

Asenkron Motorlu Sistemde Bulanık Mantık Çıkarımı İle Kestirimci Bakım

Erkan Sındır^{1*}, Vedat Özkaner²

^{1*} İskenderun Teknik Üniv. Lisansüstü Eğitim Ens. EEM, İskenderun, Türkiye (sindirerkan@gmail.com) (ORCID: 0000-0002-8568-3474)

² İskenderun Teknik Üniv. Müh. ve Doğa Bil. Fak. EEM, İskenderun, Türkiye (vedat.ozkaner@iste.edu.tr) (ORCID: 0000-0001-8293-0022)

Türkçe Özet – Endüstride çalışan sistemlerin yüksek başarımlı ve süreklilikle çalışması beklenir. Çalışan sistemi oluşturan parçalarda oluşabilecek arızalar, üretim kayıplarına yol açabilmektedir. Endüstriyel sistemlerin hizmet ettiği bütün sektörlerde toplam ekipman etkinliğinin yüksek tutulması bakım çalışmalarının yapılmasını mecbur kılmaktadır. Arıza kaynaklı olan üretim ve iş gücü kayıplarıyla karşılaşmamak için sistemlerde duruşa yol açmadan bakım planlamak gerekmektedir. Bakım planlaması süreçlerinde kendine sağlam yer bulan ve uyarıcı bakım olarak da bilinen kestirimci bakım yöntemi, gereksiz bakım yapılmaması ve bakımsızlık kaynaklı arızaya düşülmemesi gibi açılardan bakıldığında öne çıkmaktadır.

Bu makaledeki çalışmada, asenkron motor çalışırken elde edilen stator akımı, vibrasyon, stator sargı sıcaklığı ve rulman yatak sıcaklığının PLC yardımı ile sahadan toplanmasından sonra zaman etiketli olarak veri tabanına yazılarak hem test verisi oluşturmakta hem de üyelik fonksiyonu değerleri belirlenmesinde kullanılmıştır. Sahadaki motordan toplanan veriler, motor ve enstrüman etiket değerleri ve uzman görüşlerinden yola çıkarak “Matlab Fuzzy Toolbox” uygulaması ile bulanık mantık temelli çıkarım sistemi tasarlanmıştır. Çıkarım sistemine giriş değişkeni olarak verilen test verilerinin uzman görüşleri ve katalog verileri doğrultusunda belirlenmiş kurallar ile değerlendirilmesi sonucu belirlenen çıkış değişkeniyle sistemde çalışan asenkron motorun “motor sağlığı” belirlenmektedir. Bu değer aynı zamanda motor için bakım planlaması ihtiyacını da belirlemektedir.

Bu çalışma arızanın ne olduğundan çok, arızanın yaşanıp yaşanmayacağı ile ilgili bir çıkarım sistemini önermektedir. Endüstriyel üretim yapan işletmeler ilk etapta toplam ekipman etkinliğini artırmayı amaçlar. Plansız duruşların önüne geçmek ister dolayısıyla motordaki arızanın içeriğinden ziyade arızanın gerçekleşme ihtimali daha önemlidir. Literatürde yalnız motor stator akımları, vibrasyon analizi ve termal tabanlı analizler mevcut; burada akım, vibrasyon ve termal açıdan yapılan durum izleme sonucu elde edilen veriler bulanık mantık ile çok açıdan değerlendirilerek bakım ihtiyacı belirlemektedir.

Anahtar Kelimeler – Kestirimci bakım, Bulanık mantık, Asenkron motor, PLC, Matlab

Predictive Maintenance With Fuzzy Logic Inference In An Induction Motor System

Extended Abstract

Industrial systems are expected to operate with high performance and continuity. Failures that may occur in the parts that make up the working system can lead to production losses. The necessity of keeping the total equipment efficiency high in all sectors served by industrial systems necessitates maintenance work. In order to avoid production and labor losses due to malfunctions, it is necessary to plan maintenance without causing downtime in the systems. The predictive maintenance method, which has a strong place in maintenance planning processes, stands out in terms of not performing unnecessary maintenance and avoiding failure due to lack of maintenance.

In this paper, the stator current, vibration, stator winding temperature and bearing housing temperature values obtained during the operating conditions of an induction motor are collected from the field with the help of a PLC, time-labeled and written to a database and then used both to generate test data and to determine membership function values. Based on the data collected from the asynchronous motor operating in the field, motor and instrument label values and expert opinions, a fuzzy logic based inference system was designed with the "Matlab Fuzzy Toolbox" application. The "motor health" of the asynchronous motor operating in the system is determined with the output variable determined as a result of the evaluation of the test data given as input variable to the inference system with the rules determined in line with expert opinions and catalog data. This value also determines the need for maintenance planning for the motor.

This study proposes an inference system about whether the failure will occur or not, rather than what the failure is. Industrial production enterprises aim to increase total equipment efficiency in the first place. They want to prevent unplanned downtime, so the probability of failure is more important than the content of the fault in the motor. In the literature, only motor stator

currents, vibration analysis and thermal based analyses are available; here, the data obtained as a result of current, vibration and thermal condition monitoring are evaluated from multiple perspectives with fuzzy logic to determine the need for maintenance.

Keywords – Predictive Maintenance, Fuzzy Logic, Induction Motor, PLC, Matlab

I. GİRİŞ

Endüstride küçük bir elektrik motorundan başlayıp çok sayıda bölümden oluşan veya birden fazla tahrik ünitesi içeren karmaşık yapılara kadar çok çeşitli sistemler mevcuttur. Kullanılan bu sistemlerdeki pompa, fan, konveyör, kırıcı, karıştırıcı, kompresör vb. uygulamalarda sistem veya makineye tahrik sağlayan birim elektrik motorlarıdır. Makine ve ekipmanda, istenilen harekete dönüştürülecek olan ve bunun için ihtiyaç duyulan dönme hareketi, elektrik motorlarınca sağlanır. Döner mekanizmaları tahrik eden elektrik makinelerinin endüstride en yaygın olarak kullanılanlarından biri de temelleri ve ilk örnekleri birbirlerinden bağımsız olarak Galileo Ferraris ile Nikola Tesla tarafından atılan asenkron motorlardır. Galileo Ferraris, tek fazlı asenkron bir motorun çalışan ilk modelini 1885 yılında ortaya koymuştur [1]. Nikola Tesla'nın ise 1887'de yaparak çalıştırdığı ve 1888 yılında AIEE'de gösterdiği iki fazlı motorunda ise motor karkasına yayılmış bir stator sargısı ve rotorda kısa devre edilmiş bir sargı barındırmaktaydı [2]. İndüksiyon motoru olarak da adlandırılan bu makinelerin çalışmaları esnasında oluşan dönme hareketinin yanı sıra titreşimler de ortaya çıkar. Şebekeden çektikleri akım, stator sargılarından geçtiği için sargıyı oluşturan bakır iletkenleri ısıtır ve stator sargılarının yanı sıra gövde sıcaklığını da oluşturur. Kısaca bahsedilen bu döngüde, bir asenkron motorun çalışma rejiminde sağlığının takip edilebileceği bazı değişkenler mevcuttur. Bunlar; asenkron motorun stator sargı sıcaklığı, rulman yatak sıcaklığı, gövde veya rulman vibrasyonları, motor stator sargılarınca şebekeden çekilen akımlardır.

