin dış çapını aşarak içeri giren sanal parmakların pozisyonundaki hata oranına göre değerlendirilir. Deneyde tanımlanan görevin gerçekleştirildiği sırada, gönüllünün koluna uygulanan uyarı miktarı pozisyon hatasıyla orantılı olarak uygulanır. Ön sonuçlar, zararsız acısal uyarımın, güç ve görsel uyarılara kıyasla daha başarılı el pozisyonlaması ve daha uygun kavrama seviyesi sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler — *zararsız acısal uyarım, dokunsal geribildirim, el protezi.*

Abstract—This study investigates the efficacy of the innocuous pain stimulation on the success rate of grasping an object in comparison to the efficacy of force and visual feedback. In our human-subject experiments, a microcontrolled haptic device is employed to provide the innocuous pain stimulus to human arm when the positioning of the virtual fingers exceeds the boundaries of the virtual object. Grasping performance of the subjects is evaluated based on the measured error, which is the level of intrusion of fingers with respect to the boundary of the circle. While performing the task, innocuous pain stimulation is applied to the subjects' arm as a function of the measured error through the hand exoskeleton device. Preliminary results show that innocuous pain stimuli provide more successful hand positioning and more optimal gripping level compared to force and visual stimuli.

Keywords — *innocuous pain stimulation, haptic feedback, hand prosthesis.*

I. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan el protezleri temel el hareketlerini taklit edebilmek için geliştirilmişlerdir. Bu cihazlarda kullanılan kontrol mekanizmaları kullanıcıların görsel uyarılarını esas alır. Protez kullanımında böylesine kısıtlı bir

bilgi kaynağının kullanımı çoğunlukla hatalı kontrol, başka bir deyişle, düşük seviyeli kavrama kapasitesi gibi problemlere yol açar. Dahası, duyuşsal geri bildirim eksikliği rehabilitasyon sürelerinin uzamasına yol açan sezgisel olmayan kontrollü tetikler. Ne yazık ki piyasada mevcut ticari cihazlar kullanıcıya görsel geri bildirim dışında herhangi bir geri bildirim sağlayamamakta, bu da protez kullanan amputelerde memnuniyetsizlik ve bıkkınlığa yol açmaktadır[1]. Bu probleme pratik bir çözüm getirmek adına somatosensöri, mekanik[2], titreşimsel [3] ve elektriksel[4] uyarılar kullanan farklı tipte uyarıcı cihazlar geliştirme girişimleri olmuştur.

Duyusal geribildirimler insan vücudunu çevreleyen çeşitli sinir hücreleri tarafından sağlanır. Bu sinir hücreleri mekanoreseptörler(dokunma ve basınç), propriyoseptörler (eklem pozisyon ve hareketi), nosiseptörler(noktasal basınç, sıcaklık, çeşitli kimyasallar veya bu üç uyarımın kombinasyonu) ve termoreseptörler olarak sınıflandırılabilir[5]. Saydığımız bu sinir hücrelerinin sağladığı sürekli duyuşsal geri bildirim, sinir sisteminin her zaman dış çevredeki değişikliklerden haberdar olabilmesine olanak tanır. Duyusal geribildirim önemini daha iyi izah edebilmek için eldiven giyerken cüzdandan bozuk para alma örneğini ele alabiliriz. Normal şartlarda çıplak elle çok basit bir şekilde yapılabilen bu iş, duyuşsal geribildirim kısıtlanması sebebi ile çok zahmetli bir hal almaktadır. Görüldüğü üzere duyuşsal geribildirim mekanizmalarının eksikliği halinde, cüzdandan bozuk para alma gibi gayet basit bir eylem bile büyük bir külfet haline gelebilmektedir.

