

Hücre Dışı Sinirsel Kayıtlarda Farklı Genlik Eşiklerinin Karşılaştırılması

Comparing Different Amplitude Thresholds in Extracellular Neural Recordings

Eda DAĞDEVİR

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
Erciyes Üniversitesi
Kayseri, Türkiye
edakaracaoglan@erciyes.edu.tr

Mehmet KOCATÜRK

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
mkocaturk@medipol.edu.tr

Murat OKATAN

Elektrik ve Enerji Bölümü
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Sivas, Türkiye
murat.okatan@cumhuriyet.edu.tr

Özetçe— Hücre dışı sinirsel kayıtlardan bilgi çıkarımında genlik eşikleri kullanılmaktadır. Genlik eşiği davranış değişkenlerinin sinirsel etkinlikte en yüksek işaret-gürültü oranıyla kodlanmasını sağlayacak şekilde kestirilebildiği gibi en yüksek olasılıkla de kestirilebilmektedir. Bu çalışmada bu iki eşik türü iyi öğrenilmiş bir görsel-motor görev sırasında iki sıçanın motor korteksinden (M1) kaydedilen hücre dışı kayıtlar kullanılarak kestirilmiştir ve kestirilen eşik değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar bu iki eşik türü arasında anlamlı bir fark bulunmadığını göstermektedir. Ayrıca en yüksek olasılıkla kestirilen eşik değerinin güven aralığının genişliğinin şifre çözüm doğruluğu ile ilintili olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar beyin-makine arayüzlerinde kullanılacak uygun genlik eşiklerinin belirlenmesi açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler — hesaplamalı sinir bilimi; aksiyon potansiyeli katari analizi; genel doğrusal modeller.

Abstract— Amplitude thresholds are used in extracting information from extracellular neural recordings. While the amplitude threshold may be estimated by ensuring that behavioral variables are encoded in neural activity with maximum signal-to-noise ratio, it can also be estimated by maximum likelihood. Here, these two types of threshold are estimated using extracellular recordings collected from the motor cortex (M1) of two rats performing a well-learned visuomotor task and the estimates are compared. The results show that these two types of threshold are not significantly different. On the other hand, the width of the confidence interval of the maximum likelihood estimate is found to be related to decoding accuracy. These results are important for determining appropriate amplitude thresholds to be used in brain-machine interfaces.

Keywords — computational neuroscience; spike train analysis; generalized linear models.

I. GİRİŞ

Hücre dışı sinirsel kayıtlar anestezi altında olmayan deneklerden davranış sırasında mikroelektrotlar kullanılarak kaydedilebilmektedir [1]. Bu tür kayıtlardan bilgi çıkarımlamak için yapılan ilk işlemlerden biri kaydın aksiyon potansiyellerini içeren bir bant aralığında süzülmesi ve

süzülmüş kaydın içerdiği aksiyon potansiyellerinin genlik eşikleme yoluyla belirlenmesi olagelmıştır [2]. Önceki bir çalışmada hücre dışı sinirsel kayıtlardan verimli bilgi çıkarımı için davranışla ilgili bilgilerin eşik üstü sinirsel etkinlikte en yüksek işaret gürültü oranıyla (EYİGO) kodlanmasını sağlayan eşiğin genlik eşiği olarak kullanılabilmesi önerilmiştir [3]. Şimdiki çalışmada bu eşik kısaca ‘EYİGO eşiği’ olarak adlandırılmaktadır. Eşik, rastlantısal olan davranış değişkenlerinin açıklanmasında kullanılması itibarıyla, davranışın olasılık modelinin bir parametresi olarak düşünülebilir. Olasılık modellerinin parametrelerinin kestiriminde ise en uygun yaklaşım en yüksek olasılıklı kestirimdir [4]. Dolayısıyla mevcut problemde genlik eşiği, davranış verilerinin bileşik olasılığını en yüksek değerine ulaştıran eşik değeri olarak da seçilebilir. Burada bu eşik kısaca ‘EYOK eşiği’ olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada EYİGO ve EYOK eşikleri iyi öğrenilmiş bir görsel-motor görev sırasında iki sıçanın motor korteksinden (M1) kaydedilen hücre dışı kayıtlar kullanılarak kestirilmiştir. EYOK eşiğinin %95’lik güven aralığının EYİGO eşiğini kapsama durumu incelenmiştir. Ayrıca EYİGO ve EYOK eşiklerinin kestirilen değerleri işaret ve Kruskal-Wallis sınamaları kullanılarak karşılaştırılmıştır. EYOK eşiklerinin %95’lik güven aralığının şifre çözüm doğruluğu ile ilintisi araştırılmıştır.