Üretim, bakım, lojistik vb. hangi sektöre hizmet ederse etsin her sistemin bir kullanım ömrü mevcuttur. Sistemlerin kullanım sürelerini uzatabilmek ve çalışma sürecinin planlandığı gibi işletilebilmesi için bakım yapılmasına ihtiyaç duyulur. Bakım yöntemleri incelendiğinde; ekipmanda arıza gerçekleştiğinde bakım ve onarım yapılan, bu nedenle onarım sırasında üretim kaybının yaşandığı, arızaların zamanla diğer sistemlere de sirayet edebileceği plansız bakımlar ile arıza henüz oluşmadan ve oluşmasını diye yapılan koruyucu, önleyici ve uyarıcı bakımlar olarak alt başlıklarda toplanabilecek planlı bakımlar görülmektedir.

Planlı bakımlar arasındaki uyarıcı yani kestirimci bakım uygulamaları; duruş haricinde üretime veya hizmete ara verilmemesi, gerekmediği halde yapılan bakım yüzünden fazladan maliyetler ortaya çıkmaması gibi dikkat çekici avantajları ile ön plana çıkmaktadırlar.

Üretimin sürekli devam ettiği tesisler için kestirimci bakımın sağladığı erken uyarı oldukça önemlidir. Sistemden toplanan farklı değişkenlere ait veriler, uygun yöntemler ile değerlendirilerek arıza gerçekleşmeden bakım ihtiyacı duyulacağını tahmin eder ve bakım planı hazırlanmasına olanak tanır. Üretim sürecinde arıza kaynağı oluşturabilecek değişkenlerin çoğunun ön tanımsız ve bulanık yapıda olduğu düşünüldüğünde bulanık mantık temelli karar verme süreci de etkin bir şekilde sürece katılmalıdır [3].

Bulanık mantığı literatüre sokan Zadeh, bir şeyin yanlışlık veya doğruluktan ziyade yanlış veya doğru olma oranıyla tanımlanmasını sağlamıştır [4]. İkili mantıkta yer alan mutlak yanlış ve mutlak doğru kavramlarının arasında bulunan ve "biraz doğru" kabulünü de içeren bir geliştirmeyle bulanık mantık kavramı elde edilir [5].

Literatürde vibrasyon takibi ve akım takibi ile asenkron motorlarda kestirimci bakım uygulamak için yapılmış çalışmalar mevcut, her bir çalışma genellikle bir konuya odaklanmış ve çözüm sunmuştur. Agyare ve arkadaşlarını yaptığı çalışmada, bulanık mantık denetleyici kullanılarak hataların tespiti ve sınıflandırılması sunulmaktadır. Stator sargılarında kopma, dönüşten dönüş kısa devre, üç fazdan toprağa ve fazlar arası dengesizlik gibi farklı arıza koşulları bir dizi simülasyon gerçekleştirilerek hatalar yüksek doğrulukla tespit edilebilmiştir [6]. Pharne ve Patil bir bulanık mantık kontrolcüsüyle, motor durumunu titreşim yoluyla izleyen bulanık çıkarım sistemi ile takip edip sağlıklı olup olmadığını gözlemlemektedir, bu sistem kestirimci bakım planlanmasına yardımcı olmaktadır [7]. Tabak ve Özkaymak'ın yaptığı çalışmada elektrik motorlarına endüstride uygulanan bakım yöntemleri en ilkinden en gelişmişe doğru sıralanarak incelenmiştir. Kestirimci bakımın en yaygın kullanılan teknikleri incelenerek uzaktan erişme ve internet gibi sistemlerin kestirimci bakıma olan etkileri irdelenmiştir [8]. Mitrofanı ve arkadaşlarının çalışması ise proses endüstrisinde elektromekanik bakım işlerinin kapsamını tanımlamaya ve optimize etmeye yarayan bulanık mantık temelli bir Karar Destek Sistemi'nin geliştirilmesidir. Hangi ekipmanda hangi tür bakım yapılacağına kararını vermektedir ve sonucun sağlam sonuçlar sağladığını ve diğer yaklaşımların birçok eksikliğini giderdiğini göstermektedir [9]. Mohan ve arkadaşları asenkron motor arızalarının sistematik sınıflandırmasını tartışmış ve motorun stator akımı dikkate alınarak motorun durum izlemesi için bulanık tabanlı çıkarım mekanizması geliştirilmiştir [10]. Drakaki ve arkadaşları asenkron motorların arıza tespiti ve teşhisinin (FD/D) kestirimci bakımındaki son gelişmeler ve eğilimler verilmiştir. İnceleme, son 5 yılda geliştirilen derin öğrenme tabanlı FD/D yöntemlerine odaklanmış ve çok kapsamlı olmayan incelmeye yer verilmiştir [11].

Araştırma çalışmalarının çoğu, belirli arızalar için erken uyarı üzerine yoğunlaşmakta, ancak birden fazla arıza kaynağı açısından incelemeyi ihmal etmektedir. Makale konusunu içeren bu çalışmada ise arıza kaynağı olan değişkenlerin fazlalığından yola çıkarak asenkron motorun izlenmesinde kullanılan parametrelerden akım, vibrasyon, sargı ve rulman sıcaklığından faydalanılmıştır. Belirlenmiş olan bu dört giriş değişkeni ile daha fazla kıstasa bağlı bir bulanık mantık temelli değerlendirme yapacak çıkarım sistemi sunulmuştur. Endüstriyel üretim yapan işletmelerde plansız duruşların önüne geçmek istenilir, yani asenkron motordaki arızanın içeriğinden ziyade arızanın gerçekleşme ihtimali ile ilgilenilir. Önerilen sistem de arızanın içeriğinden çok arızanın ortaya çıkıp çıkmayacağını tespitiyle ilgili bir çıkarım sistemidir.

II. MATERYAL VE METOD

Bulanık mantık temelli çıkarım sisteminin kuralları ile üyelik fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesinde kullanılacak ve sonrasında çıkarım sistemine girdi olarak verilecek sahadan toplanmış veriler, 710kW gücünde 6300V'luk besleme gerilimi ve 84A nominal akım değerine, 0,82 güç faktörüne sahip olan bir orta gerilim asenkron motordan alınmıştır.

