

VESTİBÜLER SİSTEM BOZUKLUKLARININ TSALLIS ENTROPİSİ TABANLI TANISINDA TEK AYAK BASINÇ VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNİN DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

(The Effect of Evaluating Single Foot Pressure Data on Accuracy in the Diagnosis of Vestibular System Disorders Based on Tsallis Entropy)

Serhat İkizoğlu^{1,*}, Harun Yaşar Köse²

^{1*} Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi (İYYÜ), İstanbul, Türkiye.
serhat.ikizoglu@yeniuyuzyl.edu.tr
(Department of Biomedical Engineering, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzyl University, Istanbul, Turkey)

² Mekatronik Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İstanbul, Türkiye. kose21@itu.edu.tr
(Mechatronics Engineering Graduate Program, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 13 Ağustos 2025 Kabul Tarihi: 24 Kasım 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026
(Received: 13 August 2025 Accepted: 24 November 2025 Published: February 2026)

Araştırma Makalesi
(Research Paper)

ÖZET

Vestibüler sistem (VS), bireyin denge ve hareket kontrolünde temel bir rol oynamaktadır. Bu sistemdeki bozukluklar, bireyin yaşam kalitesi ve bağımsızlığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu çalışmada, yürüyüş sırasında ayak tabanına yerleştirilen kuvvet algılayıcılarından elde edilen işaretlerden üretilen Tsallis entropisi (TE) tabanlı özelliklerin, VS bozukluklarının tespiti açısından tamsal gücü araştırılmıştır. Karmaşık biyolojik sinyallerin analizinde etkili bir araç olan TE, bu çalışmada $q = 0,82$ parametresiyle uygulanmıştır. Her adım döngüsünden elde edilen trendden arındırılmış kuvvet sinyallerinden sağ ve sol ayak için sekizer, iki ayağın birleşik analizi için on altı özellik üretilmiştir. Önceki çalışmamızda her iki ayak verilerinin birleşik analizi üzerinden %95 doğrulukla (Eğri altı alan $AUC = 0,989$) tam koyabilen Gauss çekirdekli destek vektör makinesi (SVM) modeli, bu çalışmada hiper-parametreleri sabit tutularak yalnızca sağ ayak ve yalnızca sol ayak verisi şeklinde ilave iki farklı senaryoda yeniden eğitilmiştir. Otuz hasta ve otuz sağlıklı gönüllüden oluşan örnekte, 10 katlı çapraz doğrulama ile yapılan değerlendirmede sağ ayak verisiyle %91,67 ($AUC = 0,902$), sol ayak verisi ile ise %93,33 ($AUC = 0,962$) oranında doğruluk elde edilmiştir. Sol ve sağ ayak verilerinin az da olsa farklı doğruluk sunması, VS bozukluklarına eşlik edebilecek unilateral adaptasyonların tamsal değeri olabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. Bu çalışma, kısa süreli yürüyüş verilerinden dahi yüksek doğrulukla tanı yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Düşük maliyetli ve taşınabilir sensörlerle uygulanabilirliği sayesinde, TE tabanlı bu yöntemin vestibüler sistem bozukluklarının hızlı ve güvenilir tanısında klinik kullanıma uygun güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: vestibüler sistem, yürüyüş analizi, Tsallis entropisi, özellik çıkarımı

ABSTRACT

The vestibular system (VS) plays a fundamental role in an individual's balance and movement control. Disorders in this system can significantly impact an individual's quality of life and independence. This study investigated the diagnostic power of Tsallis entropy (TE)-based features generated from signals obtained from force sensors placed on the soles of the feet during walking in detecting VS disorders. TE, an effective tool for analyzing complex biological signals, was applied in this study for a q -parameter of $q=0.82$. Eight features were derived for the right and left feet from the detrended force signals obtained from each step cycle, and sixteen features were derived for joint analysis of both feet. In our previous study, a Gaussian kernel support vector machine (SVM) model, which achieved 95% accuracy ($AUC=0.989$) for joint analysis of both feet, was retrained in this study using only the right foot and only the left foot data, keeping the hyper-parameters constant. In a sample of 30 patients and 30 healthy volunteers, 10-fold cross-validation yielded 91.67% accuracy ($AUC=0.902$) with right foot data and 93.33% ($AUC=0.962$) with left foot data. The slight difference in accuracy between left and right foot data suggests that unilateral adaptations that may accompany VS disorders may have diagnostic value. This study demonstrates that high accuracy can be achieved even from short-term gait data in detecting VS dysfunction. Its applicability with low-cost and portable sensors makes this TE-based method a strong candidate for clinical use in the rapid and reliable diagnosis of vestibular system disorders.

