

# Hücre Dışı Sinirsel Kayıtlarda Olabilirliğe Dayalı Genlik Eşikleme

## Likelihood-Based Amplitude Thresholding 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 kayıtlarda genlik eşiklerinin optimizasyonu son zamanlarda beyin-makine arayüzü literatüründe etkin bir araştırma konusu haline gelmiştir. Önceki bir çalışmada, davranış değişkenlerinin sinirsel etkinlikte en yüksek işaret-gürültü oranıyla kodlanmasını sağlayan eşik genlik eşikliği olarak makul bir seçim olduğu önerilmiştir. Bir başka makul eşik adayı ise en yüksek olabilirlikle kestirilen eşik değeridir. Bu çalışmada bu iki eşik türü iyi öğrenilmiş bir görsel-motor görev sırasında iki sıçanın motor korteksinden (M1) kaydedilen hücre dışı kayıtlar kullanılarak kestirilmiştir. Kestirilen eşikler şifre çözücülerde kullanılarak başarımları karşılaştırılmıştır. İncelenen dört şifre çözücü arasından en iyi duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütlerine sahip olan yöntemin en yüksek olabilirlikle kestirilen eşikliği kullanan lojistik regresyon olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar beyin-makine arayüzlerinin verimliliğinin artırılması açısından önemlidir.

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

**Abstract**— Optimization of the amplitude threshold in extracellular neural recordings has recently become an active research topic in the brain-machine interface literature. In a previous study, the threshold that allows for the encoding of behavioral variables in neural activity with maximum signal-to-noise ratio has been proposed as a reasonable choice. Another good candidate, however, is the maximum likelihood estimate of the threshold. 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. The performance of the threshold estimates is assessed by using them in decoders. It is found that, among the four decoders examined, the method that has the best sensitivity, specificity and accuracy is logistic regression that uses the maximum likelihood estimate of the threshold. These results are important for improving the efficiency of brain-machine interfaces.

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

### I. GİRİŞ

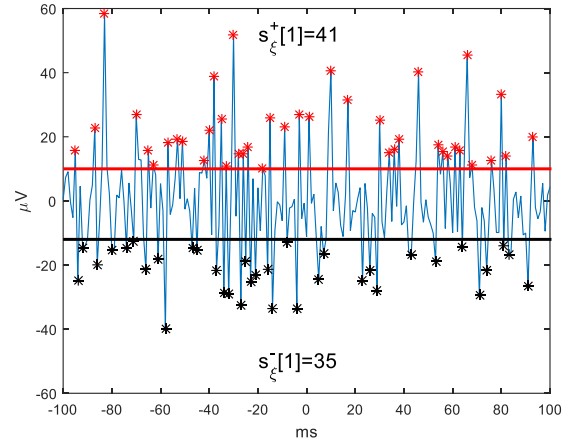
Hücre dışı sinirsel kayıtlar anestezi altında olmayan deneklerden davranış sırasında mikroelektrotlar kullanılarak kaydedilebilmektedir. İlk olarak 1957 yılında geliştirilmiş olan bu yöntem sayesinde davranışla ilgili bilgilerin sinir hücrelerinin bireysel ve toplu etkinliklerinde nasıl kodlandığı birçok beyin bölgesinde incelenebilmiştir [1, 2]. Bu tür kayıtlardan bilgi çıkarılmak için yapılan ilk işlemlerden biri kaydın aksiyon potansiyellerini içeren bir bant aralığında süzülmesi ve süzülmüş kaydın içerdiği aksiyon potansiyellerinin genlik eşikleme yoluyla belirlenmesi olagelmıştır [3]. Daha sonra eşik üstü dalga şekilleri sınıflandırılarak tekil sinir hücrelerinin ateşledikleri aksiyon potansiyeli katarları belirlenebilmektedir [4]. Aksiyon potansiyeli katarları davranış değişkenlerinin bir işlevi olarak modellendiğinde tekil sinir hücrelerinin ve bunların oluşturduğu işlevsel ağların etkinliğinde ne tür bilgiler kodlandığı anlaşılabilir [5]. Daha sonra bu etkinlik modelleri şifre çözücülerde kullanılarak sinirsel etkinlikten davranışla ilgili bilgiler çıkarılabilmektedir [6]. Bu işlem akışı kısaca beyin-makine arayüzlerinin (BMA) işleyişini açıklamaktadır. Hücre dışı sinirsel kayıtlardan tekil sinir hücrelerinin aksiyon potansiyeli katarlarının çıkarılması yüzlerce elektrot üzerinde gerçekleştirilmesi gereken örüntü tanıma ve sınıflandırma işlemleri yüzünden hesaplama yükü ağır olan bir işlemdir ve BMA uygulamalarında hız sınırlayıcı bir adımdır. Şifre çözümünün bu işlem adımlarından geçilmeden yapılıp yapılamayacağı son birkaç yıldır etkin bir araştırma konusu haline gelmiştir [6]. Genlik eşiklerinin optimizasyonu bu araştırma konusunun en önemli alt başlıklarından birisidir [7, 8]. 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 eşik genlik eşikliği olarak kullanılabilirliği önerilmiştir [8]. Şimdiki çalışmada bu eşik kısaca 'EYİGO eşikliği' olarak adlandırılmaktadır.