Üst ekstremitate amputasyonuna uğramış bireyler, hayatlarındaki temel işleri görmek adına el protezlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Her ne kadar protez teknolojileri şu ana dek insanların hayatını kolaylaştırma ve temel ihtiyaçlarını karşılamada çok yol kat etmiş olsa da, kullanıcıya duyuşsal geribildirim sağlayabilen bir cihaz henüz piyasaya sürülmemiştir. Bugün, farklı araştırma grupları tarafından geliştirilmiş, direkt sinir sistemine bağlı elektrotlar kullanan[6], kayıp duyunun yerini başka bir duyu ile dolduran [7], hava basıncıyla veya servo motorlarla çalışan mekanik

uyarıcılar kullanan [8], sistemler gibi duysal geribildirim sağlayan farklı sistemler vardır. Bahsedilen çalışmalar yeni nesil protez geliştirme konusunda birçok yeniliğe imza atmış olmasına rağmen beraberinde bazı problemler ve eksiklikler de getirmişlerdir. Bu eksikliklerin başında sezgisel kontrolün olmayışı, adaptasyon süreçleri, yüksek konsantrasyon ihtiyacı, ve uzun süren rehabilitasyon periyotları gelmektedir. Bu problemler protez kullanan amputelerin yaklaşık olarak %20'lik bir kısmının protez kullanımını terk etmelerine yol açmaktadır[1].

Duyusal geribildirim sağlamak adına yapılan çalışmalarda bir çok farklı metot kullanılmasına rağmen, zararsız acı hissi ve etkilerinin kullanımını araştıran pek az çalışmaya rastlanmaktadır[9,10]. Acı veren uyarıların sinir sisteminde oluşturduğu kendine mahsus etkiler, çevreden gelen zararlı etmenlere çok daha hızlı ve net cevaplar verilmesini sağlar [11]. Acı uyarılarının kendine has bu özellikleri, zararsız acısal uyarıların protez geliştirirken faydalı bir unsur olarak kullanılabilirler.

Ampüte bireyler tarafından olumsuz karşılanan bahsi geçen sorunlara çözüm getirmek amacıyla bu çalışmada, zararsız acı uyarıcıların sanal ortamda tasarlanan el protezinin kontrolü sırasındaki performansı üzerine etkisi tartışılmaktadır. Acı uyarıcılarının pozisyon kontrolü, hassasiyeti ve tepki süreleri üzerine etkileri kuvvet ve görsel geribildirim yöntemleri ile karşılaştırılarak analiz edilmiş ve yeni nesil protezlerin geliştirilmesinde olası faydaları araştırılmıştır.

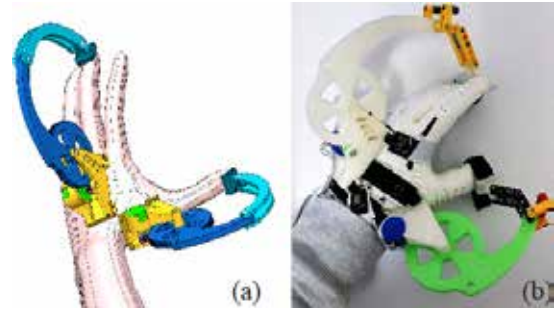
II. MATERYAL VE METOT

Sürdürülen çalışmada zararsız acı uyarılarının üst ekstremité ampütasyonu olan kişilerde el pozisyonlamadaki başarısını ve hassaslığını incelemek için 3 aşamalı bir deney tasarlanmıştır. Deneyde sırayla yalnızca görsel, görsel ile beraber zararsız acı, görsel ile beraber kuvvet geribildirimleri vererek; tanımlanan görevi başarıyla performansları değerlendirilmektedir. Deneyler sağlıklı gönüllüler ile yürütüldüğünden deney düzeneği tasarımında ampüte bireylerin yaşadığı koşulları sağlamak esas alınmıştır. Gerçekçi koşulları sağlamak adına gönüllülere giydirilen Şekil 1'de gösterilen el dış iskeleti, dış iskelet aracılığıyla yaptıkları kontrolün sonucunu gözlemledikleri Şekil 2'de gösterilen iki boyutlu sanal gerçeklik ortamı tasarlanmıştır. Sanal gerçeklik ortamında gönüllü bireyin tutması istenen silindirik objelerin üst görünüşleri ve aynı zamanda dış iskeletin temsili belirlenmiştir.