II. YÖNTEM

A. Veri

Önceki bir çalışmada görsel bir uyarana yanıt olarak ödül için sağ veya sol pedala bastıran iki sıçanın (MTCX38 ve MTCX41) sağ ve sol M1 korteks bölgelerine sekizer hücre dışı elektrot yerleştirilmiş ve bu elektrotlardan davranış sırasında kayıt alınmıştır. Hayvan deneyi yöntemleri Boğaziçi Üniversitesi Kurumsal Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır. Örneklem sıklığı 40 kHz’dir. Kayıtlar 400 Hz ve 8 kHz arasında 4. dereceden Butterworth süzgeciyle sayısal olarak süzülmüştür. Bir kayıt 82 (MTCX41), diğeri ise 30 denemeden oluşmaktadır. 82 denemeden oluşan kayıta denek bir denemede yanıt vermemiştir. Burada sunulan

incelemede bu kayıt için yanıt verilen 81 denemenin verisi kullanılmıştır. Diğer kayıt için ise 30 denemenin tümü kullanılmıştır. Her deneme denegin burnu ile bir fotodetektör ışını kesmesi sonucunda başlatılmaktadır. Deneme başladığında görsel bir uyarın doğru yanıtın sağ veya sol pedala basmak olduğu hakkında deneye bilgi vermektedir. Denek ön sağ veya ön sol patisiyle sağ veya sol pedala basarak yanıt vermektedir. Doğru yanıtlar yaklaşık 0.03 ml su ile ödüllendirilmektedir. Deneğin sağ veya sol pedala basması davranış değişkeni olarak kullanılmıştır. Deneme sayısı $1 \leq d \leq D$ ile gösterildiğinde denegin d 'inci denemedeki yanıtı $y[d]$ ile gösterilmektedir. d 'inci denemede sol pedala basıldıysa $y[d]=0$, sağ pedala basıldıysa $y[d]=1$ 'dir. D ise $y[d]$ 'nin boyutudur ve değeri burada MTCX41 için 81, diğer denek için ise 30'dur. Sinirsel etkinlik verisi olarak süzülmuş kayıta pedala basma anından t_1 s önce başlayıp t_2 s sonra biten zaman aralığında bulunan eşik üstü tepe sayısı kullanılmıştır. Artı (depolarizasyon) ve eksi (hiperpolarizasyon) yönündeki eşik üstü etkinlik ayrı ayrı incelenmiştir. Analizlerde t_1 anı -990 ms ve 1 s arasında, t_2 anı ise $-t_1+10^{-2}$ s ve 1 s arasında, 10'ar ms adımlarla değiştirilmiştir. Bir durumda $t_1=1$ s sınırının yeterli olmadığı anlaşıldığından dolayı üst sınır olarak 2.5 s değeri kullanılmıştır. İki durumda $t_2=1$ s sınırının yeterli olmadığı anlaşıldığından dolayı üst sınır olarak kullanılabilir en yüksek değer olan 1050 ms değeri kullanılmıştır. Her zaman aralığında eşik değeri, θ , 0'dan o aralıktaki en uç değere kadar 1 μ V adımlarla taranmıştır. Böylelikle eşik üstü etkinlik her bir $\xi = (t_1, t_2, \theta)$ üçlüsü için oluşturulmuştur. d 'inci denemedeki etkinlik depolarizasyon yönü için $s_{\xi}^{+}[d]$, hiperpolarizasyon yönü için ise $s_{\xi}^{-}[d]$ ile gösterilmektedir. Bunlar için birbirlerinden bağımsız ξ değerleri kullanılmıştır.