Bulanık mantık çıkarım sisteminde akım, vibrasyon, sargı sıcaklığı ve rulman sıcaklığı olmak üzere dört adet giriş değişkeni ve üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Her bir üyelik fonksiyonuna girdi olarak kullanılacak ve sonrasında değerlendirilecek olan veriler sahadan uygun sensörler yardımıyla toplanmıştır.

A. Saha Verilerinin Toplanması

Motorun şebekeden çektiği akım bilgisi; motorun beslediği OG dağıtım merkezinden motora giden güç kablosunun bağlandığı baralara yerleştirilmiş 800/5 oranlı bir akım trafosunun çıkışından sinyal alan Iskra marka MT440 çok işlevli dönüştürücüden alınmıştır [12]. Yerleşik bir mikro denetleyici ile ölçülen değerler PLC'de değerlendirilmek amacıyla 4-20mA olarak analog output çıkışından alınarak PLC'deki analog input sinyal modülüne girilmiştir. Şekil 1'de PLC'ye iletmek için motorun şebekeden çektiği akımın bilgisinin alındığı akım transduceri görülmektedir.



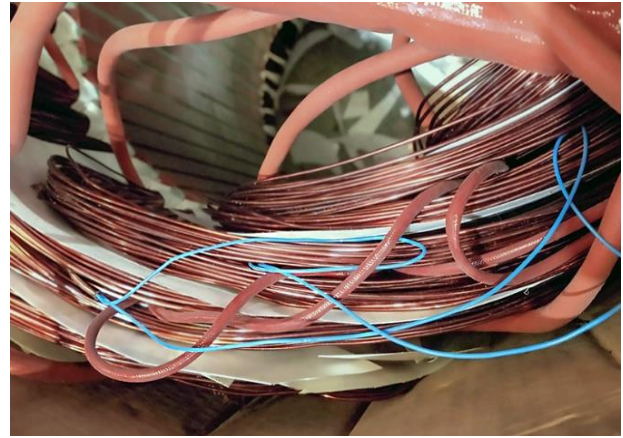
Şekil 1. Akım bilgisinin alındığı iskra marka çok işlevli dönüştürücü

Motor üzerinde bulunan vibrasyon sensörünün ürettiği bilgi Şekil 2'de görülen Hansford Sensors markasına ait 10Hz ile 1kHz frekans bandında tespit yapabilen 0-20 mm/sn ölçüm aralığına sahip, 4-20mA modunda analog veri barındıran akım sinyalini 2 pin MS konnektöre bağlı kablolar üzerinden sinyal modülüne ileten, M8 erkek cıvata ucu sayesinde ölçüm noktasına bağlanan vibrasyon sensörü kullanılmıştır [13]. 4-20mA analog sinyal olarak PLC de ki analog input sinyal modülüne girilmiştir.



Şekil 2. Motor gövdesindeki Hansford marka vibrasyon sensörü

Asenkron motorun nominal çalışma şartlarında dahi stator sargılarından akan akımlar, iletken özdirenci, sargı ve nüvelerde oluşan kaçak akımlar motor gövdesinde ısı olarak ortaya çıkarmaktadır. Motor stator akımı ile stator sargı sıcaklığı arasında pozitif korelasyon vardır yani stator akımları arttıkça motor sargı sıcaklığı da yükselmektedir. Bu sıcaklığın yükselmesi ile belirli eşik değerleri aşıldığında sargı iletkenlerinde vernik gibi izolasyonu sağlayan yalıtım malzemelerinin yapısı bozularak delinme gerilimlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle motor sargı sıcaklıklarının aşırı yükselmesi olası arıza kaynağıdır. Motor sargıları arasına konulmuş olan yüksek hassasiyetli RTD tipi bir sıcaklık sensörü olan PT100 ile elde edilen veriler, dönüştürücüsüyle 4-20mA'e çevrilip PLC'deki analog input sinyal modülüne girilerek scada üzerinden kaydedilmiştir. Şekil 3'te motor sargıları arasına yerleştirilmiş PT100 sensör görülmektedir.



Şekil 3. Motor sargıları arasına PT100 yerleştirilmesi

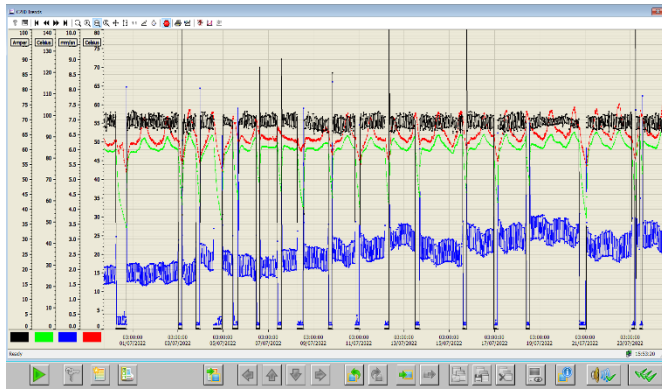
Asenkron motorun rotor mili, motor gövdesinin her iki tarafında birer rulman ile yataklanmıştır. Çalışma süresi, kontrolsüz binen yük, darbe alma, yetersiz yağlama, aşırı yüklenme, aşırı devir sayısı, mil ve yatağının mekaniksel dayanımının az olması vb. gibi nedenlerden dolayı sürtünmenin artması ve krepaj gibi arızalar yaşanabilmektedir. Bu nedenlerin bazılarında dolayı vibrasyondan önce belirtiler sıcaklık yükselmesi olarak da ortaya çıkabilmektedir. Her yönde eşit yaşanan bir sürtünme veya yağlama eksikliği kendisini hemen vibrasyon genliği artışı olarak göstermese bile sürtünmenin sonucunda rulman yatağında ısınma olarak ortaya çıkacaktır. Dönmede birden ortaya çıkan yüksek ısınma durumunda rulman rengi değişir. Isı ile ortaya çıkan tahribat çoğaldıkça rulman bilezikleri, bilyalar ve kafes yumuşayarak erir ve deformasyona sebep olur. Durumun tespiti ve erken önlem alınması kestirimci bakım için önemli bir avantaj olduğundan vibrasyon ile birlikte rulman sıcaklığının da ele alınması elzemdir. Rulman yatak sıcaklığı için RTD tipi sensör olan PT100 ile rulman yatak sıcaklığı bilgisi toplanmıştır.

Şekil 4'te ise RTD tipi bu sensördeki iç direnci PLC'nin analog input sinyal modülüne iletmek için motorun rulman yatağında bulunan PT100 termodirenc sıcaklık sensörünün kılıfı ve kablo bağlantı kutusu birlikte görülmektedir.