Deney düzeneğinde sanal gerçeklik ortamının yer almasının ana sebebi, piyasada var olan protezleri kullanan bireylerin yaşadıkları durumu deneye aktarabilmektir; diğer bir deyişle üst ekstremité amputelerinin tecrübe ettiği gibi, deneyde kişinin ortamdan aldığı geribildirimler yalnızca görsel uyarılarla sınırlandırılmıştır [12,13]. Çalışmada acı uyarılarının ve dokunsal uyarıların performans üzerine etkilerinin gözlenebilmesi için bu uyarıları oluşturacak ve her deneye uyumlu olabilecek elektromekanik bir sistem geliştirilmiştir.

Deneyler sırasında gönüllülerden, Şekil 2'de sembolize edilen sanal gerçeklik ortamında görünen ve çapı sürekli

olarak değişen dairesel bir objeyi, yine sanal ortamda beliren sanal tutucuların kontrolünü sağlayarak en az hata ile tutmaları beklenmektedir. Gönüllüler için sanal ortamda belirlenen görevde sanal obje boyutlarının sürekli olarak değişmesi bireylerin anlık değişen şartlara karşı adapte olma miktarlarını ve sürelerini gözlemlememize olanak sağlamaktadır. Sanal gerçeklik ortamında beliren sanal tutucular iki parmaktan oluşmakta ve bu iki parmağın açılma pozisyonu, gönüllülerin ellerine giymiş oldukları dış iskelet aracılığıyla kontrol edilmektedir. Sanal tutucuların sanal objenin dış sınırlarından içeri girmesi durumunda gönüllüye geribildirim (kuvvet, acı bildirim veren uyarılar) uygulanmaktadır. Sanal tutucuların obje dışında kalmaları durumunda gönüllülere herhangi bir geri bildirimde bulunulmaz.



Şekil 1. (a) Montajı tamamlanmış el dış iskeleti katı modeli. Açık mavi parçalar hareketi ileten bağlantıları, yeşil parçalar potansiyometreleri, koyu mavi olan parçalar dişli takımlarını temsil etmektedir. (b) Gönüllüye giydirilmiş el dış iskeleti

A. El dış iskelet tasarımı

Deney düzeneğinde kullanılan iki boyutlu sanal gerçeklik ortamında, sanal tutucuların kontrolünün sağlanması için parmaklar üzerine konumlandırılmış katı modeli Şekil 1'de gösterilen bir dış iskelet geliştirilmiştir. Bu cihaz geliştirilirken hali hazırda var olan tasarımlar[14,16] incelenmiş, deney için en uyumlu olanın daha net ve tutarlı sonuçlar veren dış iskelet temelli bir mekanizma olduğuna karar verilmiştir. Geliştirilen dış iskelet bir FDM 3D yazıcı ile polimer materyal kullanılarak üretilmiştir. Parmak hareketleri dış iskelet sayesinde 10kΩ dirençli 10 turlu yüksek hassasiyet potansiyometrelere aktarılarak proksimal falankstaki açılma değişim hesaplanır, ardından sanal parmakların hareket algoritmalarında girdi olarak kullanılmasını sağlar. Buna ek olarak, tasarıma eklenen 29:7 oranlı dişli takımı ile cihaz 0.07 derecelik açı değişimlerini algılayabilecek bir kapasiteye ulaştırılmıştır. Kavrama hareketi için yeterli bilgiyi sağladığından, dış iskeletler yalnızca baş parmak ve orta parmak üzerine yerleştirilmişlerdir. Dış iskeletlere bağlı iki farklı potansiyometreden elde edilen analog sinyaller Arduino Mega 2560 mikroişlemci yardımı ile sanal gerçeklik ortamında kullanılacak eşzamanlı sayısal veriye dönüştürülür ve bir algoritma yardımı ile bu sayısal veri sanal parmakların hareket ettirmek için kullanılır.