B. EYİGO eşığının belirlenmesi

EYİGO eşığı literatürde tanımlandığı şekilde hesaplanmıştır [3]. Denklem (1) ξ 'nin taranan tüm değerleri için hesaplanmıştır ve en yüksek $EYİGO_{\xi}$ değerini veren ξ belirlenmiştir. Bu değer bu çalışmada ξ_{eyigo} simgesiyle gösterilmektedir.

$$EYİGO_{\xi} = \frac{Var(E[Y_{\xi}|X])}{E[Var(Y_{\xi}|X)]} \quad (1)$$

Denklem (1)'de davranış değişkeni X , sinirsel etkinlik verisi ise Y_{ξ} ile gösterilmektedir. $E[\cdot]$, ortalamayı, $Var(\cdot)$ varyansı, $E[Y_{\xi}|X]$ ve $Var(Y_{\xi}|X)$ etkinliğin davranışa bağlı ortalamasını ve varyansını göstermektedir. Bu çalışmada X , y 'ye, Y_{ξ} ise s_{ξ}^{+} 'ya veya s_{ξ}^{-} 'ye denk gelmektedir. Buna göre Denklem (1) Denklem (2) olarak yazılabilir.

$$EYİGO_{\xi} = \frac{(\mu_{0,\xi} - \mu_{1,\xi})^2}{\sigma_{0,\xi}^2 + \sigma_{1,\xi}^2} \quad (2)$$

$i=0,1$ olmak üzere, Denklem (2)'de $\mu_{i,\xi}$ ve $\sigma_{i,\xi}^2$, $s_{\xi}[d]$ 'nin i ile temsil edilen pedala basılan denemelerdeki ortalaması ve varyansıdır. Eşik depolarizasyon yönünde hesaplandığında $s_{\xi}[d] = s_{\xi}^{+}[d]$, hiperpolarizasyon yönünde hesaplandığında ise $s_{\xi}[d] = s_{\xi}^{-}[d]$ olarak alınmaktadır.

C. EYOK eşığının belirlenmesi

Eşığın en yüksek olabirlikli değerinin belirlenmesi için davranış değişkeni y , s_{ξ} 'ye bağlı olarak tek değişkenli lojistik regresyon ile modellenmiştir. Modelin parametreleri MATLAB (MathWorks, Inc., ABD) yazılımının glmfit.m işlevi binom dağılımı ile kullanılarak kestirilmiştir. Modelin d sayılı denemede verdiği çıktı, $o_{\xi}[d]$, glmval.m işlevi logit bağlantı işlevi ile kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre davranış verilerinin bileşik olasılığı Denklem (3)'teki şekilde elde edilmiştir. Denklem (3) ξ 'nin bir işlevi olarak görüldüğünde ξ 'nin olabirlik işlevidir. Bu olabirlik ξ 'nin taranan tüm değerleri için hesaplanmıştır ve en yüksek olabirlikli ξ değeri (ξ_{eyok}) belirlenmiştir.

$$p(y|s_{\xi}) = \prod_{d=1}^D o_{\xi}[d]^{y[d]} (1 - o_{\xi}[d])^{(1-y[d])} \quad (5)$$

D. Olabirliğe dayalı güven aralığının belirlenmesi

EYOK eşığının %95'lik güven aralığı $2 \log \left\{ p(y|s_{\xi_{eyok}}) / p(y|s_{\xi}) \right\} \leq 7.8147$ eşitsizliğini sağlayan ξ değerlerinden elde edilmektedir. Burada 7.8147 değeri, serbestlik derecesi üç olan Ki Kare dağılımının %95'lik yüzdeliğinin değeridir [4].