Eşik, rastlantısal olan davranış değişkenlerinin açıklanmasında kullanılması itibariyle, davranışın olasılık modelinin bir parametresi olarak düşünülebilir. Olasılık modellerinin parametrelerinin kestiriminde ise en uygun yaklaşım en yüksek olasılıklı kestirimdir [9]. 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. Kestirilen eşikler dört farklı şifre çözücüde kullanılarak başarımları karşılaştırılmıştır.

## 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 sekiz hücre dışı elektrot yerleştirilmiş ve bu elektrotlardan davranış sırasında kayıt alınmıştır. Hayvan deneyi yöntemleri Boğaziçi Üniversitesi Kurumsal Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır. Örnekleme sıklığı 40 kHz'dir. Kayıtlar 400 Hz ve 8 kHz arasında 4. dereceden Butterworth süzgeciyle sayısal olarak süzölmüştür. 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 deneğin  $d$ 'inci denemede 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 süzölmüş 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. Şekil 1, MTCX38'in sol hemisferindeki 0 numaralı elektrotta ilk denemede pedala basma anı (0 ms) sırasında  $t_1 = t_2 = 100$  ms aralığındaki eşik üstü tepe sayılarını  $10 \mu V$  (depolarizasyon) ve  $-12 \mu V$  (hiperpolarizasyon) değerindeki eşikler için göstermektedir. Şekil 2, MTCX41'in sağ hemisferine yerleştirilmiş sıfırdan saymaya başlayınca 7 numaralı elektrotta  $100 \mu V$  üzeri görülen depolarizasyon yönlü tepeleri  $t_1 = t_2 = 2$  s için göstermektedir. Şekil 2'ye göre, pedala basma ile ilgili sinirsel etkinlik pedala basma anına (0 s) göre yaklaşık  $\pm 1$  s içerisinde gerçekleşiyor gibi görüldüğünden dolayı analizlerde  $t_1$  anı  $-990$  ms ve 1 s arasında,  $t_2$  anı ise  $-t_1 + 10^{-2}$  s ve 1 s arasında,  $10^{-2}$  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



Şekil 1. Pedala basma anı sırasında bir denemede görülen eşik üstü sinirsel etkinlik.