Keywords: vestibular system, gait analysis, Tsallis entropy, feature extraction

1. GİRİŞ

Vestibüler sistem (VS), merkezi sinir sistemine başın uzamsal konumu, mekânsal yönelimi ve hareketi hakkında sürekli bilgi sağlayarak postüral denge ve stabilitenin korunmasında kilit rol oynar [1]. Ancak, vestibüler bozuklukların tanısı klinik uygulamalarda hâlâ sınırlı yer bulmakta ve bu

alan araştırma gereksinimini sürdürmektedir [1].

Mevcut klinik standartlardan biri olan bilgisayarlı dinamik postürografi (CDP), VS'nin çeşitli bileşenlerini nicel olarak değerlendirebilse de, yüksek maliyeti, uzun uygulama süresi ve geniş fiziksel alan gereksinimi nedeniyle rutin klinik kullanımı kısıtlıdır [2]. Bu durum daha taşınabilir,

düşük maliyetli ve hızlı uygulanabilir değerlendirme yöntemlerine olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Son yıllarda, yürüyüş verilerinden (gait data) öznelik çıkarımı yapılarak makine öğrenmesi (ML) yöntemleriyle sınıflandırma gerçekleştirilmesi, CDP'ye pratik ve erişilebilir bir alternatif olarak öne çıkmıştır [3, 4]. Yürüyüş analizi yalnızca vestibüler bozukluklarda değil, aynı zamanda Parkinson, Huntington ve ALS gibi nörodejeneratif hastalıkların objektif değerlendirilmesinde de etkin bir araç olarak kullanılmaktadır [5–7].

Karmaşık biyolojik sistemlerde gözlenen doğrusal olmayan ve uzun menzilli bağımlılıkları yakalama kapasitesiyle öne çıkan Tsallis entropisi (TE), yürüyüş gibi doğal olarak gözlenen zaman serilerinden anlamlı bilgiler çıkarmak için uygun bir yaklaşım sunmaktadır [8–10]. TE, EEG, kalp atım aralığı ve benzeri fizyolojik sinyallere uygulandığında, çeşitli patolojik durumların göstergesi olarak başarılı sonuçlar verdiği çalışmalarla desteklenmiştir [11].

Önceki bir araştırmamızda, taban içi kuvvet algılayıcılarından elde edilen verilerin TE tabanlı analizi sayesinde VS bozukluğu olan bireyler %88,3 doğrulukla sınıflandırılmıştır [12]. Yöntemin daha geniş bir veri kümesine uygulanmasıyla bir sonraki çalışmada doğruluk oranı %95'e yükselmiştir [13].

Dikkat çeken bir husus, mevcut literatürde sağ ve sol ayakta elde edilen verilerin çoğunlukla birleşik olarak analiz edilmiştir; vestibüler sistemin olası asimetrik yapısı çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Oysa VS'nin unilateral lezyonlar ya da asimetrik dejenerasyonlar sergileyebileceği klinik olarak bilinmektedir. Bu nedenle tek ayak-altı kuvvet verisi bazı analizlerin tanısal sürece ek katkı sunabileceği düşünülmektedir.

Bu bağlamda yürütülen mevcut çalışmada, sağ ve sol ayakta ayrı ayrı elde edilen TE tabanlı öznelik setlerinin tam gücü karşılaştırmalı olarak analiz edilmekte, ayrıca bu iki veri kümesinin birleştirilmesiyle oluşturulan referans modelle olan ilişkisi değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, vestibüler fonksiyon bozukluklarının erken tanısında ayak altı kuvvet bazı analizlerin potansiyel katkısını incelemeyi ve kişiye özgü rehabilitasyon stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Odyoloji Kliniği ile sürdürülen geniş kapsamlı bir projenin [14–16] devamı olup, literatüre klinikte uygulanabilir nitelikte yeni bir değerlendirme yöntemi kazandırmayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL VE METOT

Entropi, genellikle dinamik sistemlerdeki düzensizlik düzeyini nicel olarak ifade etmek için kullanılan temel bir ölçüttür. Klasik Boltzmann-Gibbs istatistiksel mekanikine dayanan Shannon entropisi (SE), kısa vadeli bağıntılarla tanımlanan sistemlerin analizinde etkili olsa da, uzun menzilli etkileşimlerin baskın olduğu yapılar karşısında yetersiz kalmaktadır [8]. Bu tür sistemlerin incelenmesinde alternatif bir yaklaşım olarak önerilen Tsallis entropisi (TE), zaman serisi verilerinde gömülü olan karmaşık ve doğrusal olmayan yapıları ortaya çıkarmada güçlü bir araç sunmaktadır [9].

