

Araştırma Makalesi - Research Article

Asenkron Motor İç Bilezik ve Dış Bilezik Rulman Arızalarının Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Entropi Analizleri

Entropy Analyses of Inner Race and Outer Race Bearing Faults of Induction Motor Based on Wavelet Transform

Ahmet Kabul^{1*}

Geliş / Received: 10/05/2024

Revize / Revised: 03/07/2024

Kabul / Accepted: 08/07/2024

ÖZ

Rulman arızaları, üç fazlı asenkron motorlarda karşılaşılan baskın arıza tipidir. Titreşim sinyalleri rulman arızalarının tespiti için yaygın olarak analiz edilen sinyallerdir. Ayırık Dalgacık Dönüşümü (DWT-Discrete Wavelet Transform) asenkron motor arızalarının tespitinde kullanılan popüler sinyal işleme yöntemlerinden bir tanesidir. DWT, titreşim sinyallerini frekans bileşenlerine ayırarak her bir bileşeni belirlenen ölçekte analiz eden bir yöntemdir. DWT, özellik çıkarma tabanlı arıza tespit uygulamalarında pratik bir yaklaşım sağlamaktadır. DWT analizlerinde genellikle birden çok istatistiki parametrenin çıkarımı yapılmakta, bu durum da hesaplama karmaşıklığına yol açabilmektedir. Asenkron motor iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları, titreşim sinyalleri standart sapmalarında motorun sağlam çalışma durumuna göre küçük değişimler meydana getirmektedir. Entropi hesaplamaları ile bu küçük değişimler anlamlı çıktılara dönüştürülerek asenkron motor durum izleme çalışmaları yapılabilmektedir. Bilgi teorisi bir veri kümesindeki belirsizlikleri/düzensizlikleri hesaplayan istatistiksel hesaplama tabanlı bir yöntemdir. Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri literatürde öne çıkan bilgi teorisi yaklaşımlarıdır. Bu çalışmada entropi hesaplamalarının ihtiyaç duyduğu istatistiki parametre, titreşim sinyallerine uygulanan DWT sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyali standart sapmasıdır. Bu çalışmada Mendeley veri portundaki açık-kaynak titreşim verileri kullanılarak rulman arızaları tespiti yapılmıştır. Entropi ile rulman arıza durumları arasındaki geçişe bağlı olarak bir eğim açısı hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki Renyi entropi ile asenkron motorun farklı şiddetlerdeki iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarında 75° ve üzerinde eğim açıları elde edilmektedir. Bu yüksek değer, tek bir özellik çıkarma ve Renyi entropisine dayalı DWT analizinin asenkron motor rulman arızası tespitinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Rulman Arızaları, Üç Fazlı Asenkron Motorlar, Titreşim Sinyalleri, DWT, Renyi Entropi

ABSTRACT

Bearing faults are the dominant fault of three phase induction motors. Vibration signals are commonly analysed signals for the detection of bearing faults. The Discrete Wavelet Transform (DWT) is one of the popular signal processing methods that is used to detect induction motor faults. DWT is a method that decomposes vibration signals into frequency components and analyses each component at a specified scale. DWT provides a practical approach in fault detection applications based on the feature extraction. Multiple statistical parameters are typically

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ahmetkabul@mehmetakif.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9579-2757>)

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

extracted in DWT analyses which can lead to computational complexity. Inner race and outer race bearing faults of induction motors cause slight variations in the standard deviations of the vibration signals if they are compared with the healthy operating condition of induction motor. Through entropy calculations, these small variations can be transformed into meaningful outputs for condition monitoring operations of induction motors. Information theory is a statistical based computational method that calculates the uncertainties/irregularities within a dataset. Shannon, Renyi and Tsallis entropies are prominent approaches of information theory found in the literature. In this paper, the statistical parameter required for entropy calculations is the standard deviation of the 6th level detail coefficients obtained from DWT that applied to the vibration signals. In this study, open-source vibration signals dataset from the Mendeley data port were used for bearing faults detection. A slope angle which depends on the change of the bearing fault conditions is calculated by applying entropy. The results show that slope angles of 75° and above are obtained for inner race and outer race bearing faults of varying severity in the induction motor by applying Renyi entropy. These high slope values suggest that Renyi entropy, in conjunction with single-feature DWT analysis, is a viable method for detecting bearing faults in induction motors.

Keywords- Bearing Faults, Three Phase Induction Motors, Vibration Signals, DWT, Renyi Entropy

I. GİRİŞ

Asenkron motorlar güvenilirlikleri, sağlam yapıları ve bakım kolaylıkları nedeniyle pompa, fan, konveyör bant vb. endüstriyel yüklere mekanik enerji sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımlarından dolayı endüstriyel üretim yapan işletmelerin bakım operasyonlarının temel öznelerinden bir tanesini; asenkron motorların reaktif, periyodik, koruyucu ve kestirimci bakım izlemleri oluşturmaktadır. Reaktif bakım, asenkron motor arızalarının katastrofik boyuta ulaşması sonucu uygulanırken; periyodik ve koruyucu bakım teknikleri asenkron motorların sağlıklı çalışma ömürlerini uzatmak için uygulanan bakım teknikleridir. Bu bakım tekniklerinin yanında asenkron motorların durum izlemesini yaparak motor arızalarını erken evrelerde tespit etmeyi hedefleyen kestirimci bakım tekniği de günümüzde uygulanan veri analizi temelli akıllı bakım tekniklerine yol göstermektedir. Veri analizi temelli akıllı bakım tekniklerinde sıklıkla analiz edilen sinyaller stator akım ve titreşim sinyalleridir [1-3].

Asenkron motor arızaları elektriksel ve mekanik arızalar olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Asenkron motor arıza dağılımlarına yönelik yapılan çalışmalarda baskın arızanın %44 ile rulman arızalarına ait olduğu tespit edilmiştir. Rulman arızalarını sırasıyla %26 ile stator sargı kısa devre arızaları, %18 ile kırık rotor çubukları ve %12 ile diğer arızalar takip etmektedir [4]. Baskın arıza olarak ortaya çıkan rulman arızalarının nedenleri arasında yağlanma periyodundaki eksiklikler/hatalar, aşırı yük altında çalışmaları, gerilim dalgalanmaları, vb. sayılabilir. Bu tarz ve benzeri sebepler asenkron motor rulmanlarının sıklıkla arızalanmasına ve birçok rulmanın L10 ömrüne ulaşmadan değiştirilmesine neden olmaktadır [5]. Rulman arızaları dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilye arızaları olarak incelenmekte ve analiz edilmektedir [6].

Rulman arızalarının tespitini yapan birçok kestirimci bakım cihazı sinyal işleme yöntemi olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform) tabanlı analizler yapmaktadır. Bu cihazların genellikle titreşim sinyali analizi ile rulman arızalarını tespit etmesi ve analizler için belli bir süredeki sinyal kayıtlarını kullanmaları, durağan sinyal analizlerinde etkili ve hızlı sonuçlar sunan FFT yöntemini tercih edilebilir kılmaktadır. Ancak durum izleme tabanlı kestirimci bakım tekniğinde sinyal yapılarının durağan olmayan sinyallerden oluşması, tek başına FFT analizini başta çözünürlük olmak üzere birçok konuda yetersiz kılmaktadır [7-8]. Araştırmacılar on yıllardır FFT analizine alternatif olabilecek Hilbert-Huang Dönüşümü (HHT-Hilbert-Huang Transform), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT-Short Time Fourier Transform), Deneyisel Mod Ayrıştırma (EMD-Empirical Mode Decomposition), vb. farklı sinyal işleme yöntemleri üzerinde çalışmaktadırlar [9]. Önerilen bu yöntemlerin ortak noktası özellik çıkarımı tabanlı sinyal işleme yöntemleri olmalarıdır. Dalgacık Dönüşümü (WT-Wavelet Transform) yöntemi de özellik çıkarımlı bir yöntem olarak asenkron motor arızalarının tespitinde tercih edilen zaman-frekans tabanlı bir sinyal işleme yöntemidir [10-12]. WT yönteminde analiz edilen sinyallerin özellik çıkarımı için genellikle sinyallere ait birden fazla istatistiksel özelliğin çıkarımı yapılmaktadır. Tobi vd. tarafından santrifüj pompa arızalarını tespit etmek için yapılan bir çalışmada tercih edilen WT yönteminin analizi için pompaya ait motor titreşim sinyallerine ait altı adet özellik çıkarımı (basıklık, etkin değer, tepe değer, tepe faktörü, darbe faktörü ve biçim faktörü) yapılmıştır [13]. Chikham ve Singh tarafından asenkron motor kırık rotor çubuğu ve rulman arızalarını tespit etmek için yapılan bir çalışmada kullanılan WT yönteminin analizi için asenkron motor stator akım sinyallerine ait enerji, standart sapma, çarpıklık, etkin değer ve varyans değerleri hesaplanmıştır [14]. Ali vd. tarafından asenkron motor kırık rotor çubuğunun tespiti için akım ve titreşim sinyallerine Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT-Discrete Wavelet Transform) uygulanarak; ilgili sinyallere ait ortalama, medyan, standart sapma, medyan mutlak sapma, ortalama mutlak sapma, ortalama norm (L1 norm), ortalama-kare norm (L2 norm) ve maksimum norm istatistiksel parametreleri hesaplanmıştır [15]. Dhamande ve Chaudhari tarafından dişli