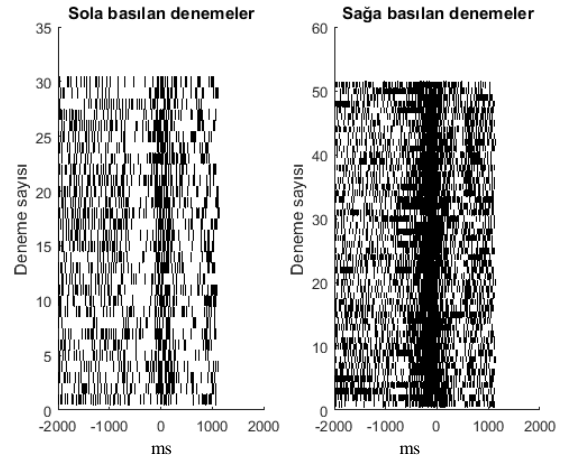
anlaşıldığından dolayı üst sınır olarak, kullanılacak en yüksek değer olan 1050 ms değeri kullanılmıştır. Her zaman aralığında eşik değeri,  $\theta$ , 0'dan o aralıktaki en uç değere kadar  $1 \mu V$  adımlarla taranmıştır. Böylelikle eşik üstü etkinlik (tepe sayısı) her bir  $\xi = (t_1, t_2, \theta)$  üçlüsü için oluşturulmuştur.  $d$ 'inci denemede etkinlik depolarizasyon yönü için  $s_{\xi}^+[d]$ , hiperpolarizasyon yönü için ise  $s_{\xi}^-[d]$  ile gösterilmektedir. Bunlar için birbirlerinden bağımsız  $\xi$  değerleri kullanılmıştır.

### B. EYİGO eşiğinin belirlenmesi

EYİGO eşiği literatürde tanımlandığı şekilde hesaplanmıştır [8]. Denklem (1)  $\xi$ 'nin taranan tüm değerleri için hesaplanmıştır ve en yüksek EYİGO $_{\xi}$  değerini veren  $\xi$  belirlenmiştir. Bu değer bu çalışmada  $\xi_{eyigo}$  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  $Y_{\xi}$  ile gösterilmektedir.  $E[\cdot]$ , ortalamayı,  $Var(\cdot)$  varyansı,  $E[Y_{\xi}|X]$  ve  $Var(Y_{\xi}|X)$  etkinliğin davranışa bağlı



Şekil 2. Pedala basma anı sırasında tüm denemelerde görülen eşik üstü sinirsel etkinlik.

ortalamasını ve varyansını göstermektedir. Bu çalışmada  $X$ ,  $y$ 'ye,  $Y_\xi$  ise  $s_\xi^+$ 'ya veya  $s_\xi^-$ '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 varyansdır. Eşik depolarizasyon yönünde hesaplandığında  $s_\xi[d] = s_\xi^+[d]$ , hiperpolarizasyon yönünde hesaplandığında ise  $s_\xi[d] = s_\xi^-[d]$  olarak alınmaktadır.

#### C. EYİGO eşiği ile normal dağılıma dayalı şifre çözümü

EYİGO eşiğinin hesaplanması sinirsel etkinliğin her yanıt durumunda bir ortalama ve bir standart sapma parametresi ile özetlenebileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayımına göre  $s_{\xi_{eyigo}}[d]$  ortalaması ve standart sapması  $y[d]$ 'ye bağlı olan normal dağılıma sahip bir rastlantısal değişkendir ve olasılık yoğunluğu Denklem (3) ile ifade edilebilir.

$$p(s_{\xi_{eyigo}}[d]) = \frac{1}{\sigma_{y[d],\xi_{eyigo}}} \varphi\left(\frac{s_{\xi_{eyigo}}[d] - \mu_{y[d],\xi_{eyigo}}}{\sigma_{y[d],\xi_{eyigo}}}\right) \quad (3)$$

Burada  $\varphi(\cdot)$  standart normal olasılık yoğunluk işlevidir. Buna göre  $\xi_{eyigo}$  kullanılarak gözlemlenen bir eşik üstü sinirsel etkinlik verisinin elde edildiği denemede hangi pedala basıldığı Denklem (3)'te  $y[d]$  yerine 0 veya 1 yazılarak ve her iki durumdaki olasılıklar karşılaştırılarak kestirilebilir:  $p(s_{\xi_{eyigo}}[d] | y[d] = 0) > p(s_{\xi_{eyigo}}[d] | y[d] = 1)$  ise  $d$  sayılı denemede sol pedala basıldığı, değilse sağ pedala basıldığı tahmin edilebilir.  $\xi_{eyigo}$  hesaplandıktan sonra bu işlem aynı veri üzerinde gerçekleştirilerek bu şifre çözücünün duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri belirlenmiştir [10].