Tsallis entropisi yalnızca teorik fizikte değil, biyomedikal araştırmalar başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde artan bir ilgiyle kullanılmaktadır. Özellikle biyolojik sistemlerin dinamiklerini anlamaya yönelik çalışmalarda TE'nin temel avantajı, bu sistemlerde yaygın olarak gözlenen doğrusal olmayan yapıların ve uzun menzilli bağımlılıkların etkili biçimde yakalanabilmesidir [10].

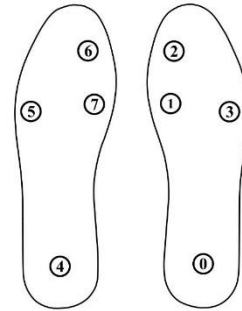
$$TE = \frac{1}{q-1} \left(1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right) \quad (1)$$

Tsallis entropisi ifadesinde (denklem (1)) p_i i 'inci olayın olasılık değerini, q ise sistemin eklenti-olmayan (non-extensive) yapısını denetleyen parametreyi temsil eder. $q > 1$ durumunda düşük olasılıklı olaylar, $q < 1$ durumunda ise yüksek olasılıklı olaylar vurgulanır [16]; $q = 1$ için, Tsallis entropisi Shannon entropisine indirgenir. q değeri belirli kriterlere göre değil, fakat analiz edilen veri kümesinin özelliklerine göre belirlenmektedir [17]. q 'nin değerini ayarlayarak, analiz edilen veri setinde bulunan belirli özellikler yakalanabilir.

2.1 Verilerin Toplanması

Bu çalışmada, araştırma ekibinin daha önce yürüttüğü bir projede elde edilen mevcut veri seti kullanılmıştır [14]. Ayak tabanında yer alan dört ana ağırlık dağılım noktası, önceki çalışmaları ve uzman odyologların görüşleri doğrultusunda belirlenmiş, bu noktalara kuvvet algılayıcıları yerleştirilmiştir [18, 19].

Yürüyüş sırasındaki plantar basınç ölçümleri için FSR402 (Interlink) tipi kuvvet algılayıcıları tercih edilmiştir [20]. FSR402–short tail modelinin klinik uygulamalara uygunluğu, saha kullanımında yaygın kabul görmesi, ince form faktörü ($\phi_{\text{pad}} = 18,3$ mm; kalınlık = 0,46 mm) ve < 3 μs yükselme süresi gibi teknik avantajlarına dayanmaktadır [21]. Tabanlık üzerine yerleştirilen sekiz sensör, S0–S7 şeklinde numaralandırılmış ve Şekil 1'de gösterildiği şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 1: Alglayıcıların S0'dan S7'ye numaralandırılması [12].

Veri toplama işlemi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Odyoloji Kliniği'nde, Helsinki Bildirgesi'ne uygun etik standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde Üniversite Etik Kurulu'nun onayı alınmış ve tüm katılımcılardan bilgilendirilmiş onam formları temin edilmiştir. Katılımcıların doğal yürüyüş paternini korumak amacıyla ölçümler hafta sonları yapılmış, 30 VS hastası ve 30 sağlıklı olmak üzere toplam 60 gönüllü birey, 12 metrelik bir parkurda yürütülerek veri toplanmıştır.

Katılımcı konforunu artırmak ve veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla beş farklı ayak numarası için (EU 36–44) tabanlık prototipleri üretilmiş ve her bireye yürüyüş öncesinde uygun boyutta tabanlık giydirilmiştir.