arızalarının tespiti için yapılan çalışmada titreşim sinyalleri Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT-Continuous Wavelet Transform) ve DWT ile analiz edilmiştir. Çalışmada zaman tanım aralığındaki sinyallere ait on üç farklı istatistiksel parametre, frekans tanım aralığındaki sinyallere ait on dört farklı istatistiki parametre için özellik çıkarımı yapılmıştır [16]. Dişli arızalarının tespitine yönelik Inturi vd. tarafından yapılan bir başka çalışmada DWT ile EMD sinyal işleme yöntemleri birlikte kullanılarak, titreşim sinyallerine ait enerji, minimum değer, etkin değer ve basıklık parametrelerinin istatistiksel çıkarımları yapılmıştır [17].

Birden fazla istatistiki parametrenin özellik çıkarımının yapıldığı çalışmalarda temel hedef, asenkron motor arızalarının analiz edilen sinyal/sinyaller üzerinden neden olduğu değişimleri ve değişim oranlarını tespit ederek motor arızalarının tespitini ve sınıflandırmasını yapabilmektir. Asenkron motorların erken evre arızalarında bu sinyallerin istatistiki parametre değişimleri de minimum düzeydedir. Bu nedenle istatistiki parametre tabanlı yapılan arıza tespit çalışmalarında birden fazla parametrenin analiz edilme durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum da hesaplama sürelerinin uzamasına ve hesaplama karmaşıklığının artmasına neden olabilmektedir. Entropi tabanlı sinyal işleme yöntemleri, özellik çıkarımı tabanlı arıza tespiti yapan sinyal işleme yöntemlerinin bu önemli kısıtına etkili bir çözüm önerebilmektedir [18].

Shannon tarafından gürültülü haberleşme sinyallerindeki bilgi kayıplarını hesaplamak için literatüre kazandırılan entropi, Jayne tarafından termodinamiğe, Boltzmann tarafından da istatistik bilimine uyarlanmıştır. Günümüzde en geniş anlamıyla bir sistemdeki/bilgi paketindeki düzensizliği ifade eden entropi kavramı, birçok bilim dalında yaygın bir kullanıma sahiptir [19-21]. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar analiz edilen sinyaller üzerinde bozulmalara ve değişimlere neden olmaktadır. Entropi, düzensizlik tespitinde kullanılan bir yaklaşım olduğu için arıza durumlarında sinyallerde ortaya çıkan bu düzensizliklerin analizleri de entropi ile yapılabilmektedir. Guo ve arkadaşları tarafından asenkron motor rulman arızalarının tespiti için önerilen sinyal işleme yönteminin özellik çıkarımında entropiden yararlanılmıştır [22]. Maden sektöründe kullanılan asenkron motorlardaki kırık rotor çubuğu, statik ve dinamik eksenel kaçıklık arızalarının tespitini amaçlayan bir başka çalışmada da yine entropiden yararlanılmıştır [23]. Ünsal tarafından yapılan bir başka çalışmada da asenkron motorlardaki paralel hizalama hatalarının analizi ve tespiti entropi hesaplamalarından yararlanılarak yapılmıştır [24].

WT ile entropinin asenkron motor arıza tespitinde birlikte kullanıldığı çalışmalar da güncel çalışma konuları arasındadır. Han vd. tarafından asenkron motor rulman arızalarının tespitine yönelik yapılan bir çalışmada titreşim sinyallerine Shannon entropisi ve WT tabanlı bir sinyal işleme yöntemi uygulanmıştır [25]. Sharma vd., WT ve Permütasyon entropisi yöntemlerini kullanarak titreşim sinyallerini analiz etmişler ve asenkron motor rulman arızalarını tespit etmişlerdir [26]. Malhotra vd. tarafından yapılan bir başka çalışmada WT ile Bulanık entropi birlikte kullanılarak asenkron motor rulman arızaları tespit edilmiştir [27]. Entropi analizleri ile birlikte kullanılan WT yönteminde çoklu özellik çıkarımı yapılan çalışmalara literatürde rastlansa da tekil özellik çıkarımlı entropi analizlerinin yapıldığı çalışmalara oldukça az rastlanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron motor iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının oluşturulduğu bir deney düzeneğinden elde edilen titreşim sinyalleri analiz edilmiştir. Veri analizi için “Mendeley Data” kütüphanesinde açık kaynak olarak sunulan “Triaxial Bearing Vibration Dataset of Induction Motor under Varying Load Conditions” adlı çalışmadaki titreşim sinyalleri kullanılmıştır [28].

Bu çalışmada DWT sonucu elde edilen detay katsayıları sinyalinin seçilen tekil istatistiki parametresine sırasıyla Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri uygulanarak hesaplanan sonuçlar yorumlanmaktadır. Farklı arıza seviyelerinin her birisi için entropi sonuçları elde edilerek, arıza seviyeleri arasındaki geçişi tanımlayan eğim açıları hesaplanmaktadır. Hesaplanan eğim açılarına göre de en uygun entropi yöntemi önerilmektedir. Makalenin organizasyonu şu şekildedir. Çalışmanın 2. Bölümünde kullanılan yöntemlerin teorik bilgileri, 3. Bölümünde açık kaynak olarak kullanılan verilere ait bilgiler ve 4. Bölümünde analiz sonuçları sunulmaktadır. Çalışma, analiz sonuçlarının değerlendirildiği Sonuçlar Bölümü ile sonlandırılmaktadır.

II. DWT VE ENTROPİ

A. DWT

DWT, zaman-frekans tanım aralığı analizlerinde tercih edilen, ana dalgacık ve bu dalgacığa bağlı seçilen alt dalgacık kümelerinin birlikte kullanıldığı bir sinyal işleme yöntemidir. DWT yönteminde analiz edilen sinyal frekans bileşenlerine bölünür. Sinyalin düşük frekans bileşenleri yaklaşık, yüksek frekans bileşenleri ise detay olarak adlandırılan iki seviyeye bölünür. Pratikte ise bu işlem düşük-geçiren ve yüksek-geçiren filtre blokları yardımıyla gerçekleşir. Alçak ve yüksek geçiren filtrelerin DWT yönteminde temsili, “ j ” ölçeği ve “ k ” kaydırma parametrelerinin tanımlanmasıyla yapılmaktadır. j ve k parametreleri tamsayı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 1’te ana dalgacığın ikinci dereceden hesaplanmasında kullanılan denklem sunulmaktadır [29].

178

$$f_{Dj} = [(\frac{f_s}{2^{j+1}}) \rightarrow (\frac{f_s}{2^j})] \quad (9)$$

Her bir yaklaşık ve detay sinyalinin frekans bantları Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Frekans bantlarının çoklu seviye çözümlemeleri.

Seviyeler, j	Yaklaşık Sinyaller, A_j (Hz)	Detay Sinyaller, D_j (Hz)
1	0-4480	4480-8960
2	0-2240	2240-4480
3	0-1120	1120-2240
4	0-560	560-1120
5	0-280	280-560
6	0-140	140-280
7	0-70	70-140

B. Shannon Entropi

Shannon entropi bir bilgi paketindeki belirsizlik ve düzensizliğin ölçüsüdür. Asenkron motor arızaları motordan ölçülen sinyalin beklenen değerinde belirsizliğe yol açtığı için Shannon entropi hesaplamalarında kullanılabilme potansiyeli barındırmaktadır. Shannon entropi ile doğruluğundan emin olunan durumlar 0 (*sıfır*) değerini almaktayken, belirsizliğin maksimum olduğu durumlarda entropi değeri 1 (*bir*) olarak hesaplanmaktadır. Entropi veri/sinyal paketindeki belirsizliği olasılık temelli hesaplamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan bütün entropi hesaplamalarında motorun arızalı olma olasılığı (q_i) kullanılmaktadır. Entropi sinyaldeki belirsizliğe odaklandığı için hesaplamalar sırasında referans değerlere ihtiyaç duymaktadır.