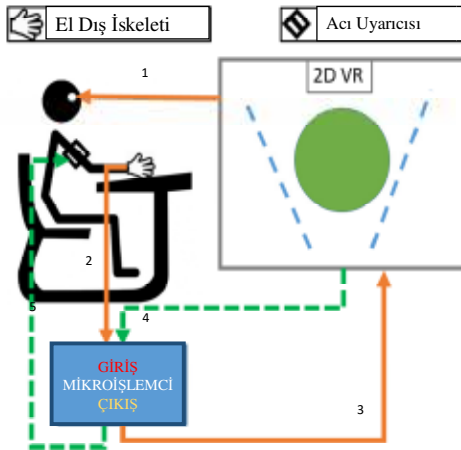
B. Acı uyarıcısı tasarımı

Deneyler sırasında kuvvet ve acı veren uyarılar oluşturmak için iki özdeş yüksek tork sağlayabilen servo motor(1.9kg/26.4oz-in - 4.8V, 2.5kg/34.7oz-in - 6V) ve özel



olarak tasarlanmış aparatlar kullanılmıştır. Şekil 3'de sembolize edilen bu aparatlar servo motorlar itki sağladıklarında deneğin derisi üzerine baskı uygulayacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan aparatlardan sivri uçlu olanı ucu 3 mm olan konik bir pençe biçiminde, yumuşak uçlu olanı ise pençe üzerine geçirilmiş 10 mm çapında geniş yuvarlak yüzeye sahip küresel başlık şeklindedir. Bu aparatlar daha önceden bahsedilmiş olan el dış iskeleti ile aynı yöntem ve materyal kullanılarak üretilmişlerdir.

Aparatlar tasarlanırken kullanıcıya kati surette bir zarar vermeyecek şekilde çalışmalarına dikkat edilmiştir. Kullanıma hazır olan aparatlar servo motorlara monte edildikten sonra elde edilen iki uyarıcı cihaz, üst kolun biceps bölgesinin sağ ve sol taraflarına deriye temas edecek biçimde cırt cırt bantlar ile sabitlenmişlerdir. Deney sırasında sanal gerçeklik ortamında parmakların cismin sınırlarından içeri girmesi halinde, içeri girme miktarına doğru orantılı olarak dönüş yapmaları için servo motorlara sürekli sinyaller gönderilmiştir. Bu sinyaller, her denek için kaldırabilecekleri maksimum acı seviyesini göz önünde bulundurarak oranlamayı yapan bir algoritma tarafından üretilmiştir.



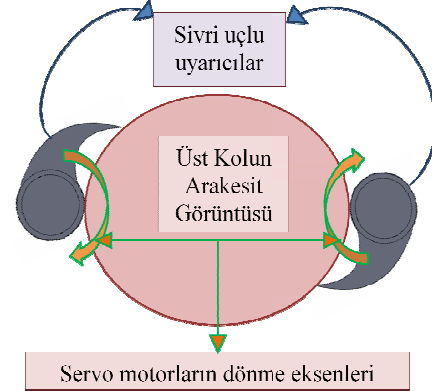
Şekil 2. Deney düzeneği. Yeşil daire sanal gerçeklik ortamındaki cismi, mavi kesikli çizgiler sanal parmakları ve şekilde kullanılan sayılar sırası ile geri bildirim sistemlerinin işleyiş düzenini temsil etmektedir. 1-görsel geri bildirim, 2-parmakların konumlandırılması, 3-konum bilgisinin sanal gerçekliğe aktarılması, 4-sanal gerçeklikten hata miktarına oranla sinyal gönderilmesi, 5-kuvvet veya acı veren uyarıcılarla deneğin uyarılması.