#### D. EYİGO eşiği ve lojistik regresyonla şifre çözümü

Davranışın sinirsel etkinlikteki şifresinin çözümü için daha dolaysız bir yöntem pedala basma olasılığının lojistik regresyonla sinirsel etkinliğin bir işlevi olarak hesaplanması ve bu olasılığın eşiklenmesidir. Buna göre,  $y$ ,  $s_{\xi_{eyigo}}$ 'ya 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,  $o_{\xi_{eyigo}}[d]$ , glmval.m işlevi logit bağlantı işlevi ile kullanılarak hesaplanmıştır.  $o_{\xi_{eyigo}}[d] > e$  ise modelin sağ pedala basıldığını, değilse sol pedala basıldığını gösterdiği kabul edilmiştir. Karar eşiği  $e$ , 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 başarıyı sağlayan değer olarak belirlenmiştir. Başarım Denklem (4) ile ölçülmüştür ve mevcut analizde 'doğruluk' adlı ölçüte denktir [10].

$$B = 1 - \frac{\sum_{d=1}^D |t[d] - y[d]|}{D} \quad (4)$$

Burada  $t[d]$ , modelin tahmin ettiği yanıttır ve  $o_{\xi_{eyigo}}[d] > e$  eşitsizliğinin mantıksal karşılığıdır. Diğer bir deyişle,  $o_{\xi_{eyigo}}[d] > e$  ise  $t[d]=1$ 'dir.  $\xi_{eyigo}$  hesaplandıktan sonra bu işlem aynı veri üzerinde gerçekleştirilerek bu şifre çözücünün duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri belirlenmiştir.

#### E. EYOK eşiğinin belirlenmesi

Bölüm II-D'de açıklanan lojistik regresyon modeli genlik eşiğinin en yüksek olabilirlikle belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu yöntemde yanıt türü  $s_\xi$ 'ye bağlı olarak tek değişkenli lojistik regresyon ile modellenmiştir. Modelin parametreleri ve çıktısı Bölüm II-D'de açıklanan şekilde hesaplanmıştır. Modelin çıktısı  $o_\xi$  ile gösterildiğinde davranış verilerinin bileşik olasılığı Denklem (5)'teki şekilde elde edilmiştir. Denklem (5)  $\xi$ 'nin bir işlevi olarak görüldüğünde  $\xi$ 'nin olabilirlik işlevidir. Bu olabilirlik  $\xi$ 'nin taranan tüm değerleri için hesaplanmıştır ve en yüksek olabilirlikli  $\xi$  değeri ( $\xi_{eyok}$ ) belirlenmiştir.

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

#### F. EYOK eşiği ile şifre çözümü

EYOK eşiği belirlendikten sonra davranışın şifre çözümü doğrudan doğruya Bölüm II-D'de açıklandığı gibi 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 eşiği  $e$ , 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 başarıyı sağlayan değer olarak belirlenmiştir. Başarım Denklem (4) ile ölçülmüştür.  $\xi_{eyok}$  hesaplandıktan sonra bu işlem aynı veri üzerinde gerçekleştirilerek bu şifre çözücünün duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri belirlenmiştir.