E. Bootstrap güven aralığının belirlenmesi

Olabirliğe dayalı güven aralıklarının doğruluğu olabirlik eğrisinin tepe değeri civarında kuadratik bir yapıya sahip olduğu varsayımına dayanır. Bu varsayımın geçerliliği veri miktarı ile artar. Bu varsayımın geçerli olmadığı durumlarda ise güven aralığı bootstrap yöntemiyle daha doğru hesaplanır [4,5]. Bootstrap yönteminde, eldeki veri, istatistiksel anakütlenin bir modeli olarak kullanılmaktadır. Buna göre, eldeki veri, 'yerine koyarak örnekleme' yoluyla yeni örneklem üretmek için kullanılmaktadır. Örneğin i numaralı elektrotta hiperpolarizasyon yönünde elde edilmiş EYOK eşığı (EYOK_i-) $\hat{t}_{1,eyok}^{-}$ ve $\hat{t}_{2,eyok}^{-}$ değerleri ile belirlenen zaman aralığında bulunmuş olsun. d sayılı denemede bu zaman aralığındaki sinirsel etkinlik kaydı $k(d)$ ile gösterilsin. Bu durumda EYOK_i- eşığı $d=1:D$ için $(k(d), y(d))$ verilerinden elde edilmiş olmaktadır. Burada $d=1:D$ için $(k(d), y(d))$ verileri, örnekleme oluşturmaktadır. Bu örneklemin kaynağı olan istatistiksel anakütleden bir örneklem daha alınması, bootstrap yönteminde $d=1:D$ için $(k(d), y(d))$ verilerinden 'yerine koyarak örnekleme' yoluyla yapılmaktadır. Algoritma olarak ifade edildiğinde, 1 ve D arasında D adet tam sayı eşit olasılıkla rastgele olarak üretilmektedir. Bunlar r_1, r_2, \dots, r_D sayıları ile gösterilsin. Bu durumda $d=1:D$ için $(k(r_d), y(r_d))$ verileri bir bootstrap örnekleme oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, bootstrap örnekleme, herhangi bir deneme rastgele seçilerek o denemede $k(d)$ ve $y(d)$ verilerinin alınması ve bu işlemin D defa tekrarlanması ile oluşturulmaktadır. Bu bootstrap örnekleminde yeni bir EYOK_i- eşığı hesaplanmaktadır. N adet bootstrap örnekleminde N adet EYOK_i- değeri hesaplandığında, hesaplanan bu değerler, EYOK_i-'nin bootstrap dağılımını oluşturmaktadır. Bu çalışmada $N=10^6$ kullanılmıştır. EYOK_i-'nin %95'lik bootstrap güven aralığını elde etmek için bir sıklık eşığı belirlenmektedir ve bootstrap dağılımının bu eşığı aşan kısmının altında kalan alan hesaplanmaktadır. Bu alanı %95

veya %95'ten küçük en büyük değer yapan en küçük eşik bulunmaktadır. Elde edilen alan X ise eşik üstü aralıklar %100X'lik güven aralığı olarak belirlenmektedir.

F. Şifre çözümü

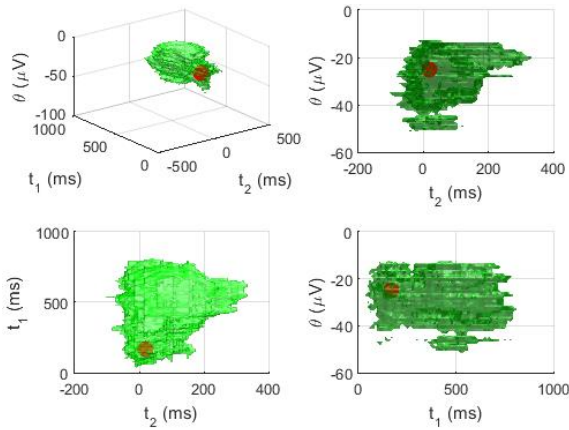
EYOK eşığı belirlendikten sonra davranışın şifre çözümü doğrudan doğruya lojistik regresyon çıktısının eşiklenmesi ile yapılmıştır. Modelin d sayılı denemede verdiği çıktı, $o_{\xi_{eyok}}[d]$, glmval.m işlevi logit bağlantı işlevi ile kullanılarak hesaplanmıştır. d sayılı denemede $o_{\xi_{eyok}}[d] > e$ ise modelin sağ pedala basıldığını, değilse sol pedala basıldığını gösterdiği kabul edilmiştir. Karar eşığı e , her elektrot için tüm denemeler arasından elde edilen en küçük çıktı ve en büyük çıktı değerlerinin arası eşit parçalara bölünerek 100 eşik değeri arasından en yüksek doğruluğu sağlayan değer olarak belirlenmiştir. ξ_{eyok} hesaplandıktan sonra bu işlem aynı veri üzerinde gerçekleştirilerek bu şifre çözücünün doğruluğu belirlenmiştir [6]. Bu veride EYOK ve EYİGO eşikleri kullanılarak yapılan şifre çözümü ile ilgili daha ayrıntılı sonuçlar bir başka çalışmamızda mevcuttur [7].