C. Sanal gerçeklik tasarımı

Sanal gerçeklik ortamı, MATLAB® ara yüzü ile oluşturulmuş 2 boyutlu bir uzayı temel alarak hazırlanmıştır. Şekil 2'te temsili edilen bu 2 boyutlu düzlem, yarıçapı değişebilen bir dairesel cisim ve parmakları temsil eden 2 adet çizgiye ev sahipliği yapmaktadır. Parmak dış iskeletinden gelen analog verinin bir mikroişlemci aracılığı ile sayısal veriye dönüştürülmesinin ardından bu sayısal veri sanal parmakları hareket ettirmek için kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma, hazırlık aşamasında yapılan kalibrasyonun ardından deneğin el hareketlerinin yüksek tutarlılık ile hesaplanmasına olanak sağlamıştır. Deneğin denekler için daha anlaşılabilir olması ve deneklerin daha gerçekçi bir deneyim yaşamalarını sağlamak için, 2 boyutlu düzlem deneklerin dirsek hizasına

konumlandırılmış yatay bir ekrana yansıtılmıştır. Bu yolla gönüllülerde masanın üzerindeki bir cismi tutmaya çalışıyorlarmış izlenimi uyandırılmak istenmiştir. Kuvvet ve acı veren uyarıcıların kullanıldığı deneylerde, deneğin parmaklarının dairesel cismin sınırlarından içeri girme miktarına oranla servo motorlara sinyaller gönderilmiştir.

Deney sırasında gönüllülerden toplanan veriler daha sonra zararsız acısal uyarıların etkilerini analiz etmek ve diğer uyarı tipleri ile karşılaştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 3. Arakesiti gösterilen üst kolda biceps bölgesinin sağ ve sol tarafına yerleştirilmiş zararsız acı veren uyarıcılar.

III. DENEYSEL SONUÇLAR

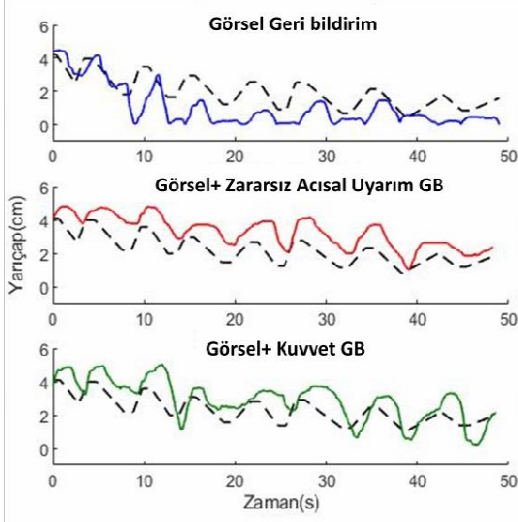
Çalışmamızda gerçekleştirilen deneylere yaşları 18 ile 23 arasında değişen, sağlıklı 2 erkek ve 2 kadın olmak üzere toplam 4 gönüllü katılmıştır. Gönüllüler İstanbul Medipol Üniversitesi Etik Kurul Birimince onanmış, rıza gösteren gönüllü bildirim formunu okumuş ve onaylamıştır.

Deneyler üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda gönüllüden sanal ortamda beliren objeyi yalnızca görsel geri bildirim yoluyla tutması beklenmektedir. İkinci kısımda gönüllünün hem görsel hem de acı veren uyarıcı yardımıyla objeyi yüksek başarıyla tutması beklenmektedir. Gönüllünün kontrol ettiği sanal parmaklar sanal objenin sınırları içine girdiğinde acı veren uyarıcı verilmektedir. Deneyin son aşamasında ise gönüllünün hem kuvvet hem de görsel geri bildirimden faydalanmasına izin verilmiştir. Deneyler 10 saniyelik hazırlanma kısmı ile beraber toplam 60 saniye süren seanslar halinde hazırlanmış ve her seansın ardından gönüllülere 1'er dakikalık dinlenme süresi tanınmıştır. Hazırlık aşamasında araç ve gereçler her bir gönüllü için kalibre edilmiş, deney prosedürü anlatılarak gönüllüler deney ve kendilerinden beklenen görevleri konusunda bilgilendirilmiştir.