Entropi hesaplaması bu çalışmada DWT ile birlikte kullanılmaktadır. DWT, sağlam motor ve iç bilezik rulman veya dış bilezik rulman arızalarının oluşturulduğu test düzeneğinden elde edilen farklı arıza şiddetlerindeki titreşim sinyallerine uygulanmaktadır (Bu çalışmada açık-kaynak veri kullanılmıştır [28]). Entropi, titreşim sinyallerindeki arıza kaynaklı değişimlere odaklanmaktadır. Entropi, olasılık temelli bir hesaplama yöntemi kullandığı için entropi analizi yapılacak sinyale ait istatistiki bir parametrenin özellik çıkarımı yapılmalıdır. Literatürdeki çalışmalarda DWT analizi sonucu elde edilen sinyallere ait genellikle birden çok istatistiki parametrenin çıkarımının yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyaline ait sadece standart sapma değerleri özellik çıkarımı amaçlı kullanılmaktadır.

Entropi analizi bu çalışmada rulmanın sağlam çalışma durumunda ve rulmanda meydana gelen altı farklı arıza şiddeti altında yapılmaktadır. Her bir durumda entropi hesabının yapılabilmesi için titreşim sinyali DWT analizinin standart sapma değerinin olasılık hesabına ihtiyaç vardır. Olasılık hesabında asenkron motorun sağlam çalışma durumuna ait standart sapma değerleri referans değer olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorun sağlam olarak çalıştırıldığı durumda motorun sağlam olma olasılığı 1 ($p_i = 1$), arızalı olma olasılığı ise 0’dır ($q_i = 0$). Shannon entropi hesaplamasında motorun arızalı olma olasılık değeri kullanıldığı için buradaki q_i değerine küçük bir sabit sayı eklemesi ($\varepsilon = 0,0001$) yapılmaktadır. Motorun sağlam olarak çalıştırıldığı durumda motorun arızalı olma olasılığı (q_i) 0,0001 olarak kabul edilmektedir.

Entropi analizi için kullanılacak referans veri motorun sağlam çalıştığı durumda kaydedilen titreşim sinyallerinin DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyali standart sapmasıdır. Standart sapma (SS) hesaplaması Eşitlik 10 ile yapılmaktadır [34].

$$SS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Eşitlik 10’da sunulan ifadede N , örneklem sayısını; x_i , hesaplanan değeri; $\bar{x}$ hesaplanan verilerin ortalama değerini ifade etmektedir. Standart sapma hesaplaması sırasıyla motorun altı farklı rulman arızası şiddeti için de yapılmaktadır. Dolayısıyla motor toplamda yedi farklı durumda çalıştırılmaktadır. Motorun her bir çalışma durumu i katsayısıyla ifade edilirse, motorun çalışma durumlarına göre kullanılan i değerleri Tablo 2’deki gibi olmaktadır.

Tablo 2. Motorun çalışma durumuna göre entropi hesaplamasında kullanılan notasyonlar.

	Sağlam Çalışma Durumu	1. Seviye Arıza Şiddeti	2. Seviye Arıza Şiddeti	3. Seviye Arıza Şiddeti	4. Seviye Arıza Şiddeti	5. Seviye Arıza Şiddeti	6. Seviye Arıza Şiddeti
i	0	1	2	3	4	5	6

Standart sapma değerleri kullanılarak istenilen çalışma durumu için motorun sağlam olma olasılığı (p_i) Eşitlik 11 ile hesaplanmaktadır.

$$p_i = \frac{SS_0}{SS_i} \quad (11)$$

Aynı çalışma durumu için motorun arızalı olma olasılığı (q_i) Eşitlik 12 ile hesaplanmaktadır.

$$q_i = 1 - p_i \quad (12)$$

Motorun arızalı olma olasılık değerine göre Shannon entropi (SE) Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanmaktadır [35].

$$SE = -\sum_{i=1}^N q_i * (\log_2 q_i) \quad (13)$$

Bu çalışmada arıza şiddeti kademeli olarak arttırılarak Tablo 3'te belirtilen geçiş durumları oluşturulmaktadır.

Tablo 3. Motorun çalışma durumuna göre elde edilen geçiş durumları.

Entropi Geçiş Durumları Hesabı
Sağlam → 1. Seviye Arıza Şiddeti
1. Seviye Arıza Şiddeti → 2. Seviye Arıza Şiddeti
2. Seviye Arıza Şiddeti → 3. Seviye Arıza Şiddeti
3. Seviye Arıza Şiddeti → 4. Seviye Arıza Şiddeti
4. Seviye Arıza Şiddeti → 5. Seviye Arıza Şiddeti
5. Seviye Arıza Şiddeti → 6. Seviye Arıza Şiddeti

Çalışmada entropi değerlerinin hesaplamasındaki temel amaç asenkron motorun arıza tespitinde kullanılabilecek nümerik bir çıktı sağlamaktır. Bu nümerik değer hesabı için Tablo 3'te sunulan her bir geçiş durumunun eğim açısı hesaplanmaktadır. Eğim açısı hesabı için iki değişken parametreye ihtiyaç vardır. Birinci değişken parametre hesabı her bir geçiş durumunda ifade edilen iki farklı rulman çalışma durumu için hesaplanan entropi değerleri farkı (ΔSE_i); ikinci değişken parametre ise her bir geçiş durumunda ifade edilen iki farklı rulman çalışma durumu için hesaplanan motorun arızalı olma olasılık değerleri farkıdır (Δq_i). ΔSE_i ve Δq_i hesaplamaları sırasıyla Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak yapılmaktadır.

$$\Delta SE_i = |SE_i - SE_{i-1}| \quad (14)$$

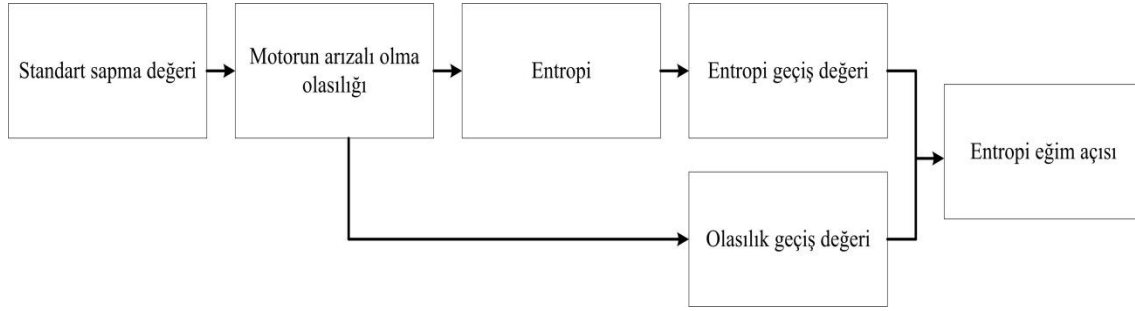
$$\Delta q_i = |q_i - q_{i-1}| \quad (15)$$

Entropi eğim açısı hesabı Eşitlik 16 ile yapılmaktadır [35].

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta SE_i - \Delta SE_{i-1}}{\Delta q_i - \Delta q_{i-1}} \quad (16)$$

Arıza tespiti amaçlı kullanılacak entropi eğim açısı hesaplamasının akış diyagramı Şekil 2'de sunulmaktadır. Çalışmada bilgi kuramı teorisi altında değerlendirilen Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri

hesaplamaları yapılmaktadır [36]. Sunulan akış diyagramı bir sonraki bölümlerde sırasıyla anlatılacak Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları için de kullanılmaktadır.



Şekil 2. Entropi eğim açısı hesaplama aşamaları

C. Renyi Entropi

Shannon entropinin özelleşmiş bir versiyonu olan ve bilgi teorisi kuramı içerisinde yer alan Renyi entropi (RE) Eşitlik 17 ile hesaplanmaktadır [37].

$$RE = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \left(\sum_{i=1}^N q_i^\alpha \right) \quad (17)$$

Renyi entropi, α dereceli entropi olarak da bilinmektedir. α derecesinin artması Renyi entropi değerindeki sapmayı arttırırken, bu derece sıfıra yaklaştıkça çok daha net sonuçlar alınabilmektedir. α derecesinin matematiksel doğruluk açısından 1'den büyük seçilmesi gerekmektedir [38-39]. Çalışmada α derece katsayısı 2 olarak tercih edilmiştir.

