



Bulanık mantık yöntemi ve yapay sinir ağları kullanılarak farklı kokuların sınıflandırılması

Classification of different odors using fuzzy logic method and artificial neural network

Ümit Öz sandıkcıoğlu^{1*} , Bilal Talha Ayvaz¹ , Ayten Atasoy¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
umitozsandickci@ktu.edu.tr, talhaayvaz@ktu.edu.tr, ayten@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.02.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 19.12.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 18.12.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.68623
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada 8 adet metal oksit gaz sensörü kullanılarak gerçekleştirilen bir elektronik burun devresi kullanılarak 9 farklı maddenin (yumurta, çürük yumurta, nane, naftalin, limon, melek otu kökü, aseton, oje ve gül suyu) ayırt edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada veri sınıflandırma için bulanık mantık yöntemi ve yapay sinir ağları kullanılmıştır. Yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen veri sınıflandırma işleminde farklı ağ mimarileri kullanılarak sınıflandırma performansları incelenmiştir. Bulanık mantık yöntemiyle gerçekleştirilen sınıflandırma işleminde ise kullanılan farklı üyelik fonksiyonları ile sınıflandırma doğruluğu artırılmaya çalışılmıştır. Yapay sinir ağları ile yapılan sınıflandırma işleminde gizli katman ve çıktı katmanında sırasıyla logaritmik sigmoid ve hiperbolik tanjant fonksiyonları kullanılarak %96.41 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. En yüksek sınıflandırma doğruluğunun elde edildiği bu yapay sinir ağının gizli katmanında 8 adet yapay sinir hücresi kullanılmıştır. Bulanık mantık yöntemi ile yapılan sınıflandırma işleminde ise çan üyelik fonksiyonunun kullanılmasıyla sınıflandırma doğruluğu %95.55 olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektronik burun, Veri boyutu indirgeme, Yapay sinir ağları, Bulanık mantık yöntemi, Veri sınıflandırma.

Abstract

In this study, 9 different substances (egg, rotten egg, mint, naphthalene, lemon, angelica root, acetone, nail polish and rose water) were distinguished by using an electronic nose using 8 metal oxide gas sensors. In the study, fuzzy logic method and artificial neural networks were used for data classification. In the data classification process performed using artificial neural networks, the classification performances were examined using different network architectures. In the classification process carried out with the fuzzy logic method, an attempt was made to increase the classification accuracy with the different membership functions used. In the classification process performed with artificial neural networks, 96.41% classification accuracy was achieved by using logarithmic sigmoid and hyperbolic tangent functions in the hidden layer and output layer, respectively. 8 artificial nerve cells were used in the hidden layer of this artificial neural network, where the highest accuracy value was achieved. In the classification process carried out with the fuzzy logic method, the classification accuracy was achieved as 95.55% by using the bell membership function.

Keywords: Electronic nose, Data dimension reduction, Artificial neural network, Fuzzy logic method, Data classification.

1 Giriş

Elektronik burun, insan koku alma mekanizması ilham alınarak özel olarak tasarlanmış bir tür elektronik devredir. Bu elektronik devre kokuları algılamak için tasarlanmış sensör dizisinden oluşmaktadır. Her biri birbirinden farklı olan bu sensörler, farklı gazlara maruz kaldıklarında farklı elektriksel tepkiler verirler. Bu sayede kokunun ve içinde barındırdığı uçucu organik bileşiklerin türü anlaşılır [1]. Elektronik burunlar, bir kokuyu tanımlamanın yanı sıra incelenen madde içindeki bileşenlerin oranını ve kokuların hangi sınıflara dâhil olduğunu algılayabilen cihazlardır [2].

İnsan burnu sahip olduğu birçok özelliklerinden dolayı elektronik burundan üstün olmasına rağmen, bazı konularda elektronik burunların üstünlüğü ön plana çıkmaktadır. İnsan burnu, yapısında bulunan koku reseptörleriyle yaklaşık 10000 adet farklı kokuyu ayırt edebilir ancak karbon monoksit ve karbondioksit gibi gazları algılayamamaktadır. Ayrıca insan burnu belirli bir kokuya uzun süre maruz kaldığında yorulma olarak ifade edilen durum gerçekleşir ve ilgili koku algılayamaz. Elektronik burunlar ise yapılarında bulunan

kimyasal sensörler yardımıyla aynı kokuyu uzun süre algılayabilmektedirler [3].