2.2 Verilerin İşlenmesi

Sonuçların daha sağlıklı değerlendirilebilmesi adına, öznelik çıkarımından önce ham veriler çok aşamalı bir ön işleme sürecinden geçirilmiştir. Bu süreç altı temel adımdan oluşmaktadır:

2.2.1. Analize Uygun Zaman Aralıklarının Belirlenmesi

İlk olarak, yürüyüşün gerçekleşmediği ya da analiz açısından anlamlı bilgi içermeyen kısımlar veri setlerinden çıkarılmıştır. Ardından, her bireyin sekiz farklı algılayıcısından elde edilen veriler, bireyler arası karşılaştırmaya olanak tanıyacak şekilde 0 ile 1 aralığında normalize edilmiştir. Bu adım, örüntü farklılıklarının gözlemlenebilmesini kolaylaştırmak amacıyla uygulanmıştır.

2.2.2. Adım Verilerinin Tespiti

Her iki ayağa ait sensör verileri gruplanarak, ayağın yere temas etmeye başladığı ve teması sonlandırdığı zaman noktaları belirlenmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak adım süreleri ve temas zamanları gibi yürüyüş dinamiklerine ilişkin temel özellikler elde edilmiştir.

2.2.3. Zaman Çözünürlüğünün Artırılması

Önceki adımda belirlenen, ayağın yer ile temas etmediği kısımlar veri setinden çıkarılmıştır. Kalan sinyallerin zamansal çözünürlüğü artırmak amacıyla, veriler 20 kat daha sık örneklendirilmiştir. Böylece histogramlara düşen örnek sayısı artırılmış, bu da olasılık dağılımlarının istatistiksel açıdan daha anlamlı şekilde oluşturulmasını sağlamıştır.

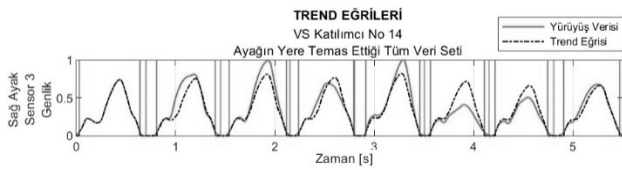
Bu aşamada sinyalin yapısını ve taşıdığı bilginin doğruluğunu korumak kritik önemdedir. Bu nedenle doğrusal interpolasyon yerine, türev sürekliliğini sağlayan kübik Hermite interpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, gerek sinyalin lokal değişimlerine daha hassas

yanıt vermekte gerekse zarf bütünlüğünü koruyarak analiz için daha güvenilir bir temel sunmaktadır [22].

Son olarak, ileride hesaplanacak olan trendden (eğilimden) arındırılmış sinyallerin ve entropi değerlerinin bireyler arasında kıyaslanabilir olması adına, her birey için sekiz algılayıcıya ait sinyaller ayrı ayrı yeniden normalize edilmiş ve 0–1 aralığına ölçeklenmiştir.

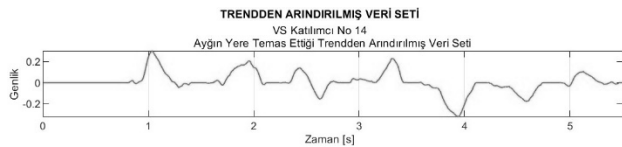
2.2.4. Verilerin Trend Bileşeninden Arındırılması

Her sensörün adım döngüsü içerisinde aktif olarak veri sağladığı zaman aralıkları belirlenmiştir. Bu aralıklar temel alınarak, bireye özgü trend bileşenleri, ağırlıklı ortalamalara dayalı bir algoritma yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen bu trend eğrisi, adım süresince sensör tarafından kaydedilen anlık değerlerle karşılaştırılmıştır. Böylece, her zaman noktasında ölçülen değerden aynı ana karşılık gelen trend değeri çıkarılmış ve sinyalin düşük frekanslı bileşeni elimine edilmiştir. Bu işlem sonucunda, yürüyüşün anlık özelliklerini yansıtan ve genel eğilimden arındırılmış yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu süreçle ilişkin örnek bir görselleştirme, Şekil 2 ve Şekil 3'te, örnek bir katılımcıya ait S3 sensörü üzerinden sunulmaktadır.



Şekil 2: Trend eğrilerinin oluşturulması [12].

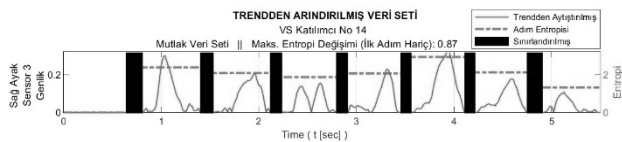
Şekil 2'de kırmızı dikey çizgiler, ayağın yere temas etmeye başladığı ve bu temasın sonlandığı zaman noktalarını göstermektedir. Mavi dikey çizgiler ise, ilgili sensörün aktif veri ürettiği zaman aralığının başlangıcı ve bitişini temsil etmektedir.