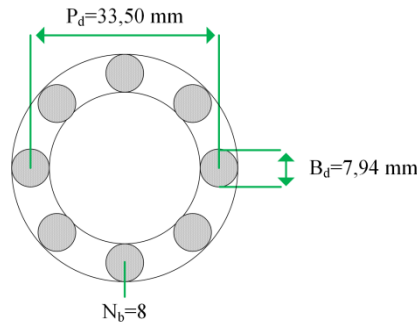
D. Tsallis Entropi

Shannon entropinin bir başka özelleşmiş versiyonu olan ve bilgi teorisi kuramı içerisinde yer alan Tsallis entropi (TE) Eşitlik 18 ile hesaplanmaktadır [40].

$$TE = \frac{1}{\alpha-1} (1 - \sum_{i=1}^N q_i^\alpha) \quad (18)$$

III. YÖNTEM

Makale çalışmasında MendeleyData kütüphanesinde Kumar vd. tarafından 2022 yılında yapılan çalışma sonucu elde edilen açık-kaynak titreşim verileri analiz amaçlı kullanılmıştır. Söz konusu çalışma kapsamında üç eksenli titreşim verileri Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMs-Micro Electromechanical Systems) tabanlı bir ivmeölçer ile ölçülmüştür. Titreşim verileri 12 farklı rulman durumu için 3 farklı yük kademesinde 10.000 Hz örnekleme frekansı ile kaydedilmiştir [41]. İlgili çalışmada analizi yapılan rulman; 6204 – 2Z/C3 kodlu rulmandır. Rulman boyutları Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. 6204-2Z/C3 rulman boyutları

Şekil 3'te P_d aynı merkezli iki bilye arasındaki mesafeyi, B_d bilyelerin çapını ve N_b bilye sayısını belirtmektedir. Çalışmada iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları incelenmektedir. Analizi yapılan rulman durumlarına ait bilgiler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Motor rulman arızaları bilgileri.

Rulman Durumu	Rulman Arızası Yeri	Rulman Arızası Derinliği (mm)	Asenkron Motor Yük Değeri (W)
Sağlam		---	Yüklü
Arızalı	İç Bilezik	0,7	300
Arızalı	İç Bilezik	0,9	300
Arızalı	İç Bilezik	1,1	300
Arızalı	İç Bilezik	1,3	300
Arızalı	İç Bilezik	1,5	300
Arızalı	İç Bilezik	1,7	300
Arızalı	Dış Bilezik	0,7	300
Arızalı	Dış Bilezik	0,9	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,1	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,3	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,5	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,7	300

Çalışmada iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının analizi yapılmaktadır. Döner mekanik sistemlerde rulman arızaları karakteristik harmonik bileşenleri Eşitlik 19 ve Eşitlik 20 kullanılarak yapılmaktadır [42].

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \gamma\right) \quad (19)$$

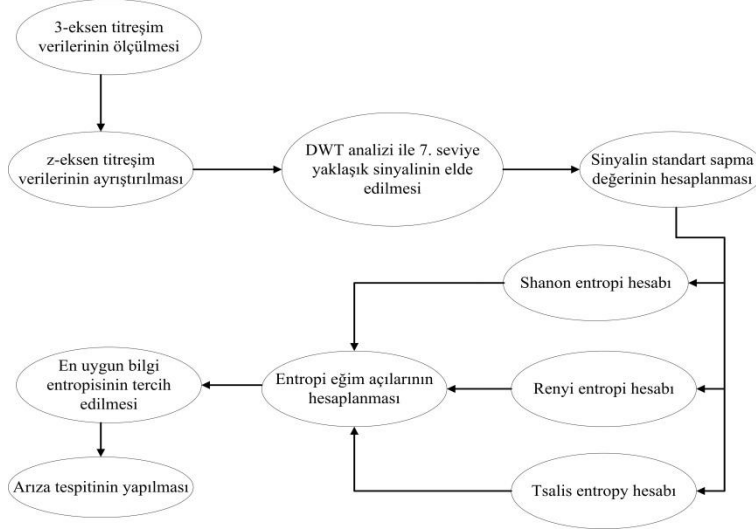
$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \gamma\right) \quad (20)$$

f_i ve f_o sırasıyla iç bilezik ve dış bilezik rulman arızası titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşenlerini; f_r rotor frekansını; γ ise rulman içindeki bilyelerin temas açısını ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan açık-kaynak titreşim sinyallerinin rotor frekansı 49,5 Hz; rulman içindeki bilyelerin temas açısı ise 0° olarak kabul edilmiştir. Şekil 3'te sunulan rulman ölçüleri kullanılarak hesaplanan titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşenleri Eşitlik 21 ve Eşitlik 22'de verilmektedir.

$$f_i = \frac{8}{2} * 49,5 * \left(1 + \frac{7,94}{33,50} \cos 0\right) = 245 \text{ Hz} \quad (21)$$

$$f_o = \frac{8}{2} * 49,5 * \left(1 - \frac{7,94}{33,50} \cos 0\right) = 151 \text{ Hz} \quad (22)$$

Çalışmada entropi tabanlı DWT arıza tespiti amaçlı kullanılmaktadır. Geliştirilen yöntemde deney düzeneğinde kullanılan asenkron motor üzerinden ölçülen üç eksenli titreşim sinyalleri giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Titreşim sinyallerinin z-eksen verileri daha yüksek standart sapma sonuçları verdiği için analizde tercih edilmektedir. z-eksen titreşim verileri DWT analizi ile 7. seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Eşitlik 21 ve Eşitlik 22'de hesaplanan iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları karakteristik harmonik bileşenleri dikkate alındığında, 6. seviye detay katsayıları sinyalinin standart sapmaları sırasıyla Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri için özellik çıkarımı verisi olarak kullanılmaktadır. Çalışmada önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 4'te sunulmaktadır.