Şekil 4. Motor rulman yatak sıcaklığı sensörünün metal koruması ve terminal bağlantı kutusu ile sahadaki uygulaması

Sahadan gelen ve bulanık mantık çıkarım sistemince değerlendirmeye tabi tutulacak olan akım, vibrasyon ve sıcaklık verileri; sensörlerden okunup transducerlar ile PLC’de kullanılan standart olan 4-20mA seviyesine dönüştürülerek PLC’nin analog input girişlerine aktarıldıktan sonra yazılım içerisinde bir veritabanında tutulmaktadır. Data Block adındaki veritabanı dosyasında bulunan ve verinin alındığı zamanla ilişkilendirilmiş bu veriler, Siemens’in Scada uygulaması olan WinCC’nin trend takip özellikleri sayesinde görselleştirilerek takip edilmesi ve yorumlanması kolay bir şekilde operatöre sunulmaktadır. Veriler 1Hz örnekleme frekansında eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Şekil 5’te sahadan gelen dört farklı veri için WinCC’de oluşturulmuş trend grafiğini gösterir uygulama penceresi görülmektedir.



Şekil 5. Akım, vibrasyon ve sıcaklıkların trend grafiği

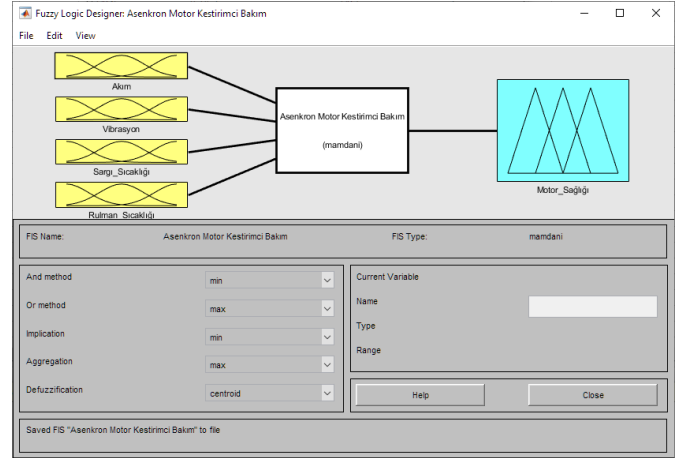
Trend ekranından asenkron motorun vibrasyon, sargı ve rulman sıcaklıkları ile motor stator akımını eş eksenli olan zaman eksenli üzerinde dört farklı renkte belirlenmiş grafik ile takip edebilmekte ve bu grafiğin üzerinden geriye dönük proses verilerini inceleyebilmektedir. Trend grafiğini oluşturan verilerin zamanla ilişkilendirilmiş halde değerlerini dışarıya aktarılması özelliğini kullanarak istenilen aralıktaki veriler Microsoft Excel yazılımı ile okunacak şekilde dışarıya aktarılmıştır.

B. Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi

Çıkarım sisteminin örnekleme Matlab yazılımındaki “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen veriler çıkarım sisteminde test verisi ve üyelik fonksiyonlarının sınırlarının tespitinde kullanılmıştır.

Bulanık mantık çıkarım sistem tasarımında giriş değişkenleri sırasıyla Akım, Vibrasyon, Sargı Sıcaklığı ve

Rulman Sıcaklığıdır. Mamdani çıkarım yöntemi kullanılmış ve çıktı olarak motor sağlığını ve tamlayanı olan kestirimci bakım ihtiyacını gösteren 0-100 arası değer belirlenmiştir.



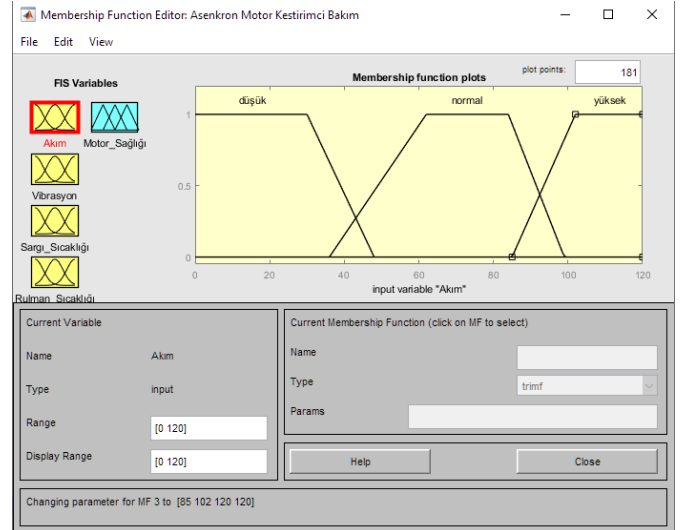
Şekil 6. Bulanık mantık çıkarım sisteminin (fis) tasarımı

Akım parametresinin üyelik fonksiyonu sınırları; asenkron motorun etiketinde yer alan nominal akım değeri ve asenkron motorun stator sargı akımı dengeli çalışma halindeyken sahadan ölçüm yapılarak elde edilmiştir. Şekil 7’de görüldüğü üzere düşük, normal ve yüksek olmak üzere üç ayrı üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.

Düşük = [0 0 30 48]

Normal = [36 62 84 99]

Yüksek = [85 102 120 120]



Şekil 7. Akım değişkeni için bulanık mantık üyelik fonksiyonu

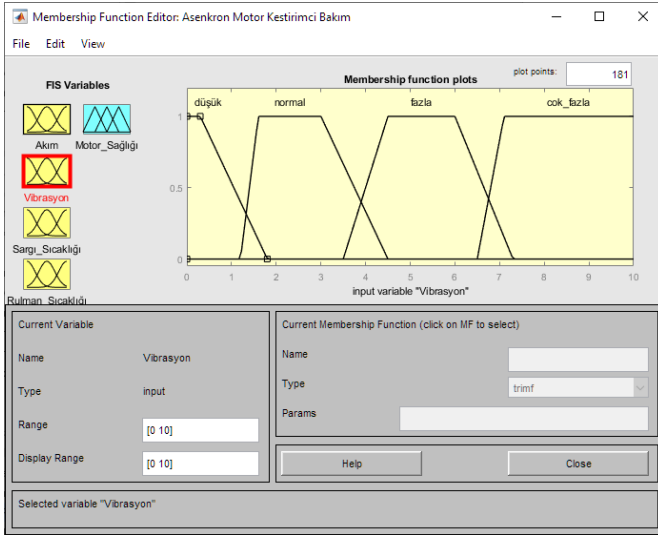
Vibrasyon parametresinin üyelik fonksiyonu değerleri ise ISO10816-3 titreşim şiddeti değerlendirme normu ve motor dengeli çalışma halindeyken yapılan ölçümlerle elde edilen değerler baz alınarak belirlenmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere çok düşük, iyi, yüksek ve çok yüksek olmak üzere dört ayrı üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.