Şekil 3: Trendden arındırılmış veri [12].

2.2.5. Tsallis Entropi Hesaplamaları

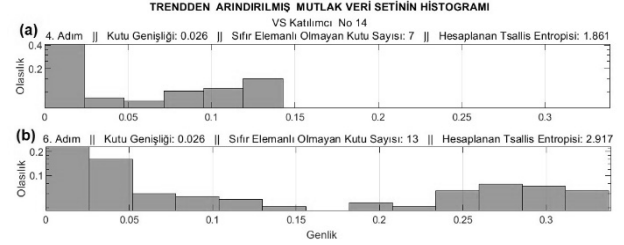
Trend bileşeninden arındırılan sinyaller, bireyin yürüme davranışı etrafında oluşan lokal dalgalanmaları temsil etmektedir. Bu dalgalanmalar hem pozitif hem de negatif yönde gerçekleşebilmekte olup, analizde esas alınan öznelik bu sınımların büyüklüğüdür. Dolayısıyla, işaretlerinden bağımsız olarak aynı genlikteki sapmaları aynı sınıfta değerlendirmek amacıyla, sinyallerin mutlak değerleri kullanılmıştır. Böylece, trend etrafındaki toplam sapma miktarı tekil bir dağılım olarak ifade edilebilmiştir. Bu yaklaşım Şekil 4'te görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4: Trendden arındırılmış verilerin mutlak değer dönüşümü ve sensörün veri üretmediği bölümlerin hariç tutulması (siyah çubuklar ile gösterilmiştir) [12].

Histogram tabanlı dağılım elde edilirken, veri çözünürlüğünü yeterli düzeyde tutmak adına en fazla 25 kutu (bin) kullanılmıştır. Her bir histogram kutusunun genişliği, mutlak değer dönüşümünden elde edilen verinin maksimum değeri esas alınarak belirlenmiş ve toplam aralık kutu sayısına bölünerek hesaplanmıştır. Bu işlemin çıktıları, Şekil 5(a)'da örnek bir hastaya ait dördüncü adım için, Şekil 5(b)'de ise aynı bireyin altıncı adımı için sunulmuştur.

Entropi hesaplamalarında kullanılan Tsallis entropi parametresi q farklı değer aralıkları üzerinden sistematik olarak değerlendirilmiş ve sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik analiz sonucunda $q = 0,82$ değeri, öznelik çıkarımı açısından en yüksek ayırt edici gücü sağlayan konfigürasyon olarak önceki çalışmamızda belirlenmiştir [13].



Şekil 5: (a) Örnek hasta bireyin 4. adımına ilişkin mutlak veri histogramı, (b) Aynı bireyin 6. adımına ilişkin dağılım [12].

2.2.6. Öznelik Çıkarımı

Bu aşamada amaç her adıma karşılık gelen Tsallis entropi değerlerinden yürüyüşün kalitesi hakkında anlamlı öznelikler türetmektir. Trendden arındırılmış sinyaller dikkate alındığında sağlıklı bireylerin yürüyüşlerine ait adımların entropi değerlerinin genellikle sıfıra yakın, yani düşük dalgalanmalı olması beklenir. Buna karşın patolojik yürüyüşlerde bu değerler daha yüksek sapmalar gösterebilir. Bu varsayımdan yola çıkılarak her adımın entropi değerinin sıfıra olan uzaklığı temelinde bir öznelik tanımlanmıştır.

Her birey için adım bazında hesaplanan Tsallis entropi değerleri (2) ifadesi ile tanımlanabilir.