Gelişen sensör teknolojisi sayesinde elektronik burunların olumlu performansı araştırmacıların dikkatini çekmiş ve bu cihazlar üzerinde çeşitli alanlarda birçok araştırma yapılmıştır. Elektronik burunlar yiyecek ve içecek endüstrisinde, tarım ve ormancılıkta, tıp ve sağlıkta, iç ve dış mekân izleme uygulamalarında, askeri ve sivil güvenlik, ürün paketleme, kozmetik ve daha birçok alanda yaygın bir cihaz haline gelmiştir. Elektronik burun ile ilgili araştırma konuları özellikle gıda endüstrisinde önemli ölçüde artmıştır [4]. Gıdaların bozulması ve çürümesi kaynak israfına yol açmaktadır. Gıda ürünlerindeki bozulmanın belirlenmesi elektronik burunlar aracılığıyla mümkündür. Bozulmuş yiyecekler elektronik burun tarafından algılanabilen uçucu organik bileşikler açığa çıkarır. Bu sayede kokunun ve içinde barındırdığı uçucu organik bileşiklerin türü tespit edilebilir. Bu konuyla ilgili olarak Timsorn ve diğ. yaptıkları çalışmada tavuk eti tazeliliğini ve içeriğinde oluşabilecek mikroorganizma popülasyonunu 4 °C ve 30 °C'de 5 güne kadar incelemek amacıyla yapısında metal oksit gaz sensörleri (MOS) bulunan bir elektronik burun tasarlamışlardır. Farklı depolama

*Yazışılan yazar/Corresponding author

sıcaklıkları ve günlere göre tavuk eti tazeliğinin sınıflandırılmasında temel bileşen analizi (TBA) kullanılırken, mikroorganizma popülasyonu değerlendirmesi için yapay sinir ağı (YSA) algoritmasını kullanmışlardır [5]. Viejo ve diğ. 9 adet gaz sensörü kullanarak gerçekleştirdikleri elektronik burun ile biralaların sahip olduğu aroma miktarlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarında gaz kromatografisi kütle spektrometresi cihazından elde ettikleri veriler ile elektronik burundan toplanan verileri yapay sinir ağıları kullanarak karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar çalışmaları sonucunda en yüksek $R=0.97$ korelasyon katsayısına sahip sınıflandırma başarısı elde etmişlerdir [6].

Elektronik burunlarla ilgili botanik ve tarım alanında da önemli çalışmalara rastlanmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak Lin ve diğ. yaptıkları çalışmada tütündeki nikotin alkaloid seviyelerini kontrol etmek için yapısında 18 adet MOS içeren bir elektronik burun kullanmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar veri işleme ve sınıflandırma yöntemi olarak TBA ve kısmi en küçük kareler regresyon yöntemi (KEKR) analizi kullanmışlardır [7]. Zhang ve diğ. elektronik burun, gaz kromatografisi-kütle spektrometresi ve mikrobiyom analizini kullanarak entegre bir yaklaşım kullanarak altı ayrı puro yetiştirme bölgesinden elde edilen dolgu tütün yapraklarının aroma özelliklerini ve mikrobiyal bileşimini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda araştırmacılar aromaların ve fermentasyon süreçlerinin doğru bir şekilde belirlenmesinin tütün kalitesini artıracak ve kaliteli puro tütünü üretimiyle ilgili sektörün geleceğinin önerisinde bulunmuşlardır [8].