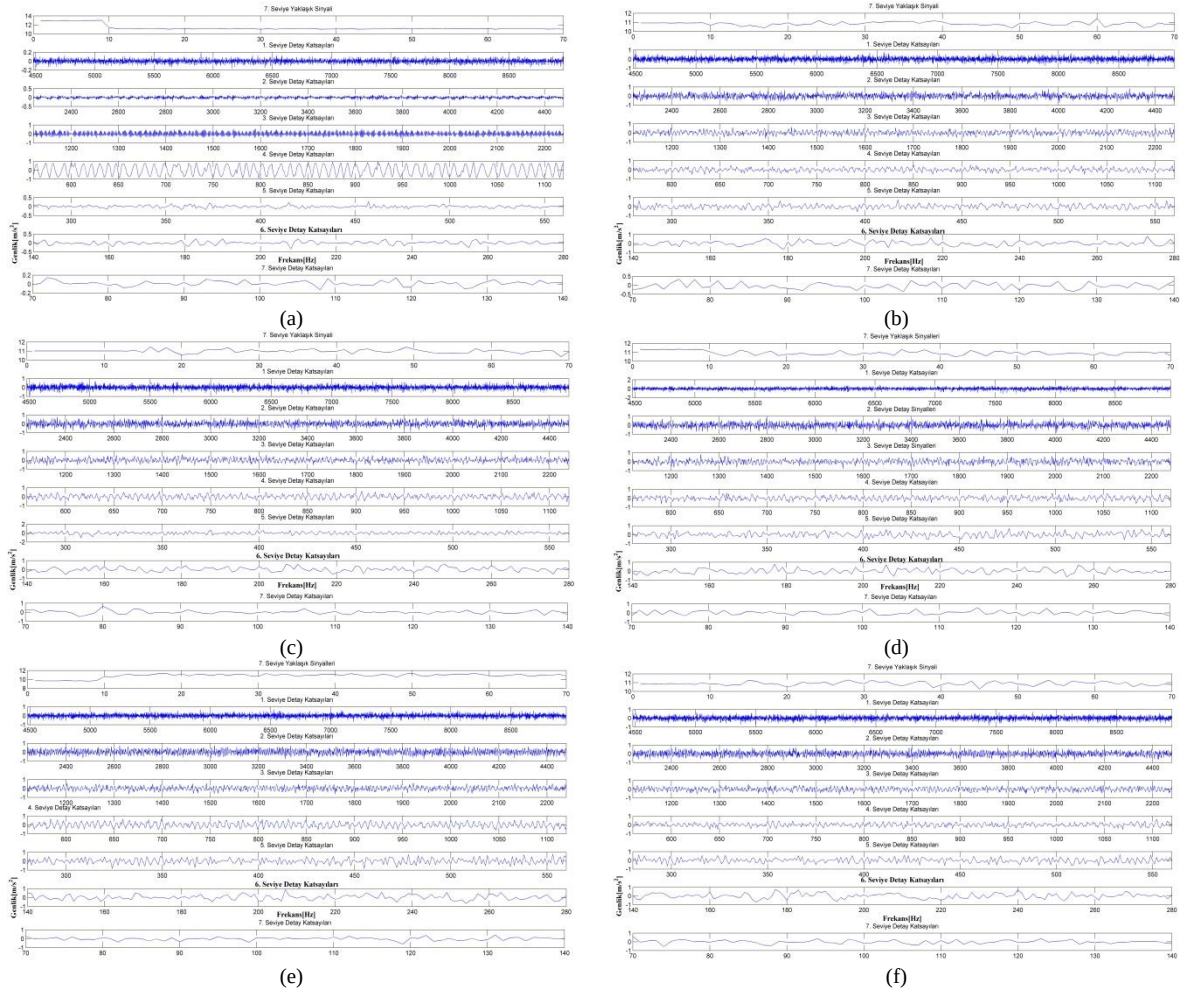


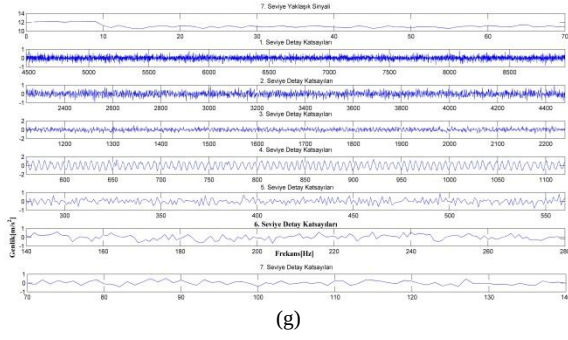
Şekil 4. Önerilen yöntemin akış diyagramı

IV. ÖNERİLEN YÖNTEMİN SONUÇLARI

A. İç Bilezik Rulman Arızaları

Önerilen yöntemde titreşim sinyallerine DWT uygulanmaktadır. DWT ile titreşim sinyalleri 7. Seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Tablo 4'te belirtilen sağlam rulman ve altı farklı iç bilezik rulman arızası için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmaktadır.





Şekil 5. z-ekseni titreşim sinyalleri iç bilezik rulman arızası DWT analiz sonuçları

DWT analizi tamamlanan z-ekseni titreşim sinyallerinin 6. seviye detay sinyallerinin standart sapma değerleri Eşitlik 10 kullanılarak Tablo 5'teki gibi hesaplanır.

Tablo 5. Motor rulman durumuna göre titreşim sinyalleri SS değerleri.

Rulman Durumu	Standart Sapma Değerleri
Sağlam	0,0987
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,2306
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,2515
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,2652
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,2757
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,2854
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,3055

Titreşim sinyalleri standart sapma değerleri kullanılarak asenkron motorun p_i ve q_i değerleri Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 kullanılarak Tablo 6'daki gibi hesaplanır.

Tablo 6. Motor rulman durumuna göre motorun sağlam ve arızalı olma olasılıkları.

Rulman Durumu	p_i	q_i
Sağlam	1	0,0001
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,4280	0,5720
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,3924	0,6076
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,3721	0,6279
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,3580	0,6420
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,3458	0,6542
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,3230	0,6770

Entropi hesaplamalarında belirsizlik durumunun ortaya çıkmaması için rulmanın sağlam olduğu çalışma durumunda $\varepsilon = 0,0001$ sabiti q_i hesaplamasına eklenmektedir ($q_i = 1 - p_i + \varepsilon$).

1) Shannon entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerleri bilgi entropisi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Shannon entropi (SE), Eşitlik 13 kullanılarak Tablo 7'deki gibi hesaplanır.

Tablo 7. Motor rulman durumuna göre Shannon entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	SE
Sağlam	0,0001	0,0013
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	0,4610
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	0,4368
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	0,4216
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	0,4104
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	0,4005
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	0,3810

Rulman çalışma durumları arasındaki geçişler entropi hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır. Entropi hesaplamalarındaki değişimler rulman çalışma durumlarına göre analiz edildiği için Tablo 3'te sunulan geçişler baz alınmaktadır. Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔSE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 8'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 8. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔSE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	0,4596
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,0242
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0152
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0112
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0099
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0195

Geçiş değerlerinin arıza tespitinde kullanılabilir sonuçlar üretebilmesi için her bir geçiş durumuna ait entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 9'da sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 9. Geçiş değerlerine göre Shannon entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	38,79
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	34,25
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	36,79
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	38,22
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	39,25
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	40,54

2) Renyi entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman durumuna göre hesaplanan q_i ile Renyi entropi (RE), Eşitlik 17 kullanılarak Tablo 10'daki gibi hesaplanır.

Tablo 10. Motor rulman durumuna göre Renyi entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	RE
Sağlam	0,0001	26,5754
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	1,6117
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	1,4376
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	1,3429
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	1,2785
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	1,2244
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	1,1257

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun ve Δq_i ve Renyi entropi farkları (ΔRE_i) Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 11’deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 11. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔRE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	24,9637
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,1740
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0947
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0644
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0542
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0986

Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Renyi entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 12’de sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 12. Geçiş değerlerine göre Renyi entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	88,69
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	78,45
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	77,92
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	77,59
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	77,34
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	77,01

3) Tsallis entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman durumuna göre hesaplanan q_i ile Tsallis entropi (TE), Eşitlik 18 kullanılarak Tablo 13’teki gibi hesaplanır.

Tablo 13. Motor rulman durumuna göre Tsallis entropi hesabı..

Rulman Durumu	q_i	TE
Sağlam	0,0001	1,0000
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	0,6728
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	0,6308
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	0,6058
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	0,5878
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	0,5720
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	0,5417

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve Tsallis entropi farkları (ΔTE_i) Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 14'teki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 14. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔTE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	0,3272
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,0420
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0250
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0180
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0158
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0303

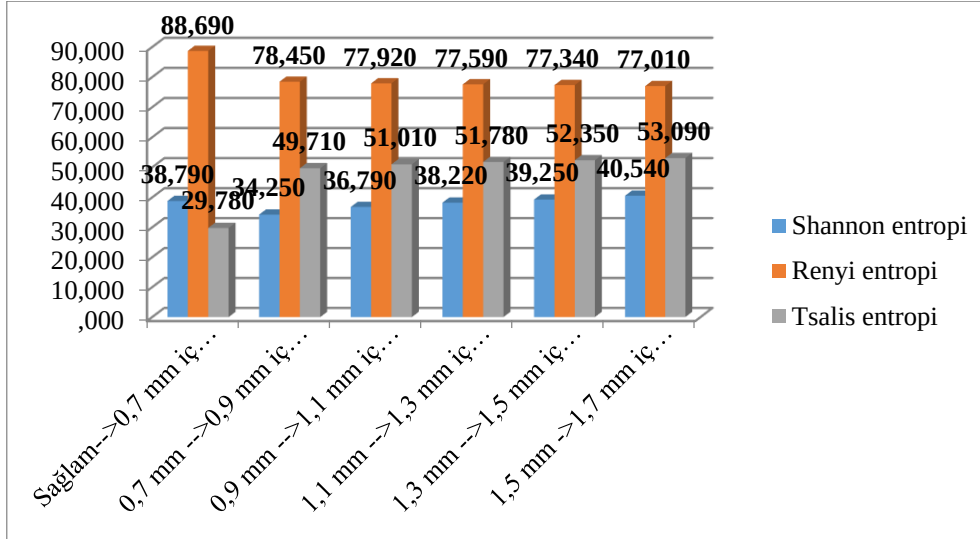
Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Tsallis entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 15'te sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 15. Geçiş değerlerine göre Tsallis entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	29,78
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	49,71
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	51,01
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	51,78
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	52,35
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	53,09

4) Bilgi teorisi yöntemlerinin karşılaştırılması

Shannon, Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları baz alınarak elde edilen eğim açılarının grafiksel sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır.