III. SONUÇLAR

Depolarizasyon ve hiperpolarizasyon yönündeki eşik üstü etkinlikler ayrı ayrı incelendiğinden ve iki denekten 16'şar elektrot ile hücre dışı sinirsel kayıtlar alındığından dolayı toplam 64 adet sinirsel etkinlik verisi (s_{ξ}) için EYİGO ve EYOK eşığı kestirilmiştir. Bu 64 durumun birinde $\hat{t}_{2,eyok}$ ve $\hat{t}_{2,eyigo}$ değerlerinin parametre uzayının sınırı olan 1050 ms değerinde çıktığı gözlenmiştir. Bu ise davranışla ilgili sinirsel etkinliğin bu durumda pedala basma anından 1.05 s'den sonra bitiyor olabileceğini düşündürdüğü için ve veride daha uzun süreli kayıt bulunmadığından dolayı bu durum geri kalan analizlerde dikkate alınmamıştır.

A. EYOK eşığının olabilirliğe dayalı %95'lik güven aralığının EYİGO eşığını kapsamaması

İncelenen 63 durumun 59'unda EYOK eşığının olabilirliğe dayalı %95'lik güven aralığının EYİGO eşığını kapsadığı bulunmuştur. Diğer bir deyişle bu iki eşik türü arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır ($P \geq 0.05$). Örnek olarak Şekil 1

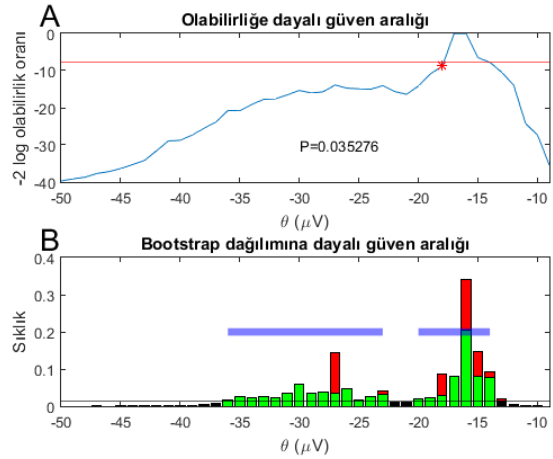


Şekil 1. EYOK eşığının olabilirliğe dayalı %95'lik güven aralığı (yeşil bölge) ve EYİGO eşığının (kırmızı nokta) bu aralık tarafından kapsanması.

MTCX41'in 0'ıncı elektrotundan hiperpolarizasyon yönünde elde edilen EYOK eşığının olabilirliğe dayalı %95'lik güven aralığını göstermektedir. EYİGO eşığının (kırmızı nokta) bu güven aralığı içinde bulunduğu görülmektedir. Kalan dört durumda olabilirlik eğrisinin tepe bölgesinde kuadratik bir yapıya sahip olmadığı görüldüğünden dolayı istatistiksel çıkarım bootstrap güven aralığı kullanılarak yapılmıştır.

B. EYOK eşığının %95'lik bootstrap güven aralığının EYİGO eşığını kapsamaması

Şekil 2A kalan dört durumdan birinin (MTCX38, elektrot 15, hiperpolarizasyon yönü) olabilirlik işlevini $t_1 = \hat{t}_{1,eyok}$, $t_2 = \hat{t}_{2,eyok}$ noktasında göstermektedir (mavi eğri). Yatay kırmızı çizgi -7.8147 düzeyini belirtmektedir. EYOK eşığının olabilirliğe dayalı %95'lik güven aralığı mavi eğrinin kırmızı çizgi üzerinde kalan kısmıdır. EYİGO eşığı bu durum için kırmızı çizginin hemen altında yer almaktadır (kırmızı *). Bu durumda olabilirlik oran sınamasına göre EYİGO ve EYOK eşikleri $P=0.035276$ anlamlılık düzeyi ile birbirlerinden farklıdır. Fakat olabilirlik eğrisi tepe bölgesinde tam olarak kuadratik sayılamayacağından dolayı EYİGO ve EYOK eşiklerinin birbirinden farksız olduğu hipotezi (sıfır hipotezi) güvenilir bir şekilde reddedilememektedir. Bu durumda EYOK eşığının bootstrap güven aralığı hesaplanarak sıfır hipotezinin reddi daha güvenilir bir şekilde yapılmalıdır. Şekil 2B bu durum için EYOK eşığının bootstrap dağılımını ve bu dağılımdan elde edilen %95'lik bootstrap güven aralığını (şeffaf mavi şeritler) göstermektedir. EYİGO eşığının bootstrap dağılımı ise kırmızı renkle gösterilmektedir. 0.01269 değerinden geçen yatay siyah çizgi %95'lik güven aralığını veren sıklık eşığı olarak belirlenmiştir. EYOK eşığının bootstrap dağılımının siyah çizginin altında kalan çubukları siyah renkle gösterilmiştir. EYOK eşığının bootstrap dağılımının siyah çizgiyi aşan kısmının altında kalan alan (yeşil renkli çubukların alanı) 0.945'dir. Dolayısıyla bu eşığı aşan aralıklar EYOK eşığının %94.5'lik bootstrap güven aralığını vermektedir. Güven aralığı şeffaf mavi şerit ile gösterilmiştir ve iki parçadan oluşmaktadır: [-36, -23] μV ve [-20, -14] μV . Şekil 2A'da EYİGO ve EYOK eşik değerleri -18 μV ve -16 μV 'tur. Şekil 2B'de görüldüğü üzere -18 μV değeri EYOK