Çok düşük = [0 0 0.3 1.8]

İyi = [1.2 1.6 3 4.5]

Yüksek = [3.5 4.5 6 7.3]

Çok yüksek = [6.5 7.1 10 10]

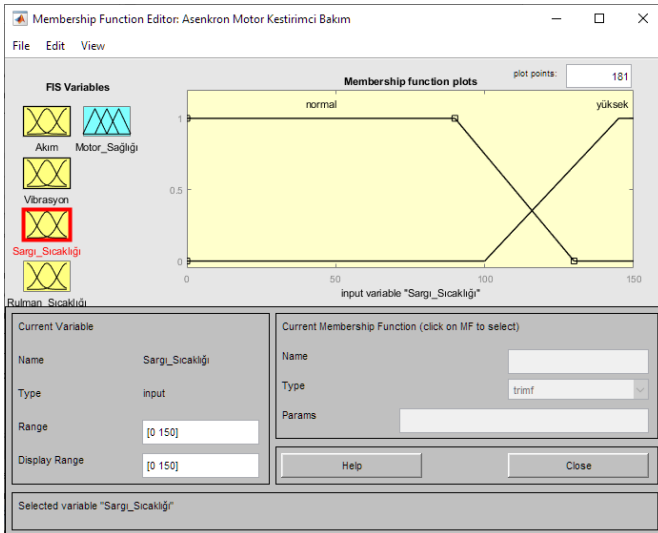


Şekil 8. Vibrasyon değişkeni için bulanık mantık üyelik fonksiyonu

Motor stator sargı sıcaklıklarının değerlendirileceği üyelik fonksiyonun değerleri ise motor etiketindeki F sınıfının karşılığı olacak şekilde elektrik yalıtım malzemelerinin ısı sınıfları açısından farkının ortaya konulduğu ve yalıtım malzemeleri ile yalıtım sistemlerinin ısı dayanımını açıklayan TS EN 60085 standartlarına göre belirlenmiştir. Şekil 9'da görüldüğü üzere normal ve yüksek olmak üzere iki ayrı trapez şeklindeki üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.

Normal = [0 0 90 130]

Yüksek = [100 145 150 150]

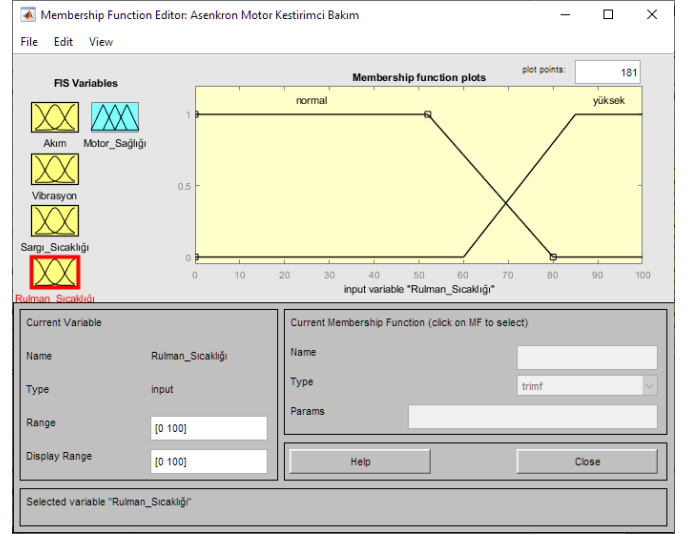


Şekil 9. Stator sargı sıcaklığı değişkeni için bulanık mantık üyelik fonksiyonu

Motorun rulman yatağından alınan, vibrasyona sebebiyet vermeyen ama ısı olarak ortaya çıkıp rulman yatak sıcaklığının artmasına sebep olan, rulman dış bileziğinden veya yatak dış yüzeyinin ölçümü ile elde edilebilen bu sıcaklık çoğunlukla rulmanın çalışmaya başlamasından bir süre sonra sabit durum seviyesine varana kadar yükselir. Bu sıcaklık bilgisinin değerlendirileceği çıkarım sistemindeki üyelik fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesinde yeni değişmiş rulman ile proseste çalışan motorun normal yağlama durumundaki sabit durum sıcaklığı ve dengeli çalışan sistemden alınan veriler baz alınmıştır. Şekil 10'da görüldüğü üzere Normal ve yüksek olmak üzere iki ayrı trapez şeklinde üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.

Normal = [0 0 52 80]

Yüksek = [60 85 100 100]



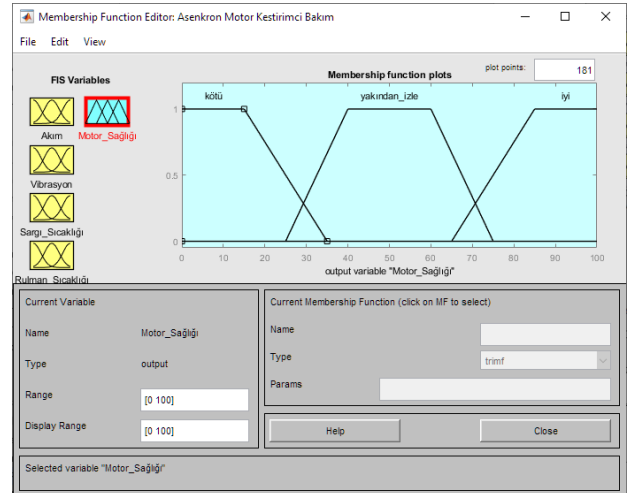
Şekil 10. Rulman yatağı sıcaklığı değişkeni için bulanık mantık üyelik fonksiyonu

BM çıkarım sistemi; girişlerinden elde edilen verilerle çıkarım sisteminin kuralları doğrultusunda belirlenen ve artan değer yönünde motor sağlığı göstergesini, azalan değer yönünde ise bakım ihtiyacını belirleyecek şekilde %0-100 aralığında belirlenmiş üyelik fonksiyonlarından oluşmaktadır. Şekil 11'de görüldüğü üzere kötü, yakından izle, iyi olarak üç ayrı üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere üçü de trapez şeklinde yaklaşık eşit dağılımlı olarak belirlenmiştir. Parametreleri aşağıdaki gibi girilmiştir.