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, \quad e_j \in \mathbb{R}; j \in \mathbb{Z}^+ \quad (2)$$

Burada e_j , j 'inci adıma ait Tsallis entropi değerini, m ise toplam adım sayısını göstermektedir. Sapma miktarını daha anlamlı şekilde ölçülebilmek adına, bu küme negatif elemanları da içerecek şekilde genişletilmiş ve simetrik bir dağılım elde edilmiştir:

$$E' = \{e_1, e_2, \dots, e_m, -e_1, -e_2, \dots, -e_m\} = \{t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{2n}\} \quad (3)$$

Bu genişletilmiş küme üzerinden hesaplanan standart sapma, her adıma ait entropi değerlerinin sıfıra olan ortalama uzaklığını yansıtan bir öznelik olarak değerlendirilmiştir. Standart sapma (4) eşitliği ile formüle edilmiştir:

$$\sigma(E') = \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^{2m} (t_i - \mu)^2} \quad (4)$$

Burada μ , E' kümesinin ortalama değerini göstermektedir.

Bu öznelik çıkarım süreci sonucunda elde edilen değerler, farklı sınıflandırma algoritmaları ile değerlendirilmiştir. MATLAB ortamında yer alan Classification Learner Tool kullanılarak çeşitli denemeler gerçekleştirilmiş; Destek Vektör Makineleri (SVM), Yapay Sinir Ağları (NN) ve Karar Ağaçları (DT) gibi yöntemlerin, sınıflar arasında en yüksek ayırt edici güce sahip modelleri sunduğu gözlemlenmiştir.

3. SONUÇLAR

Önceki çalışmamızda, Gauss çekirdek fonksiyonuna sahip destek vektör makineleri (SVM) kullanılarak sağ ve sol ayak verilerinin birlikte değerlendirildiği birleşik veri kümesi üzerinde %95,00 doğruluk oranına ulaşılmıştır [13]. Bu çalışmada, aynı hiper-parametreler korunarak model üç farklı senaryo üzerinde yeniden eğitilmiş ve değerlendirilmiştir:

- Yalnızca sağ ayak sensör verileri (8 öznelik)
- Yalnızca sol ayak sensör verileri (8 öznelik)

- Birleşik veri seti (16 öznitelik) – referans model

Tüm modeller, 10 katlı çapraz doğrulama (10-fold cross-validation) yöntemiyle eğitilmiş ve değerlendirmeye alınmıştır. Elde edilen sınıflandırma performans metrikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Gauss çekirdekli SVM modellerine ait performans ölçütleri.

Veri Kümesi	Doğruluk (%)	AUC	Duyarlılık (%)	Seçicilik (%)
Sağ Ayak	91,67	0,902	86,67	96,67
Sol Ayak	93,33	0,962	90,00	96,67
Birleşik (Sağ+Sol)	95,00	0,989	96,67	93,33

Elde edilen sonuçlar, yalnızca tek ayak verileriyle dahi yüksek sınıflandırma başarımı (%92–93 oranında doğruluk) sağlanabildiğini göstermektedir. Sağ ve sol ayak verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan referans model, önceki çalışmada raporlanan %95,00 doğruluk düzeyini bu çalışmada da doğrulamıştır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, [13] referans numaralı yayımlarımızda %95 doğrulukla en başarılı model olarak belirlenen Gauss çekirdekli destek vektör makineleri (SVM) algoritması, hiper-parametre ayarları korunarak yalnızca sağ ayak, yalnızca sol ayak ve birleşik veri kümeleri üzerinde yeniden eğitilmiştir. Bu yaklaşım, modelin farklı alt gruplar üzerinde de yüksek doğruluk düzeyini koruyarak çalışabilmesi sayesinde yöntemin bir anlamda genelleştirilebilir olduğunu değerlendirme imkânı sunmuştur. Tek ayak kuvvet verisi temelli öznitelik kümeleriyle dahi %90–93 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Böylece, yöntemin duyarlılığı ve kararlılığı önceki çalışmalarımızdaki bulgularla karşılaştırılabilir olarak pekiştirilmiştir.

Sol ayak verilerinin, sağ ayağa kıyasla yaklaşık %1,7 daha yüksek doğruluk sunduğu belirlenmiştir; bu durumun vestibüler sistem bozukluklarında sıkça rastlanan unilateral adaptasyon mekanizmaları ya da yük dağılımı farklılıkları nedeniyle gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Bu tür asimetrik, geleneksel analizlerde genellikle her iki ayak verisinin tek blok hâlinde değerlendirilmesi nedeniyle gözden kaçabilmektedir.