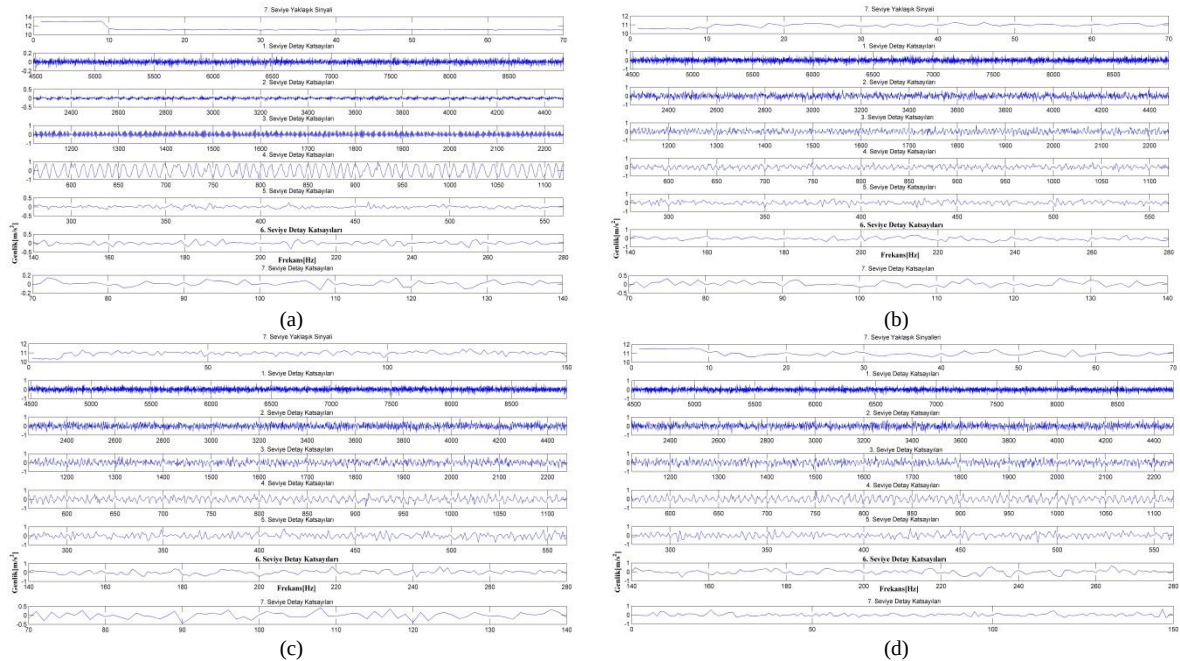


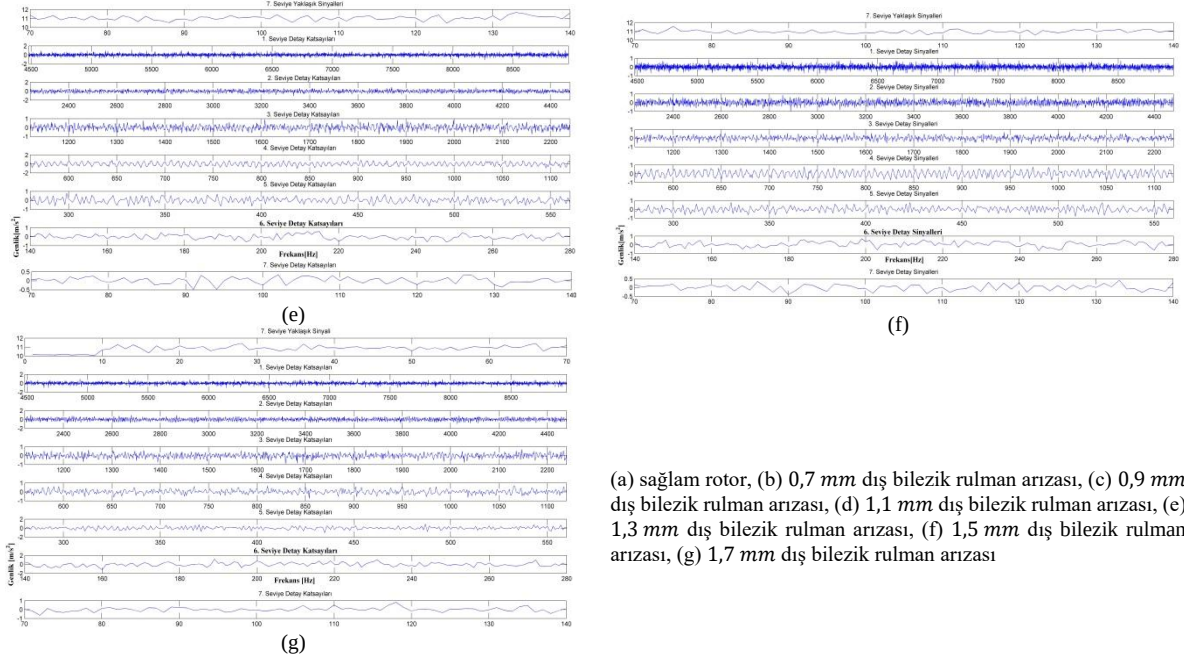
Şekil 6. Bilgi entropisi eğim açıları sonuçları

Elde edilen sonuçlar erken evre arıza durumu (Sağlam rulman → 0,7 mm iç bilezik rulman arızası geçişi) ve her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar baz alınarak iki farklı kategoride incelenmektedir. Erken evre arıza durumunda Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri sırasıyla 39°, 89° ve 30°'lik eğim açıları vermektedir. Renyi entropi burada sunduğu yüksek eğim açısı ile iç bilezik rulman arızasının erken evre arıza tespitinde diğer bilgi entropilerine göre önemli bir kolaylık sunmaktadır. Her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar incelendiğinde Shannon entropi 35° – 40°, Renyi entropi 75° – 80° ve Tsallis entropi 50° – 55° arasında eğim açıları sunmaktadır. Bilgi teorileri içerisinde Renyi entropi sağlamış olduğu yüksek ve sabit sonuçlar ile iç bilezik rulman arızalarının tespitinde Shannon ve Tsallis entropilerine göre daha güvenilir bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmada eğim açıları birbirini takip eden arıza şiddetlerine göre hesaplanmaktadır. Arıza şiddetinin belirgin şekilde değişeceği durum senaryolarında (örneğin sağlam rulman → 1,3 mm iç bilezik rulman arızası gibi) elde edilen Renyi eğim açıları çok daha yüksek olacaktır.

B. Dış Bilezik Rulman Arızaları

Titreşim sinyallerine uygulanan DWT ile titreşim sinyalleri 7. Seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Tablo 4'te belirtilen sağlam rulman ve altı farklı dış bilezik rulman arızaları için elde edilen sonuçlar Şekil 7'de sunulmaktadır.





(a) sağlam rotor, (b) 0,7 mm dış bilezik rulman arızası, (c) 0,9 mm dış bilezik rulman arızası, (d) 1,1 mm dış bilezik rulman arızası, (e) 1,3 mm dış bilezik rulman arızası, (f) 1,5 mm dış bilezik rulman arızası, (g) 1,7 mm dış bilezik rulman arızası

Şekil 7. z-ekseni titreşim sinyalleri dış bilezik rulman arızası DWT analiz sonuçları

DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay sinyallerinin standart sapma değerleri Eşitlik 10 kullanılarak Tablo 16'daki gibi hesaplanır.

Tablo 16. Motor rulman durumuna göre titreşim sinyalleri standart sapma değerleri.

Rulman Durumu	Standart Sapma Değerleri
Sağlam	0,0987
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,1762
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,2217
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,2307
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,2576
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,3092
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,3769

Titreşim sinyalleri SS değerleri kullanılarak asenkron motorun p_i ve q_i değerleri Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 kullanılarak Tablo 17'deki gibi hesaplanır.

Tablo 17. Motor rulman durumuna göre motorun sağlam ve arızalı olma olasılıkları.

Rulman Durumu	p_i	q_i
Sağlam	1	0,0001
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,5601	0,4399
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,4452	0,5548
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,4278	0,5722
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,3831	0,6169
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,3192	0,6808

1,7 mm dış bilezik rulman arızası

0,2618

0,7382

1) Shannon entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Shannon entropi (SE), Eşitlik 13 kullanılarak Tablo 18'deki gibi hesaplanır.