Sağlık alanında elektronik burun teknolojisi belirli hastalıkların teşhisinde alternatif, hızlı ve uygun maliyetli çözümler sunmaktadır. Öz sandıkçıoğlu ve diğ. iki farklı gaz sensörü tabanlı elektronik burun kullanarak nefes analizi yoluyla akciğer kanserinin tespitine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 14 adet kuvars kristal mikrobals ve 8 adet MOS kullanarak geliştirdikleri elektronik burun ile toplamda 100 gönüllüden topladıkları nefes örnekleriyle deneyler gerçekleştirmişlerdir. Farklı sınıflandırma ve boyut indirgeme algoritmalarının kullanıldığı bu çalışmada araştırmacılar hasta ve sağlıklı gönüllülere ilişkin nefes örneklerini %95.36 doğruluk değeri ile sınıflandırabilmişlerdir [9].

Voss ve diğ. yaptıkları çalışmada esrar tüketimi nedeniyle insan vücudundaki koku değişikliklerini tespit etmek için bir elektronik burun sistemi geliştirmişlerdir. Örnekler, 20'si esrar içen ve 20'si tütün içen olmak üzere 40 gönüllüden toplanmış ve elde edilen numuneler ile yapılan sınıflandırmada Destek Vektör Makinaları Yöntemi (DVM) yöntemi ile %92.5, TBA yöntemi ile %70 doğruluk değeri elde edilmiştir [10].

Hava kirliliği, modern dünyanın en önemli sorunlarından biridir. Tehlikeli kimyasallar ciddi hastalıklara neden olabilir ve yaşam kalitesini düşürebilir [11]. Ayrıca kanalizasyon ve atık su arıtma tesislerinden yayılan koku miktarının azaltılması da önemli bir konudur [12]. Metal oksit gaz sensörleri, sıcaklık sensörleri ve nem sensörleri kullanılarak iç mekân hava kalitesini gözlemlemek amacıyla Mumyakkmaz ve diğ. tarafından bir elektronik burun sistemi geliştirilmiştir [13]. Üç adet YSA modeli, Levenberg-Marquardt algoritmasıyla eğitilmiş ve bu sistem hidrojen gazı karışığında bile metan ve karbon dioksit gazlarının konsantrasyon seviyelerini başarılı bir şekilde tespit edip tahmin edebilmiştir. Bax ve diğ. çalışmalarında kullandıkları ticari bir elektronik burun ile araba lastiği depolama alanından yayılan gazları

incelemişlerdir. Bu tür ortamlarda yayılan gaz yoğunluğu belli bir model ile tespit edilememesi nedeniyle elektronik cihazlar ile takip edilmesi önemlidir. Araştırmacıların bu çalışması hem ulusal hem de Avrupa düzeyinde standardizasyon üzerinde çalışan teknik grupları desteklemek amacıyla deneysel veriler sağlamak amacıyla sahada performans testi için bir protokol önermektedir [14].

Elektronik burunlar ülkelerin ulusal hava güvenliği ve kapalı alan izlenmesi uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bakiler ve diğ. 4 adet MOS yardımıyla dört adet farklı gazın konsantrasyon seviyelerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar verilerin sınıflandırılmasından önce farklı veri işleme teknikleri kullanmışlar ve farklı sınıflandırma algoritmaları kullanarak sistemin performansını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda incelenen gazların konsantrasyon seviyeleri DVM kullanılarak %90.8 doğruluk oranıyla tespit edilebilmiştir [15].

Wu ve diğ. geliştirdikleri MOS tabanlı elektronik burun ile yüksek yanıcılık değerine sahip 5 adet sıvıyı (etanol, tetrahidrofuran, terebentin, cila tineri ve benzin) incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında kullandıkları iki farklı teknik olan temel bileşen analizi ve yapay sinir analizini performanslarını incelemiş ve yapay sinir ağlarının daha başarılı sonuçlar ürettiğini belirlemişlerdir. Bu işlemlere ek olarak sistemin anti parazit eğitimi sayesinde sivrisinek kovucu, parfüm ve saç jölesinden kaynaklanan potansiyel yanlış alarmları filtreleyebildiğini belirlemişlerdir [16].

Elektronik burun teknolojisi çevresel ve ekonomik açıdan giderek büyüyen bir sorun olan gıda israfının azaltılmasında da kullanılabilir [17]. Akıllı paketleme araçları kullanılarak ürünlerin raf ömrü uzatılabilir ve bu sayede gıda israfı azaltılabilir. Literatürde tazeliğin izlenmesine yönelik akıllı paketleme sistemleriyle ilgili birçok araştırma bulunmaktadır [18].