#### G. EYOK eşiği ile normal dağılıma dayalı şifre çözümü

Bölüm II-C'deki şifre çözüm yönteminde  $\xi_{eyigo}$  yerine  $\xi_{eyok}$  da kullanılabilir. Buna göre  $p(s_{\xi_{eyok}}[d] | y[d] = 0) > p(s_{\xi_{eyok}}[d] | y[d] = 1)$  ise  $d$  sayılı denemede sol pedala basıldığı, değilse sağ pedala basıldığı tahmin edilebilir.  $\xi_{eyok}$  hesaplandıktan sonra bu işlem aynı veri üzerinde gerçekleştirilerek bu şifre çözücünün duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri belirlenmiştir.

### 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 ( $s_\xi$ ) için EYİGO ve EYOK eşiği 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 düşündüğü için ve veride daha uzun süreli kayıt bulunmadığından dolayı bu durum geri kalan analizlerde dikkate alınmamıştır. Geri kalan 63 durumun yedisinde Bölüm II-(C,G)'de yapılan normallik varsayımının geçerli olmadığı bulunmuştur ( $P<0.05$ ; Kolmogorov-Smirnov sınaması). Dolayısıyla duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri kalan 56 durum için incelenmiştir. Bu 56 durumun 27'si MTCX41 adlı denekten (14 hiperpolarizasyon; 13 depolarizasyon), 29'u ise MTCX38 adlı denekten (13 hiperpolarizasyon; 16 depolarizasyon) elde edilmiştir.

#### A. Duyarlılık, özgüllük ve doğruluk

56 durumun her biri için Bölüm II-(C,D,F,G)'de açıklanan şifre çözücülerin duyarlılık, özgüllük ve doğruluk ölçütleri belirlenmiştir [10]. Her yöntem için elde edilen 56 değerlerin ortalaması Tablo 1'de gösterilmektedir.

#### B. Farkların anlamlılığı

Tablo 1'de ortalama en yüksek duyarlılığa, özgüllüğe ve doğruluğa sahip olan şifre çözücünün EYOK eşliğini ve lojistik regresyonu kullandığı görülmektedir. Ayrıca tüm başarımların ölçütlerinde şifre çözücülerin yaklaşık olarak aynı sıralamaya sahip oldukları görülmektedir. Fakat şifre çözücüler arasında bu ölçütler açısından anlamlı bir fark bulunmamaktadır ( $P\geq 0.05$ ; Kruskal-Wallis sınaması). Bu durum şifre çözücülerin başarımları arasında bir fark olduğunu fakat bu farkın anlamlılık sınırına ulaşmadığını düşündürmektedir.

Şifre çözücülerin başarımları arasındaki fark sistematik olarak hangi şifre çözücünün en yüksek başarımları verdiği irdelenerek daha belirginleştirilebilir. Buna göre Tablo 1'deki sıralama kullanıldığında  $1\leq i\leq 4$  numaralı şifre çözücü  $1\leq j\leq 56$  numaralı durumda en yüksek duyarlılığa sahip ise  $du_j^i = 1$ , değilse  $du_j^i = 0$  değerini alan bir belirteç oluşturulmuştur. Benzer şekilde özgüllük ve doğruluk ölçütleri için de  $öz_j^i$  ve  $do_j^i$  belirteçleri oluşturulmuştur. Şifre çözücüler arasında bu belirteçler açısından anlamlı bir fark olup olmadığı Kruskal-Wallis sınaması ile belirlenmiştir. Örneğin  $du_{1:56}^1$ ,  $du_{1:56}^2$ ,  $du_{1:56}^3$ ,  $du_{1:56}^4$  verileri arasındaki fark Kruskal-Wallis sınaması ile incelenmiştir. Buna göre şifre çözücüler arasında en duyarlı olma sıklığı açısından anlamlı bir fark bulunmamaktadır ( $P\geq 0.05$ ). Bununla birlikte post hoc çoklu karşılaştırma yapıldığında 1 numaralı yöntemin 4 numaralı yöntemden daha fazla durumda en duyarlı şifre çözücü olduğu görülmüştür (53 duruma karşı 43 durum;  $P<0.04$ ). Öte yandan incelenen şifre çözücüler arasında özgüllük ( $P<0.05$ ) ve doğruluk ( $P<2\times 10^{-4}$ ) belirteçleri açısından anlamlı farklar bulunmaktadır. Post hoc çoklu karşılaştırma yapıldığında 1 numaralı yöntemin 4 numaralı yöntemden daha fazla durumda en özgül (51 duruma karşı 40 durum;  $P<0.04$ ) ve en doğru (53 duruma karşı 33 durum;  $P<2\times 10^{-4}$ ) şifre çözücü olduğu görülmüştür. Yine 1 numaralı yöntemin 3 numaralı yöntemden daha fazla durumda en doğru (53 duruma karşı 40 durum;  $P<0.025$ ) şifre çözücü olduğu görülmüştür.