Tablo 18. Motor rulman durumuna göre Shannon entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	SE
Sağlam	0,0001	0,0013
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	0,5212
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	0,4715
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	0,4608
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	0,4299
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	0,3776
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,3233

Tablo 3'te sunulan her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔSE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 19'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 19. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔSE_i
Sağlam → 0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	0,5198
0,7 mm dış bilezik rulman arızası → 0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,0496
0,9 mm dış bilezik rulman arızası → 1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0107
1,1 mm dış bilezik rulman arızası → 1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,0309
1,3 mm dış bilezik rulman arızası → 1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,0523
1,5 mm dış bilezik rulman arızası → 1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,0543

Her bir geçiş durumuna ait entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 20'de sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 20. Geçiş değerlerine göre Shannon entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam → 0,7 mm dış bilezik rulman arızası	49,77
0,7 mm dış bilezik rulman arızası → 0,9 mm dış bilezik rulman arızası	23,36
0,9 mm dış bilezik rulman arızası → 1,1 mm dış bilezik rulman arızası	31,60
1,1 mm dış bilezik rulman arızası → 1,3 mm dış bilezik rulman arızası	34,69
1,3 mm dış bilezik rulman arızası → 1,5 mm dış bilezik rulman arızası	39,29
1,5 mm dış bilezik rulman arızası → 1,7 mm dış bilezik rulman arızası	43,45

2) Renyi entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Renyi entropi (RE), Eşitlik 17 kullanılarak Tablo 21'deki gibi hesaplanır.

Tablo 21. Motor rulman durumuna göre Renyi entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	RE
Sağlam	0,0001	26,5754
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	2,3695
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	1,6997
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	1,6107
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	1,3938
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	1,1093
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,8760

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔRE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 22'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 22. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔRE_i
Sağlam → 0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	24,2059
0,7 mm dış bilezik rulman arızası → 0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,6699
0,9 mm dış bilezik rulman arızası → 1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0889
1,1 mm dış bilezik rulman arızası → 1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,2169
1,3 mm dış bilezik rulman arızası → 1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,2845
1,5 mm dış bilezik rulman arızası → 1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,2333

Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Renyi entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 23'te sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 23. Geçiş değerlerine göre Renyi entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam → 0,7 mm dış bilezik rulman arızası	88,96
0,7 mm dış bilezik rulman arızası → 0,9 mm dış bilezik rulman arızası	80,26
0,9 mm dış bilezik rulman arızası → 1,1 mm dış bilezik rulman arızası	78,95
1,1 mm dış bilezik rulman arızası → 1,3 mm dış bilezik rulman arızası	78,36
1,3 mm dış bilezik rulman arızası → 1,5 mm dış bilezik rulman arızası	77,34
1,5 mm dış bilezik rulman arızası → 1,7 mm dış bilezik rulman arızası	76,19

3) Tsallis entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Tsallis entropi (TE), Eşitlik 18 kullanılarak Tablo 24'teki gibi hesaplanır.

Tablo 24. Motor rulman durumuna göre Tsallis entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	TE
Sağlam	0,0001	1,0000
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	0,8065
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	0,6921
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	0,6726
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	0,6195
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	0,5365
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,4551

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔTE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 25'teki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 25. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔTE_i
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	0,1935
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,1143
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0196
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,0531
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,0830
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,0814

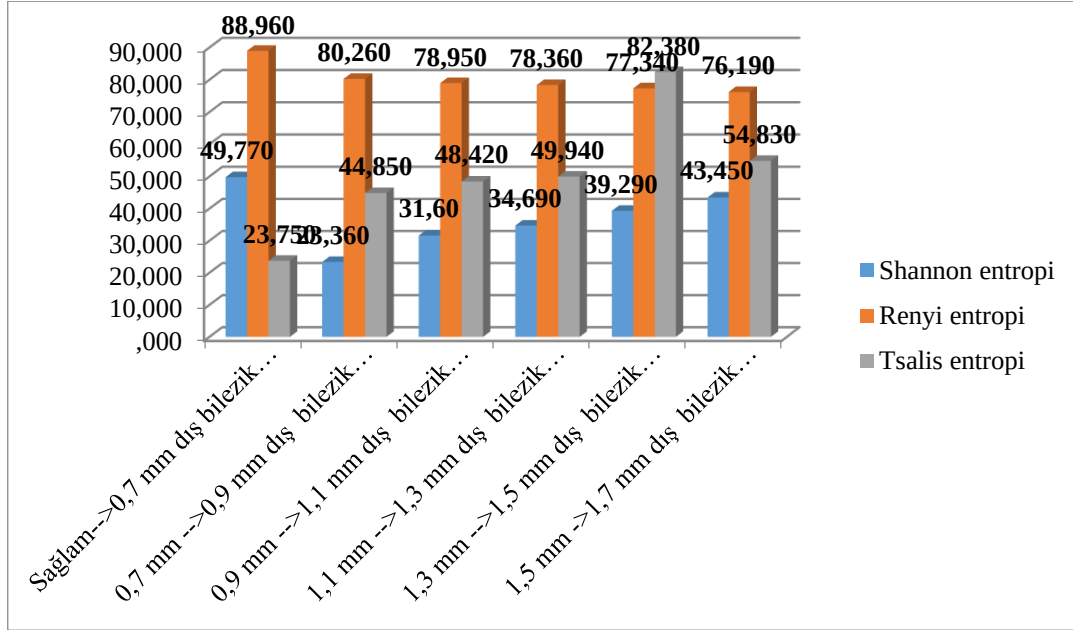
Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Tsallis entropi eğim açıları (α°) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 26'da sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 26. Geçiş değerlerine göre Tsallis entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	α°
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	23,75
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	44,85
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	48,42
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	49,94
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	52,38
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	54,83

4) Bilgi entropisi yöntemlerinin karşılaştırılması

Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri baz alınarak elde edilen eğim açılarının grafiksel sonuçları Şekil 8'de sunulmaktadır.



Şekil 8. Bilgi entropisi eğim açıları sonuçları

Elde edilen sonuçlar erken evre arıza durumu için ve her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar için iki farklı kategoride değerlendirilmektedir. Erken evre arıza durumunda Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri sırasıyla 50° , 89° ve 24° 'lik eğim açıları vermektedir. Renyi entropi burada sunduğu yüksek eğim açısı ile dış bilezik rulman arızasının erken evre arıza tespitinde diğer bilgi entropilerine göre önemli bir kolaylık sunmaktadır. Her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar incelendiğinde Shannon entropi $20^\circ - 45^\circ$, Renyi entropi $75^\circ - 80^\circ$ ve Tsallis entropi $45^\circ - 55^\circ$ arasında eğim açıları sunmaktadır. Bilgi teorileri içerisinde Renyi entropi sağlamış olduğu yüksek ve sabit değerler ile dış bilezik rulman arızalarının tespitinde Shannon ve Tsallis entropilerine göre daha güvenilir bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca arıza şiddetinin belirgin şekilde değişeceği durumlarda elde edilen Renyi eğim açıları değerleri çok daha yüksek olacaktır.

V. SONUÇLAR

Asenkron motorların endüstriyel uygulamalardaki yaygın kullanımları bu motorlardaki baskın arıza olan rulman arızalarının güvenilir ve hızlı yöntemlerle tespit edilmesini gerekli kılmaktadır. İç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının titreşim sinyalleri üzerinden analiz edildiği bir çalışmadaki açık-kaynak verilerin [41] kullanıldığı bu çalışmada, rulman arızalarının tespitine yönelik alternatif bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde DWT tabanlı sinyal işleme yöntemlerindeki çoklu özellik çıkarımlarına alternatif olabilecek entropi hesaplamasına dayalı tek bir parametre analizi üzerinde durulmaktadır. Asenkron motorun rulmanındaki arıza şiddeti arttıkça titreşim sinyallerinin standart sapma değerleri de yükselmektedir. Entropi yaklaşımları çerçevesinde bu çalışmada titreşim sinyalleri standart sapmalarına bilgi teorisi altında incelenen Shannon, Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları uygulanmaktadır. Şekil 6'da ve Şekil 8'de sunulan sonuçlara göre Renyi entropi yaklaşımı ile sağlam motorun arızaya geçtiği ilk durum olan 0,7 mm rulman arızası durumu için 89° 'lik bir eğim açısı hesaplanmaktadır. Benzer şekilde arıza şiddetlerinin arttığı durumlar değerlendirildiğinde de hem iç bilezik hem de dış bilezik rulman arızaları için Renyi entropi temelli hesaplamalarda $75^\circ - 80^\circ$ arasında değişen eğim açıları elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre DWT tabanlı asenkron motor iç bilezik rulman ve dış bilezik rulman arızalarının titreşim sinyalleri analizi ile tespitinde Renyi entropi yaklaşımı özellik çıkarımı amaçlı kullanılabilir bir analiz yöntemi olarak önerilmektedir. Çalışmada önerilen yöntem alternatif bir yaklaşım olarak öne çıkmakta olup durum izleme tabanlı online bakım yöntemlerinde kullanılması daha uygundur. Bu yöntemin kestirimci bakım uygulamalarında kullanılabilmesi için asenkron motorun sağlam rulmanla çalışma durumuna ait titreşim sinyalleri önceden kaydedilmelidir. Ayrıca çalışmada önerilen entropi tabanlı DWT sinyal işleme yöntemine eklenebilecek FFT, Hilbert Dönüşümü gibi yöntemlerle, titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşen frekansları da tespit edilerek arızanın hangi tip arıza olduğu da tanımlanabilir. Gelecek çalışmalarda farklı güç kapasitesindeki asenkron motorların titreşim/akım sinyalleri analizleri de önerilen yöntemle test edilerek elde edilen mevcut bulguların kıyaslaması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Choudhary, A., Goyal, D., Shimi, S. L., & Akula, A. (2019). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 1221-1238.