Şekil 2. EYOK eşığının olabilirliğe ve bootstrap dağılımına dayalı %95'lik güven aralıkları ve EYİGO eşığının bootstrap güven aralığı tarafından kapsanması.

eşiğinin %95'lik bootstrap güven aralığı tarafından kapsanmaktadır. Diğer bir deyişle bu durumda EYİGO ve EYOK eşikleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. EYİGO eşiğinin bootstrap dağılımının ne kadarının EYOK eşiğinin %95'lik bootstrap güven aralığı içinde bulunduğu bakıldığında bu değer %96.4 olduğu bulunmuştur. Bu değer Şekil 2B'de EYOK eşiğinin %95'lik bootstrap güven aralığı tarafından kapsanan kırmızı çubukların altında kalan alandır. Bazı kırmızı çubuklar yeşil çubukların arkasında kaldığından dolayı görünmemektedir. Diğer üç durumda da EYOK eşiğinin %95'lik bootstrap güven aralığının EYİGO eşiğini kapsadığı bulunmuştur.

C. EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının genişliği

EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının genişliği güven aralığının θ ekseninde kapladığı uzunluk olarak belirlenmiştir. Güven aralığının iki veya daha fazla parçadan oluştuğu durumlarda parçaların toplam uzunluğu hesaplanmıştır.

İncelenen 63 durumda EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının genişliği denek (MTCX38 veya MTCX41), kortikal hemisfer (sağ veya sol) ve polarizasyon (depolarizasyon veya hiperpolarizasyon) değişkenlerine bağlı üç yönlü varyans analizi ile incelendiğinde sadece polarizasyona anlamlı bir bağımlılık tespit edilmiştir ($P < 0.01$). Hiperpolarizasyon yönündeki güven aralıklarının ortalama genişliği (\pm standart hata) $43.16 \pm 5.78 \mu V$ iken depolarizasyon yönündeki güven aralıklarının ortalama genişliği $89 \pm 15.52 \mu V$ olarak bulunmuştur. Bu incelemede Bölüm III-A'da belirtilen 59 durumda olabirliğe dayalı güven aralıkları, Bölüm III-B'de belirtilen dört durumda ise bootstrap güven aralıkları kullanılmıştır.

D. EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının genişliği ve şifre çözüm doğruluğu

İncelenen 63 durumda doğruluğun %100 olduğu durumlarda güven aralığının daha geniş olduğu bulunmuştur ($P < 6 \times 10^{-7}$). Bu durum depolarizasyon ($P < 5 \times 10^{-5}$) ve hiperpolarizasyon ($P < 0.005$) yönleri ayrı ayrı ele alındığında da görülmüştür. Bu karşılaştırmalar Kruskal-Wallis sınaması ile yapılmıştır. Doğruluğun %100 olduğu durumlarda güven aralığının genişliği ortalama $81.83 \pm 10.61 \mu V$ iken, doğruluğun %100'den küçük olduğu durumlarda güven aralığı ortalama $17.20 \pm 2.70 \mu V$ olarak gerçekleşmiştir.