El dış iskeleti aracılığıyla kontrol ettikleri sanal tutucuların pozisyonunun sanal objenin sınırları ile eşleşmesi durumunda yüksek performans ile pozisyon kontrolü gerçekleşmektedir. Bu durumda deneyin performans metriği, pozisyon hatası olarak belirlenmiştir. Deneylerden toplanan veriler, RMSE metodu kullanılarak analiz edilmiş ve çıkarımlar RMSE değerleri üzerinden yapılmıştır.

Deneyde gönüllülerden sanal parmakları sanal cismin sınırlarını aşmayacak şekilde kavramaları beklenmektedir. Şekil 4'te her üç duruma ait grafiklerde sanal cismin yarıçap

değişimi (siyah kesikli çizgiler), sanal parmakların hareketini temsil eden mavi, kırmızı ve yeşil çizgilerin dışında kaldığı anlara da yer verilmektedir. Bu anlar kavrama görevinin dışında yer aldığından hata hesaplamasına dahil edilmez.



Şekil 4. Üç numaralı gönüllünün gerçekleştirdiği 3. deney serisinden alınan sonuçlar. Kesikli siyah çizgiler sanal ortamdaki dairesel cismin yarıçap değişimini; mavi, kırmızı ve yeşil çizgilerse sırasıyla yalnızca görsel, görsel-acı veren ve görsel-kuvvet geri bildirimlerin kullanıldığı deneylerde denegin takip ettiği rotayı temsil etmektedir.

4 denekten alınan RMSE değerleri yalnızca görsel geri bildirim alınan deneylerle kıyaslandığında; görsel uyarılarla beraber verilen acı uyarılarının hata oranlarını sırasıyla 2, 7.7, 7.7, 3.9 kat, görsel uyarılarla beraber verilen kuvvet uyarıları hata oranlarını sırasıyla 1.7, 3.7, 2.9, 2.3 kat azalttığı gözlenmiştir. Özetle, yalnızca görsel geri bildirimle kıyasla acı veren ve görsel geri bildirimler yaklaşık 4 kat, dokunsal ve görsel bildirimler yaklaşık 2 kat daha hassas ve başarılı sonuçlar vermişlerdir.

Bu çalışmada zararsız acısal uyarımının başarı ve hassasiyet üzerindeki etkilerinin yanı sıra tepki süresi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Şekil 4'te ter alan 3. Gönüllüye ait sonuçlarda, deneyin her kademesinde farklı bir davranış sergilendiğini gözlemleyebiliriz. Sadece görsel geri bildirim olduğu deneyde denek değişimlere yaklaşık 1.75 sn. gecikmeli olarak cevap vermiş ve başlangıçtan takriben 10 saniye sonra geribildirim eksikliğinden dolayı tamamen takipten çıkmıştır. Görsel ve kuvvet geri bildirimlerinin beraber kullanıldığı deneyde denek yarıçap değişimlerine yaklaşık 1 sn. gecikmeli olarak ayak uydurabilmiştir. Yalnızca görsel geribildirim kullanıldığı deneyde kıyasla parmakların cismin içerisinde kalma süreleri kayda değer şekilde azalmış, her çap değişiminin ardından 2-3 sn. olan gecikmeler gözlenmiştir. Son olarak zararsız acısal ve görsel geri bildirimlerin beraber kullanıldığı deneyde denek, sanal parmakları deney süresi boyunca takriben 0.5 sn. gecikme ile cismin sınırlarından uzak tutmuş ve sınırlarla kesişme anlarında çok hızlı tepki vererek hatalardan kaçınmıştır. Başarılı olarak kabul edilen görsel ve kuvvet geri bildirimlerinin kullanıldığı deneydeki yaklaşık 2-3 sn. olan gecikmeye kıyasla anlık tepkiler elde edilmiş ve parmakların

cismin içerisinde kalmasının tamamen önüne geçilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Zararsız acısal uyarıların yeni nesil protezlerin kontrolünde başarı ve hassasiyeti artırması üzerine yaptığımız çalışmamızda, acı uyarılarının görsel ve kuvvet uyarılarına kıyasla daha başarılı ve hassas sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Tepki süreleri ele alındığında acı uyarılarının oluşturduğu anlık tepkiler; kıyaslandığı diğer iki farklı uyarı cinsine göre çok daha kısa tepki süreleri sağlamıştır.