- [2] Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 2213-2227.
- [3] Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106908.
- [4] Yatsugi, K., Pandarakone, S. E., Mizuno, Y., & Nakamura, H. (2023). Common diagnosis approach to three-class induction motor faults using stator current feature and Support Vector Machine. *IEEE Access*, 11, 24945-24952.
- [5] Peeters, C., Guillaume, P., & Helsen, J. (2018). Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy. *Renewable Energy*, 116(B), 74-87.
- [6] Kaya, K., & Ünsal, A. (2022). Yapay sinir ağlarıyla asenkron motor çoklu arızalarının tespiti ve sınıflandırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1687-1699.
- [7] Romero-Troncoso, R. D. J. (2017). Multirate signal processing to improve FFT-Based analysis for detecting faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(3), 1291-1300.
- [8] Himani, & Dahiya, R. (2018). Condition monitoring of wind turbine for rotor fault detection under non stationary conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2441-2452.
- [9] Lee, C.-Y., Le, T.-A., & Lin, Y. T. (2022). A feature selection approach Hybrid Grey Wolf and Heap-Based optimizer applied in bearing faults. *IEEE Access*, 10, 56691-56705.
- [10] Fan, W., Zhou, Q., Li, J., & Zhu, Z. (2018). A Wavelet-Based statistical approach for monitoring and diagnosis of compound faults with application to rolling bearings. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(4), 1563-1572.
- [11] Bessous, N., Sbaa, S., & Megherbi, A.C. (2019). Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 67(3), 571-582.
- [12] Polat, A., & Yılmaz, A. (2018). Investigation of the effects of eccentricity on induction motor via Multi-Resolution Wavelet Analysis. *Electrica*, 18(2), 187-197.
- [13] Tobi, M. A., Bevan, G., Wallace, P., Harrison, D., & Okedu, K.E. (2021). Faults diagnosis of a centrifugal pump using multilayer perceptron genetic algorithm back propagation and support vector machine with discrete wavelet transform-based feature extraction. *Computational Intelligence*, 37(1), 21-46.
- [14] Chikkam, S., & Singh, S. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using DWT and ANN. *Arab J Sci Eng* 48, 6237–6252.
- [15] Ali, M. Z., Shabbir, M, N. S. K., Liang, X., Zhang, Y., & Hu, T. (2019). Machine learning-based fault diagnosis for single- and multi-faults in induction motors using measured stator currents and vibration signals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2378-2391.
- [16] Dhamande, L. S., & Chaudhari, M. B. (2018). Compound gear-bearing fault feature extraction using statistical features based on time-frequency method. *Measurement*, 125, 63-77.
- [17] Inturi, V., Pratyush, A. S., & Sabareesh, G. R. (2021). Detection of local gear tooth defects on a multistage gearbox operating under fluctuating speeds Using DWT and EMD analysis. *Arab J Sci Eng*, 46, 11999-12008.
- [18] Shi, E. (2022). Single feature extraction method of bearing fault signals based on slope entropy. *Shock and Vibration*, 2022, 6808641.
- [19] Ghosh, A., & Basu, A. (2021). A scale-invariant generalization of the Rényi Entropy, Associated divergences and their optimizations under Tsallis' nonextensive framework. *IEEE Transactions on Information Theory*, 67(4), 2141-2161.
- [20] Tsallis, C. (2022). Entropy. *Encyclopedia*, 2(1), 264-300.
- [21] Göktaş, F. (2023). Robust versions of the lower and upper possibilistic mean-variance models for the one period or two periods cases. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 373-382.
- [22] Guo, Z., Liu, M., Wang, Y., & Qin, H. (2020). A new fault diagnosis classifier for rolling bearing united multi-scale permutation entropy optimize VMD and Cuckoo Search SVM. *IEEE Access*, 8, 153610-153629.
- [23] Yang, Z., Kong, C., Wang, Y., Rong, X., & Wei, L. (2021). Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN. *Computers & Electrical Engineering*, 92, 107070.
- [24] Ünsal, A. (2020). Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1037-1050.
- [25] Han, T., Gong, J. -C., Yang, Q., & An, L. -Z. (2022). Fault Diagnosis of Rolling Bearings Using Dual-Tree Complex Wavelet Packet Transform and Time-Shifted Multiscale Range Entropy. *IEEE Access*, 10, 59308-59326.
- [26] Sharma, S., Tiwari, S. K., & Singh, S. (2021). Integrated approach based on flexible analytical wavelet transform and permutation entropy for fault detection in rotary machines. *Measurement*, 169, 108389.

- [27] Malhotra, A., Minhas, A. S., Singh, S., Zuo, M. J., Kumar, R., & Kankar, P. K. (2021). Bearing fault diagnosis based on flexible analytical wavelet transform and fuzzy entropy approach. *Materials Today: Proceedings*, 43, 629-635.
- [28] Kumar, D., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Hussain, M., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2022). "Triaxial bearing vibration dataset of induction motor under varying load conditions", *Mendeley Data*, V2.
- [29] Zuhaib, M., Shaikh, F. A., Tanweer, W., Alnajim, A. M., Alyahya, S., Khan, S., Usman, M., Islam, M., & Hasan, M. K. (2022). "Faults feature extraction using Discrete Wavelet Transform and Artificial Neural Network for induction motor availability monitoring-Internet of Things enabled environment", *Energies*, 15(21), 7888.
- [30] Khusbaba, R. N., Kodagoda, S., Lal, S., & Dissanayake, G. (2011). "Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58(1), 121-131.
- [31] Erişti, B. (2023). "Dalgacık paket dönüşümü, reliefF özellik seçimi ve topluluk öğrenme algoritması tabanlı bir kısmi deşarj arızası tespit yöntemi", *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 35(2), 505-516.
- [32] Ali, M. Z., & Liang, X. (2020). "Threshold-based induction motors single- and multifaults diagnosis using Discrete Wavelet Transform and measured stator current signal," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 43(3), 136-145.
- [33] Bouzida, A., Touhami, O., Ibtouen, R., Belouchrani, A., Fadel, M., & Rezzoug, A. "Fault diagnosis in industrial induction machines through Discrete Wavelet Transform," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(9), 4385-4395.
- [34] Vashishtha, G., Kumar, R. (2022). "Pelton wheel bucket fault diagnosis using improved Shannon entropy and expectation maximization principal component analysis," *J. Vib. Eng. Technol.* 10, 335–349.
- [35] Sönmez, D. (2013). Asenkron motor rulman arızasının titreşim işaretleri üzerinden entropi tabanlı analizi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü/Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği ABD, İstanbul.
- [36] Huo, Z., Martinez-Harcia, M., Zhang, Y., Yan, R., & Shu, L. (2020). "Entropy Measures in Machine Fault Diagnosis: Insights and Applications", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 2607-2620.
- [37] Renyi, A. (1961). On measures of entropy and information. 4th Berkeley Symposium on Mathematics, Statistics and Probability, 1961, 1, 547-561.
- [38] Crooks, G. A. (2021). On Measures of Entropy and Information. Tech. Note 009 v0.8, <http://threeplusone.com/info>, (10.01.2024).
- [39] Nicolis, O., Mateu, J., & Contreras-Reyes, J. E. (2020). "Wavelet-based entropy measures to characterize two-dimensional fractional brownian fields," *Entropy*, 22(2), 196.
- [40] Tsallis, C. (1988). "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics," *J Stat Phys* 52, 479–487.
- [41] Kumar, D., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Hussain, M., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2022). "Triaxial bearing vibration dataset of induction motor under varying load conditions," *Data in Brief*, 42, 108315.
- [42] Kompella, K. C. D., Mannam, V. G. R., & Rayapudi, S. R. (2016). "DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(3), 411-427.