E. EYOK ve EYİGO eşiklerinin işaret ve Kruskal-Wallis sınamaları ile karşılaştırılması

İncelenen 63 durumda EYOK ve EYİGO eşiklerinin kestirilen değerleri arasında işaret sınamasına ($P \geq 0.5$) ve Kruskal-Wallis sınamasına ($P \geq 0.6$) göre anlamlı bir fark bulunmamıştır.

IV. VARGILAR

Bu çalışmada literatürde ilk defa olarak EYOK ve EYİGO eşikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar bu eşiklerin gerçek verilerden kestirilen değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmadığını göstermiştir.

İncelenen 63 durumun dördünde EYOK eşiğinin olabirliğe dayalı %95'lik güven aralığının EYİGO eşiğini kapsamadığı bulunmuştur. Bu dört durumda EYOK eşiğinin

%95'lik bootstrap güven aralığı oluşturulmuştur ve EYİGO eşiğinin bu bootstrap güven aralığı tarafından kapsandığı bulunmuştur. EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının genişliğinin şifre çözüm doğruluğu ile ilintili olduğu bulunmuştur. Bu sonuç veride davranışla ilgili bol miktarda bilgi bulunduğu durumlarda birçok farklı eşik değerinin $P \geq 0.05$ düzeyinde birbirine denk olabirliğe sahip olacağını düşündürmektedir. Diğer bir deyişle bu tür verilerde genlik eşiği geniş bir aralıkta değiştirildiğinde bile beyin-makine ara yüzünün başarımının bundan çok fazla etkilenmeyeceği söylenebilir. Bununla birlikte davranış değişkeninin karmaşıklığı ve optimal eşik değeri arasında da bir ilinti olduğu göz ardı edilmemelidir [3]. Mevcut çalışmada olduğu gibi göreceli olarak basit bir davranış değişkeninin şifre çözümünde bazı elektrot ve polarizasyon durumlarında elde edilen EYOK eşiğinin güven aralığı geniş olabirirken yüksek uzamsal ve zamansal çözünürlüklü dinamik davranış değişkenlerinin şifre çözümünde güven aralıkları daha dar ve seçici olabilir. Dolayısıyla eşik optimizasyonunun eldeki şifre çözüm probleminde özgü olarak yapılması ve değerlendirilmesi gereklidir. Elde edilen bir diğer sonuç EYOK eşiğinin %95'lik güven aralığının hiperpolarizasyon durumunda daha dar olduğudur. Bu anlaşılabilir bir durumdur zira hiperpolarizasyon yönündeki dalgaların genliği mutlak değerde depolarizasyon yönündeki dalgaların genliğinden genellikle daha küçüktür.

Özetle, EYOK ve EYİGO eşiklerinin beyin-makine ara yüzlerinde benzer başarımla kullanılabilirliği görülmektedir. Ancak EYOK eşiği için olabirliğe dayalı güven aralığının hesaplanabiliyor olması istatistiksel çıkarım yapılmasına olanak sağlaması nedeniyle bu eşiği EYİGO eşiğine göre daha cazip kılmaktadır.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, 217E122 sayılı TÜBİTAK Projesi ile desteklenmiştir (yürütücü: M.O.). Bu çalışmada yer alan nümerik hesaplamaların bir kısmı TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Obien, M. E. J., Deligkaris, K., Bullmann, T., Bakkum, D. J., Frey, U. "Revealing neuronal function through microelectrode array recordings", *Front. Neurosci.* 9:423, 2015.
- [2] Lewicki, M. S. "A review of methods for spike sorting: the detection and classification of neural action potentials", *Network: Comput. Neural Syst.* 9 R53–R78, 1998.
- [3] Oby, E. R. Et al., "Extracellular voltage threshold settings can be tuned for optimal encoding of movement and stimulus parameters", *J Neural Eng.*, 13:036009, 2016.
- [4] Pawitan, Y., *In All Likelihood: Statistical Modelling and Inference Using Likelihood*, Oxford University Press:New York, 2001.
- [5] Efron, B., Tibshirani, R. J. *An Introduction to the Bootstrap*, CRC Press LLC, 1998.
- [6] Eusebi, P. "Diagnostic accuracy measures", *Cerebrovascular Diseases* 36:267–72, 2013.
- [7] Dağdevir, E., Kocaturk, M., Okatan, M. "Hücre Dışı Sinirsel Kayıtlarda Olabirliğe Dayalı Genlik Eşikleme", 27. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU), 2019, kabul edildi.