Kötü = [0 0 15 35]

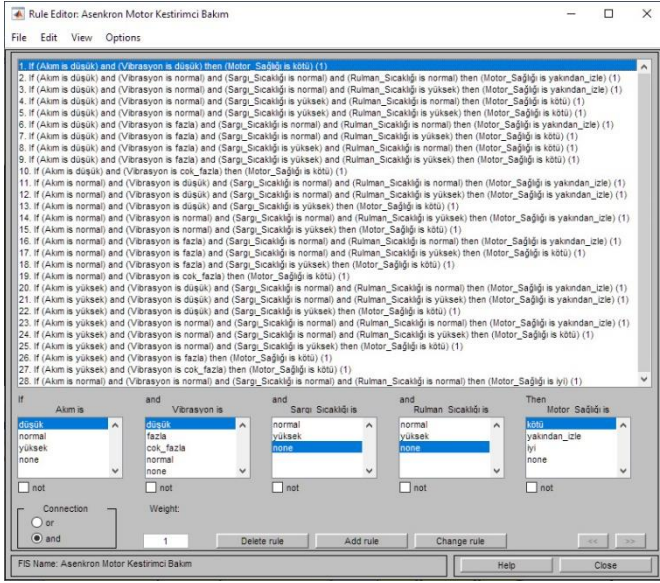
Yakından İzle = [25 40 60 75]

İyi = [65 85 100 100]



Şekil 11. Motor sağlığı ve kestirimci bakım ihtiyacını gösteren çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonu

Belirlenen kurallar, çalışılan sistemle ilgili isabetli ve doğru bilgilerin yorumlanmasıyla tekrar düzenlenebilir. Bu bağlamda hangi değişkenler ne değerleri aldığında motorun sağlığı hakkında nasıl bir değişiklik yapabileceği kurallara dökülmüştür. Bu kurallar ile belirlenen durumlar gerçekleştiğinde insan algısına hitap eden ve tasarımı nispeten kolay olan Mamdani çıkarım yöntemi kullanılarak sonuç üretilir. Şekil 12'de bulanık mantık çıkarım sistemine ait belirlenmiş kurallar görülmektedir.



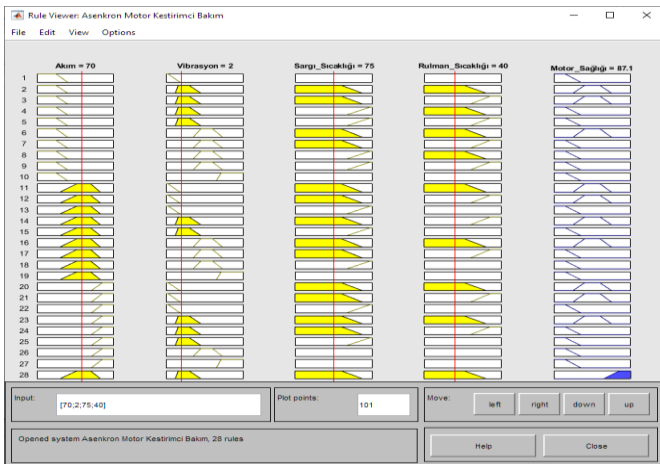
Şekil 12. Bulanık mantık çıkarım sistemi kuralları ekran görüntüsü

III.BULGULAR

Sonuçların kontrol edilebildiği ve giriş değişkenine göre çıkış değişkeninin hangi kurallar üzerinden olduğunu simüle eden Matlab Fuzzy Toolbox'ta bulunan kural görüntüleyici (RuleViewer) Şekil 13'te görülmektedir.

Kural Görüntüleyici, bütün bulanık çıkarım sürecinin bir kerede yorumlanmasına imkân verir. Kural görüntüleyici ayrıca belirli üyelik fonksiyonlarının şeklinin genel sonucu nasıl etkilediğini de görsel olarak sunar. Girilen dört adet giriş değişkenini belirlenen kurallar doğrultusunda değerlendirerek sonucu üretir.

Şekil 13'teki kural görüntüleyici de giriş değişkenleri olan akım, vibrasyon, sargı sıcaklığı ve rulman yatak sıcaklığı için sırasıyla [70;2;75;40] girilmiş ve çıkarım sisteminin sonucunda motor sağlığı olarak 100 üzerinden 87,1 puan çıktı üretmiştir.

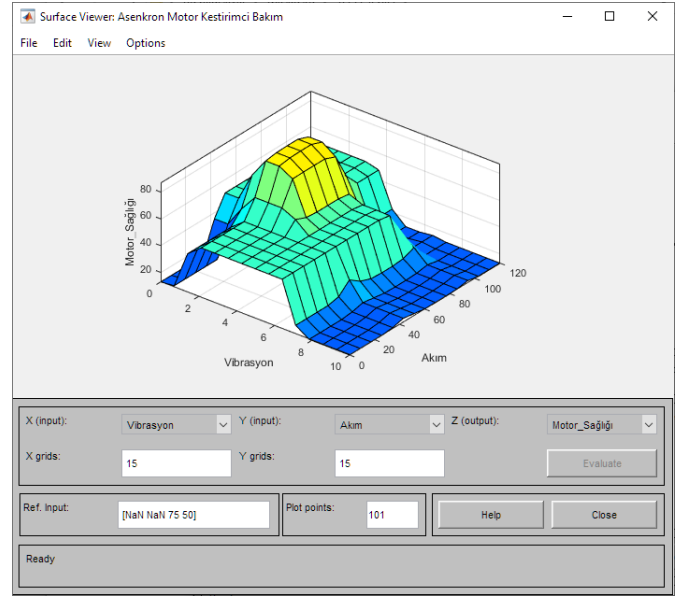


Şekil 13. Kural görüntüleyicide yapılan benzetim ve sonuçları

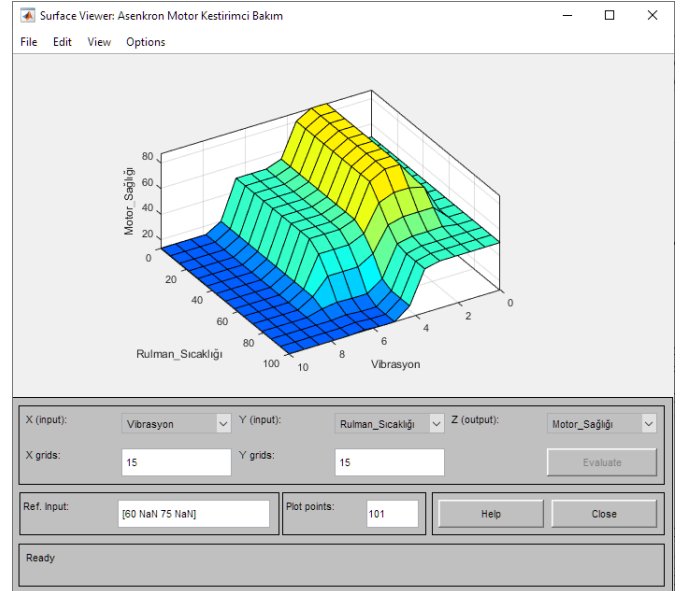
Bulanık mantık çıkarım sistemi ile tasarlanmış sistemin ürettiği sonuçlar üç boyutlu uzayda yüzey görüntüleyici (Surface Viewer) kullanılarak görüntülenebilir. Akım - vibrasyon giriş değişkenlerinin belirlenen kurallar doğrultusunda işlenmesi ile elde edilmiş çıkış değişkeni değerleri ile rulman sıcaklığı - vibrasyon giriş değişkenlerinin konulmuş olan kurallara göre oluşan çıkış değişkenini gösterir

üç boyutlu uzaydaki yüzey görüntüleri sırasıyla Şekil 14'te ve Şekil 15'te görülmektedir.