#### IV. VARGILAR

Sonuçlar EYOK eşliğini ve lojistik regresyonu kullanan 1 numaralı şifre çözücünün ortalama en yüksek duyarlılığa, özgüllüğe ve doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir (Tablo 1). Bu şifre çözücünün her üç başarımlar ölçütünde de EYİGO

TABLO I. DUYARLILIK, ÖZGÜLLÜK, DOĞRULUK SONUÇLARI

	Şifre Çözücü	Ortalama Değerler		
		Duyarlılık	Özgüllük	Doğruluk
1	$\xi_{eyok}$ ve Lojistik R. (Böl. II-F)	<b>0.9896</b>	<b>0.9673</b>	<b>0.9786</b>
2	$\xi_{eyigo}$ ve Lojistik R. (Böl. II-D)	0.9793	0.9657	0.9733
3	$\xi_{eyok}$ ve Normal D. (Böl. II-G)	0.9739	0.9658	0.9695
4	$\xi_{eyigo}$ ve Normal D. (Böl. II-C)	0.9705	0.9624	0.9666

eşliğini ve normal dağılımı kullanan 4 numaralı şifre çözücünden anlamlı sayıda daha fazla durumda en iyi şifre çözücü olduğu bulunmuştur. EYOK eşliğini kullanan iki şifre çözücü arasında lojistik regresyonu kullanan 1 numaralı şifre çözücünün diğerine (3 numaralı şifre çözücü) göre anlamlı sayıda daha fazla durumda en doğru şifre çözücü olduğu bulunmuştur. Buna göre EYOK eşliği kullanıldığında şifre çözücüde lojistik regresyonun kullanılması normal dağılıma göre daha avantajlıdır. Öte yandan 1-2 ve 3-4 numaralı şifre çözücülerin başarımları arasında anlamlı bir fark bulunmaması EYİGO ve EYOK eşiklerinin şifre çözüm başarımlarına katkılarında anlamlı bir fark bulunmadığını göstermektedir.

#### BİLGİLENDİRME

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

#### KAYNAKLAR

- [1] Hubel, D. H. "Tungsten microelectrode for recording from single units", *Science*, 125(3247):549-50, 1957.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Rey, H. G., Pedreira, C., Quiroga R. Q. "Past, present and future of spike sorting techniques", *Brain Res. Bull.*, 119:106-117, 2015.
- [5] Brown, E. N., Barbieri, R., Eden, U., Frank, L. M. "Likelihood Methods for Neural Spike Train Data Analysis", in *Computational neuroscience: A comprehensive approach*, Ch9, Chapman & Hall/CRC Press, London, 2003.
- [6] Todorova, S. et al., "To sort or not to sort: the impact of spike-sorting on neural decoding performance", *J Neural Eng.*, 11:056005, 2014.
- [7] Christie, B. P. et al., "Comparison of spike sorting and thresholding of voltage waveforms for intracortical brain-machine interface performance", *J. Neural. Eng.*, 12:016009, 2015.
- [8] 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.
- [9] Pawitan, Y., *In All Likelihood: Statistical Modelling and Inference Using Likelihood*, Oxford University Press:New York, 2001.
- [10] Eusebi, P. "Diagnostic accuracy measures", *Cerebrovascular Diseases* 36:267-72, 2013.