Kapsamlı denge analiz platformlarının (CDP) yüksek maliyetli ve zaman alıcı yapısı göz önünde bulundurulduğunda, yalnızca kısa süreli yürüyüş kayıtlarıyla %95 doğruluk seviyelerine ulaşabilen bu yöntemin, taşınabilir ve düşük maliyetli bir değerlendirme aracı olarak klinik uygulamalara entegre edilmesi gerçekçi görünmektedir. Tsallis entropisine dayalı öznitelikler, yürüyüş sinyallerindeki doğrusal olmayan karmaşık yapıları ortaya koyma kapasitesi sayesinde özellikle erken evre vestibüler disfonksiyonların belirlenmesinde avantaj sağlayabilir. Bu bağlamda, yöntem yalnızca tanı amaçlı değil, aynı zamanda kişiye özgü rehabilitasyon stratejilerinin geliştirilmesinde de anlamlı katkılar sunabilir.

Hiperparametre ayarlarının farklı veri alt kümelerinde değiştirilmeksizin başarılı sonuçlar vermesi yöntemin gücü açısından dikkat çekicidir. Ayrıca sağ ve sol ayak için sekizer öznitelikle oluşturulan düşük boyutlu modeller, birleşik 16 öznitelikli modele kıyasla yalnızca %2–3 oranında doğruluk kaybı göstererek, daha az veriyle dahi yüksek performansın korunabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle donanımsal kısıtlı taşınabilir sistemlerde veri işleme maliyetini düşürme açısından önemli bir avantajdır.