Bu görsellerde hangi bölgede bakım planı gereksinimi duyulacağı görülmektedir. Sarı bölgeler asenkron motor için sorunsuz çalışma bölgesini, turkuaz bölgeler yakından izleme yapılarak çalışılabilecek girdiler olduğunu, mavi bölge ise acil bakım planlanması gerektiren çok düşük motor sağlığı değerlerini göstermektedir.



Şekil 14. Vibrasyon - akım girişlerine göre çıkış değişkeninin üç boyutlu uzayda yüzey görünümü



Şekil 15. Rulman sıcaklığı - vibrasyon girişlerine göre çıkış değişkeninin üç boyutlu uzayda yüzey görünümü

Bu veri tabanının kaydedilen sahadan alınmış gerçek veriler, çıkarım sistemine girdi olarak verildiğinde giriş değişkenlerinin aldığı değerlere göre asenkron motorun durumunu ortaya koyarak motorun sağlığı için 0 ile 100 arasında bir değer üretmektedir.

Asenkron motorun akım, vibrasyon, yatak sıcaklığı ve rulman yatak sıcaklıkları için sahadan toplanan veriler kullanılarak olası bütün varyasyonları içeren test verisi türetilmiştir. Motorda karşılaşılabilecek bütün durumları simüle etmek için belirlenmiş olan test verileri, bulanık mantık

temelli çıkarım sistemine sokulduğunda sistemin ürettiği çıkış değerleri ve bu değerlerin tanımlamaları Tablo 1'deki gibidir.

Üç boyutlu uzayda sonuçları gösteren “surface viewer” de olduğu gibi sorunsuz çalışma durumu yani “iyi” motor durumu sarı renkle, “yakından izleme” gerektirecek şekilde çıktı üretilen bölümler turkuaz renkle, çok düşük motor sağlığını gösteren ve acil bakım planlaması gerektiren “kötü” değerleri ise mavi renkle işaretlenmiştir.

Tablo 1. Bulanık mantık çıkarım sisteminde giriş değişkenleri ve ürettiği sonuçlara örnekler

| Giriş Değişkenleri | | | | Çıkış Değişkeni | |
|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------|
| Akım (A) | Vibrasyon (mm/sn) | Sargı Sıc. (°C) | Rulman Sıc. (°C) | Motor Sağlığı (%) | Tanı |
| 30.5 | 1.15 | 75.70 | 50.98 | 15.17 | Kötü |
| 38.65 | 0.97 | 80.13 | 51.04 | 19.68 | Kötü |
| 36.55 | 2.33 | 79.68 | 49.66 | 50.42 | Yak. İzle |
| 41.41 | 2.51 | 84.72 | 50.90 | 55.76 | Yak. İzle |
| 39.32 | 2.44 | 85.40 | 77.33 | 53.01 | Yak. İzle |
| 38.45 | 2.51 | 84.84 | 86.11 | 50.00 | Yak. İzle |
| 40.13 | 2.43 | 110 | 50 | 44.91 | Yak. İzle |
| 38.47 | 5.50 | 127.2 | 41.04 | 25.09 | Kötü |
| 38.87 | 4.13 | 105.1 | 49.78 | 47.93 | Yak. İzle |
| 38.78 | 4.27 | 118 | 48.72 | 36.64 | Yak. İzle |
| 38.70 | 5.48 | 85.37 | 90.11 | 14.80 | Kötü |
| 38.61 | 6.31 | 83.29 | 87.13 | 14.78 | Kötü |
| 57.8 | 0.79 | 83.14 | 50.27 | 50.00 | Yak. İzle |
| 60.48 | 1.32 | 92.91 | 88.88 | 50.00 | Yak. İzle |
| 67.54 | 2.31 | 76.15 | 54.52 | 85.78 | İyi |
| 71.13 | 2.78 | 82.13 | 91.13 | 50.00 | Yak. İzle |
| 75.65 | 3.26 | 109.34 | 67.8 | 57.40 | Yak. İzle |
| 80.55 | 4.59 | 86.14 | 53.17 | 50.00 | Yak. İzle |
| 86.75 | 5.46 | 91.31 | 84.48 | 13.45 | Kötü |
| 89.77 | 6.11 | 67.15 | 52.54 | 50.00 | Yak. İzle |
| 92.3 | 6.75 | 81.13 | 95.23 | 15.21 | Kötü |
| 93.7 | 7.12 | 75.55 | 47.11 | 25.96 | Kötü |
| 87.3 | 7.73 | 88.45 | 45.45 | 13.57 | Kötü |
| 94.65 | 1.30 | 74.13 | 55.39 | 61.53 | Yak. İzle |
| 95.04 | 1.71 | 75.55 | 97.25 | 35.13 | Yak. İzle |
| 97.22 | 2.23 | 95.45 | 51.33 | 58.39 | Yak. İzle |
| 98.14 | 3.52 | 92.34 | 94.55 | 26.45 | Kötü |
| 99.25 | 4.46 | 80.13 | 51.04 | 24.25 | Kötü |
| 99.62 | 5.10 | 79.68 | 49.66 | 21.46 | Kötü |
| 101.1 | 7.13 | 84.72 | 50.9 | 16.27 | Kötü |
| 117.50 | 8.55 | 85.4 | 77.33 | 12.90 | Kötü |
| 51.81 | 3.63 | 100.11 | 54.5 | 71.47 | İyi |
| 77.33 | 3.76 | 83.45 | 60.76 | 67.54 | Yak. İzle |
| 81.12 | 4.213 | 64.85 | 42.74 | 55.75 | Yak. İzle |
| 91.67 | 2.86 | 105.74 | 46.98 | 67.57 | Yak. İzle |

IV. TARTIŞMA

Sadece motor stator akımları veya vibrasyon analizi ile bulanık mantık temelli çıkarım yapan sistem tasarımları literatürde mevcut. Sahadan gelen akım ve vibrasyon bilgilerini içeren analog verinin hangi aralığa girdiğini belirleyip bu veriyi anlamlandırmak amaçlı yapılan çalışmalar bu çalışmada bir araya getirilmiştir. Üzerine stator sargısı ve

rulman yatağı için termal açıdan da analiz yapılabilecek şekilde sıcaklıklar da çıkarım sistemine giriş değişkeni olarak eklenmiştir. Dört giriş değişkeniyle kurulan bulanık mantık temelli çıkarım sistemi sayesinde asenkron motorun sağlığını belirlemesi ve bu doğrultuda yaşanması muhtemel bir arızanın öncesinde bakım ihtiyacının belirlenmesi sağlanmış olmaktadır.