Geliştirilen zararsız acısal uyarım cihazı, protez kullanan bireylere proteze adaptasyon sürecinde ve devamında önemli ölçüde kolaylıklar sağlayarak daha kaliteli bir yaşam sürmelerine olanak tanıyacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Biddiss EA, Chau TT. Upper limb prosthesis use and abandonment: A survey of the last 25 years. *Prosthet Orthot Int.* 2007;31:236–257.
- [2] S. Casini, M. Morvidoni, M. Bianchi, M. Catalano, G. Grioli and A. Bicchi, "Design and realization of the CUFF - clenching upper-limb force feedback wearable device for distributed mechano-tactile stimulation of normal and tangential skin forces," 2015 IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1186-1193.
- [3] C. Cipriani, M. D'Alonzo and M. C. Carrozza, "A Miniature Vibrotactile Sensory Substitution Device for Multifingered Hand Prosthetics", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 2, pp. 400-408, Feb. 2012.
- [4] M. D'Alonzo, S. Dosen, C. Cipriani and D. Farina, "HyVE—Hybrid Vibro-Electrotactile Stimulation—Is an Efficient Approach to Multi-Channel Sensory Feedback," in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 2, pp. 181-190, April-June 2014.
- [5] Nghiem B. T., Sando I. C., Gillespie R. B., McLaughlin B. L., Gerling G. J., Langhals N. B., et al. (2015). Providing a sense of touch to prosthetic hands. *Plast. Reconstr. Surg.* 135, 1652–1663.
- [6] del Valle, Navarro X. Interfaces with the peripheral nerve for the control of neuroprostheses. *Int Rev Neurobiol.* 2013;109:63–83.
- [7] Antfolk C, D'Alonzo M, Rosén B, Lundborg G, Sebelius F, Cipriani C. Sensory feedback in upper limb prosthetics. *Expert Rev Med Devices* 2013;10:45–54.
- [8] Antfolk C, D'Alonzo M, Controzzi M, et al. Artificial redirection of sensation from prosthetic fingers to the phantom hand map on transradial amputees: Vibrotactile versus mechanotactile sensory feedback. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2013;21:112–120.
- [9] Riillo, F. et al. "A Simple fMRI Compatible Robotic Stimulator to Study the Neural Mechanisms of Touch and Pain." *Annals of Biomedical Engineering* 44 (2016): 2431–2441. *PMC.* Web. 28 Aug. 2018.
- [10] Wager, T. D., L. Y. Atlas, M. A. Lindquist, M. Roy, C.-W. Woo, and E. Kross. An fMRI-based neurologic signature of physical pain. *N. Engl. J. Med.* 368:1388–1397, 2013.
- [11] Jepma, M., M. Jones, and T. D. Wager. The dynamics of pain: evidence for simultaneous site-specific habituation and site-nonspecific sensitization in thermal pain. *J. Pain* 15:734–746, 2014.
- [12] Saunders, Ian, and Sethu Vijayakumar. "The Role of Feed-Forward and Feedback Processes for Closed-Loop Prosthesis Control." *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 8 (2011): 60.
- [13] Stepp, Cara & Matsuoka, Yoky. (2010). Relative to direct haptic feedback, remote vibrotactile feedback improves but slows object manipulation. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.
- [14] P Oess, Ninja & Wanek, Johann & Curt, Armin. (2012). Design and evaluation of a low-cost instrumented glove for hand function assessment. *Journal of neuroengineering and rehabilitation.*
- [15] Battezzato, Alessandro. (2014). Towards an underactuated finger exoskeleton: An optimization process of a two-phalange device based on kinetostatic analysis. *Mechanism and Machine Theory.* 78.116–130.
- [16] Iqbal, J., Tsarakakis, N., Caldwell, D.G. Human hand compatible underactuated exoskeleton robotic system. 50. 494-496, 2014.