Bu çalışmanın geliştirilmesi beklenen bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bu çerçevede özellikle denek sayısının yeterliliği sorgulanmaktadır. Katılımcı örnekleme büyüklüğünün artırılması ve vestibüler dışı denge bozuklukları (örneğin serebellar ataksi) gibi farklı klinik tabloların da çalışmaya dâhil edilmesi, yöntemin ayırt edicilik düzeyini daha kapsamlı değerlendirmeye olanak tanyacaktır. Verilerin günlük yaşam koşullarında toplanması, laboratuvar ortamına bağlı kısıtlamaları azaltarak, yürüyüş davranışının doğal varyasyonlarını daha iyi yansıtabilir. Rehabilitasyon süreçlerinin izlenmesi amacıyla zamana yayılmış (boylamsal) veri toplama protokolleri planlanmalı ve yöntemin duyarlılığı zaman içindeki değişimlere karşı test edilmelidir. Ayrıca, entropi tabanlı özniteliklerin ivmeölçer veya IMU sensörleri gibi diğer hareket verileriyle birleştirilmesi, sınıflandırma performansının daha da artırılmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, trend bileşeninden arındırılmış sinyaller üzerinden hesaplanan Tsallis entropisine dayalı analiz, vestibüler sistem bozukluklarının hızlı, taşınabilir ve düşük maliyetli bir yaklaşımla değerlendirilmesinde umut vadeden bir yöntem olarak düşünülebilir. Gelecek çalışmalarda çok-modlu veri kaynaklarının entegre edilmesi ve geniş katılımcı profilleriyle yöntemin klinik geçerliliğinin daha da güçlendirilmesi hedeflenmektedir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Khan, Sarah ve Chang, Richard. "Anatomy of the vestibular system: A review". *NeuroRehabilitation*. Cilt: 32, s:437-443, 2013.
- [2] Vanicek N, King SA, Gohil R, Chetter IC, Coughlin PA. "Computerized dynamic posturography for postural control assessment in patients with intermittent claudication." *J Vis Exp*. 2013.
- [3] Ahmadi, S., Vivar, G., Navab, N., et Al. Modern machine-learning Can Support Diagnostic Differentiation Of Central and Peripheral Acute vestibular disorders. *Journal of Neurology*, S1(267), 143-152, 2020.
- [4] Korda, A., Wimmer, W., Wyss, et Al. Artificial Intelligence For Early Stroke Diagnosis In Acute Vestibular Syndrome. *Frontiers in Neurology*, 13, 2022.
- [5] Giladi, N.; Horak, F.B.; Hausdorff, J.M. Classification of gait disturbances: Distinguishing between continuous and episodic changes. *Mov. Disord.* 2013, 28, 1469–1473.
- [6] Bovonsunthochai, S.; Vachalathiti, R.; Hiengkaew, V.; Bryant, M.S.; Richards, J.; Senanarong, V. Quantitative gait analysis in mild cognitive impairment, dementia, and cognitively intact individuals: A cross-sectional case-control study. *BMC Geriatr.* 2022, 22, 767.
- [7] Guo, Y.; Yang, J.; Liu, Y.; Chen, X.; Yang, G.-Z. Detection and assessment of Parkinson's disease based on gait analysis. *Front. Aging Neurosci.* 2022, 14, 916971.
- [8] Xiong W, Faes L, Ivanov PC. "Entropy measures, entropy estimators, and their performance in quantifying complex dynamics: Effects of artifacts, nonstationarity, and long-range correlations." *Phys Rev E*. Cilt 95, No: 6-1, 2017.
- [9] C.Ji, Pengjian S. "Multiscale Tsallis permutation entropy analysis for complex physiological time series". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Cilt:529, s: 10-20, 2019.
- [10] S. Tong, A. Bezerianos, J. Paul, Y. Zhu, N. Thakor. "Nonextensive entropy measure of EEG following brain injury from cardiac arrest." *Statistical Mechanics and its Applications*. Cilt: 305, No: 3-4, s:619-628, 2002.
- [11] Zhang, D.; Jia, X.; Ding, H.; Ye, D.; Thakor, N.V. Application of Tsallis entropy to EEG: Quantifying the presence of burst suppression after asphyxial cardiac arrest in rats. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2010, 57, 867–874.
- [12] Köse, H. Y., & İkizöglü, S. (2023). Development of an entropy-based method for determining the balance problem in individuals. In H. B. Bingöl (Ed.), *Proceedings of the 8th International Battalgazi Scientific Studies Congress* (pp. 57–58). IKSAD Publishing House
- [13] Köse HY, İkizöglü S. Nonadditive Entropy Application to Detrended Force Sensor Data to Indicate Balance Disorder of Patients with Vestibular System Dysfunction. *Entropy (Basel)*. 2023 Sep 27;25(10):1385. doi: 10.3390/e25101385. PMID: 37895507; PMCID: PMC10606935.
- [14] İkizöglü, S., & Heydarov, S. Accuracy comparison of dimensionality reduction techniques to determine significant features from IMU sensor-based data to diagnose vestibular system disorders. *Biomedical Signal Processing and Control*, 61, 2020.
- [15] Günaydin, B., İkizöglü, S. "Multifractal detrended fluctuation analysis of insole pressure sensor data to diagnose vestibular system disorders." *Biomed. Eng. Lett.*, 2023.
- [16] Sigalotti LDG, Ramirez-Rojas A, Vargas CA. "Tsallis q-Statistics in Seismology". *Entropy*. 2023; Cilt: 25, No:3, s:408, 2023.
- [17] Wilk G, Włodarczyk Z. Some Non-Obvious Consequences of Non-Extensiveness of Entropy. *Entropy*. Cilt: 25, No: 3, s: 474, 2023.
- [18] Healy, A., Burgess-Walker, P., Naemi, R., & Chockalingam, N. "Repeatability of WalkinSense in shoe pressure measurement system: A preliminary study.", *The Foot*, Cilt: 22, No: 1, s:35-39, 2012.
- [19] Saito M., Nakajima K., Takano C., Ohta Y., Sugimoto C., "An in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity.", *Medical Engineering & Physics*, Cilt: 33, No: 5, s:638-645, 2011.
- [20] FSR Technical Paper. Available online: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3899023/Interlinkelectronics%20November2017/Docs/Datasheet_FSR.pdf
- [21] Tahir, A.M.; Chowdhury, M.E.; Khandakar, A.; Al-Hamouz, S.; Abdalla, M.; Awadallah, S.; Reaz, M.B.I.; Al-Emadi, N. A Systematic Approach to the Design and Characterization of a Smart Insole for Detecting Vertical Ground Reaction Force (vGRF) in Gait Analysis. *Sensors* 2020, 20, 957.
- [22] Burden, Richard L., ve J. Douglas Faires. "Numerical Analysis.", MA: Cengage Learning, s:144-172, 2019.
- [21] Tahir, A.M.; Chowdhury, M.E.; Khandakar, A.; Al-Hamouz, S.; Abdalla, M.; Awadallah, S.; Reaz, M.B.I.; Al-Emadi, N. A Systematic Approach to the Design and Characterization of a Smart Insole for Detecting Vertical Ground Reaction Force (vGRF) in Gait Analysis. *Sensors* 2020, 20, 957.
- [22] Burden, Richard L., ve J. Douglas Faires. "Numerical Analysis.", MA: Cengage Learning, s:144-172, 2019.