Çıkarım sisteminin tasarımı veya uygulamanın yapılması sırasında matematiksel bir modele ihtiyaç duyulmadan gerçek saha verileri toplanarak yapılmıştır. Her bir giriş değişkeni verisinin sabit sınır değerleri ile değil bulanık mantığın her iki grubun sınırına ne derece yakın olduğuna bakarak bu dört verinin de analizinin daha gerçekçi yapılmasını sağlamıştır.

V. SONUÇ

Endüstride; üretimin sürekliliğinin sağlanması, plansız duruşların en düşük seviyede tutulması hatta hiç olmaması ve ekipmanların üretim sürekliliğinin artırılması için gerekli olan bakım prosedürlerinin gerçekleşmesinde harcanan maliyetlerinin düşüklüğü önem arz etmektedir. Bu bağlamda yapılmış literatürdeki çalışmalarda asenkron motorların; akım analizi, vibrasyon analizi gibi yöntemlerle arıza öncesi motorun arızasının ne olduğunun tespiti ve bu minvalde erken uyarı üzerine kuruludur.

Bu çalışmada bulanık mantık temelli olarak uygulanan çıkarım sisteminde ise sistem operatörlerinin halihazırda çalışan sistemin verilerini takip ettiği Scada HMI sistemlerinde gözden kaçırdıkları, takip etmedikleri, aradaki küçük değişimleri fark etmediği proses verilerinin, araya insan faktörü girmeden insanın muhakemesine en yakın kabul edilen bulanık mantık ile değerlendirilmiştir. Çalışan sistemdeki sensörlerden alınan bilgilerin ortaya koyduğu göstergeler sistemin arızaya geçme ve arızadan dolayı duruşa sebebiyet verme yolunda olduğu hakkında ipuçları verecektir. Asenkron motordan veya tahrik ettiği sistemden kaynaklı olası arızayı vermeden önce fark edilmesi sistemin en önemli özelliğidir.

Arıza içeriğinden ziyade, arızanın yaşanıp yaşanmayacağı ile alakalı bir çıkarım sistemidir. Endüstriyel üretim yapan işletmeler ilk etapta toplam ekipman etkinliğini artırmayı amaçlar. Plansız duruşların önüne geçmek ister dolayısıyla motordaki arızanın içeriğinden ziyade arızanın gerçekleşme ihtimali daha önemlidir. Uygulanan bulanık mantık temelli çıkarım sisteminde giriş değişkenlerinden yola çıkarak motorun sağlığı ile ilgili üretilen çıktıdan bakım ihtiyacı belirlenebilmektedir. Kestirimci bakım sayesinde olası arıza gerçekleşmeden önlem alabilmenin ve bununla birlikte üretim kaybı ve bakım maliyetinin düşmesi sağlanabilecektir.

Bulanık mantık temelli çıkarım sistemi tarafından bakım ihtiyacı gerektirdiği tespit edilen yani motor sağlığının düşük çıktığı durumlarda ilk fırsata yapılan planlama ile bakım ihtiyacının büyüklüğüne göre ya bakım yapıp geri devreye alarak ya da motorun hazır bakımlı yedeği ile değiştirilmesi sonucu üretime hızlıca devam edilmesi sağlanmış olacaktır.

Gelecek çalışmalarda bir bulanık mantık denetleyicisi tasarlanarak sistemden alınan veriler canlı olarak değerlendirilerek endüstriyel anlamda da kullanılabilir hale getirilebilir. Asenkron motorun stator akımı verileri üç faz olarak değerlendirilip fazlar arasındaki akım farkları sisteme giriş değişkeni olarak eklenebilir. Bu sayede motor stator akımlarının arasındaki farktan kaynaklı arızaların da duruşa sebebiyet vermemesi için çıkarım sistemine dahil edilmiş olur.

KAYNAKLAR

- [1] Ferraris G., Alternatif akımla elektromanyetik rotasyon, *Electrician*, cilt 36, pp. 360-75, 1885.
- [2] Boldea I., *The Induction Machine Hand Book*, New York: CRC Press, 2002.
- [3] Mete M., Bakım Yönetiminde Bulanık Çok Amaçlı Karar Verme Modeli, *İstanbul Üniversitesi FBE*, p. 1, 2007.
- [4] Zadeh L. A., Fuzzy sets, *Information and control.*, cilt 3, no. 8, pp. 338-353, 1965.
- [5] Yılmaz E. ve Aslan T., Bulanık Mantık Yöntemi ile Belirsizlik Şartlarında Faaliyet-Hacim Kar Analizi, *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 2018.
- [6] Agyare O.R., Asiedu A.B. and Biney A.R., Fuzzy Logic Based Condition Monitoring of a 3-Phase Induction Motor,» *IEEE Africon*, Accra, Ghana, 2019.
- [7] Pharne S. and Patil A., Fault Diagnosis of Motor using Fuzzy Logic Technique, *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing*, 2017.
- [8] Tabak A. ve Özkaymak M., Elektrik Motorlarında Uygulanan Bakım Yöntemlerinin İncelenmesi, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 8, no. 4, pp. 889-905, 2020.
- [9] Mitrofani A., Emiris M. and Koulouriotis E., An Industrial Maintenance Decision Support System based on Fuzzy Inference to Optimize Scope Definition, *30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Athens, Greece, 2020.
- [10] Mohan S, Kumar M, Harikrishna K and Sridhar P. Study of Protection, Fault and Condition Monitoring of Induction Motor, *Soft Computing Techniques and Applications* pp 121–130, 2020
- [11] Drakaki M.,Karnavas y., Tzionas P. And Chasiotis I. Recent Developments Towards Industry 4.0 Oriented Predictive Maintenance in Induction Motors, *International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, *Procedia Computer Science*, 2021
- [12] Iskra, Measuring Transducer, Multifunction Transducer MT440, 2018. [Çevrimiçi] Available: https://www.iskra.eu/f/docs/96777/MT_440_technical_documentation.pdf. [Erişim: 18 07 2022].
- [13] Hansford Sensors, HS-420 Accelerometer, 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.hansfordsensors.com/wp-content/uploads/datasheets/TS029.pdf>. [Erişim: 18 07 2022].