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde YSA ve Bulanık Mantık Yönteminin (BMY) bir sınıflandırma problemi üzerinde birlikte kullanıldığı çalışmalar sınırlıdır. Literatürde BMY destekli çalışmalar bulunmakla birlikte, bu yöntemin elektronik burun verilerinin sınıflandırılması için kullanıldığı çalışma olarak Sundic ve diğ. çalışması göze çarpmaktadır [19]. Araştırmacılar kullandıkları elektronik burun ve elektronik dil ile 4 farklı tazelikte patates cipslerini ve 7 farklı çeşitte patates kremasını sınıflandırmışlardır. Bu çalışmadan farklı olarak geliştirdiğimiz elektronik burun ile yumurta, çürük yumurta, oje, aseton, limon, melek otu kökü, nane, gül suyu ve naftalin olmak üzere 9 farklı koku sınıflandırılmıştır. Koku örneklerinden anlaşıldığı üzere çalışmamızda kullanılan kokular arasında yiyecek içecek, kozmetik ve baharat çeşitleri bulunmaktadır. Farklı uygulama alanlarına dahil olan bu 9 adet kokunun başarılı şekilde sınıflandırılması hem çalışmamızı literatürdeki benzer çalışmalardan ayırmakta hem de geliştirilen elektronik burun devresinin uygulamada birçok alanda kullanılabilme potansiyelini ortaya koymaktadır.

2 Materyal ve yöntemler

Bu çalışmada 8 adet MOS sensör kullanılarak geliştirilen elektronik burun kullanılarak 9 farklı koku ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir koku ile deneyler ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Örneğin, önce nane kokusu ile 15 adet deney yapılmış, ardından nane kokusu yerine sensör haznesine farklı bir koku yerleştirilerek deneylere devam

edilmiştir. Bu şekilde, her bir koku için 15 deney yapılmış ve toplamda 135 deney tamamlanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen verileri sınıflandırmak için YSA ve BMY sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma boyunca, farklı mimari yapılarla YSA'nın gizli ve çıktı katmanlarında farklı aktivasyon fonksiyonlarının kullanımının sınıflandırma doğruluğunu nasıl etkilediği incelenmiştir. YSA'ya ek olarak BMY de kullanılmış ve çeşitli üyelik fonksiyonlarının kullanımının sınıflandırma doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. Sınıflandırma doğruluğunu değerlendirmek için örüntü tanıma biriminde 5 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümün devamında deney sırasında kullanılan elektronik burun düzeneği ve kullanılan materyaller detaylıca tanıtılmış, veri ön işleme kısmında uygulanan yöntemler anlatılmış ve sınıflandırma aşaması hakkında bilgiler verilmiştir.

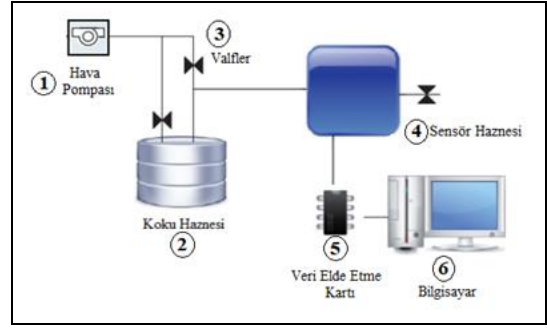
2.1 Elektronik burun düzeneği

Şekil 1 ve Şekil 2' de sırasıyla, kullanılan elektronik burna ait blok diyagramı ve deney düzeneği verilmektedir. Elektronik burun düzeneğinde iki adet hava pompası, beş adet selenoid valf, hava iletimi için teflon borular, numune haznesi, sensör haznesi, veri toplama kartı ve bir adet bilgisayar bulunmaktadır. Sensör haznesinde farklı kimyasalları ayırt etmek için kullanılan sekiz adet MOS bulunmaktadır. Kullanılan 8 adet metal oksit sensör, TGS 880, TGS 826, TGS 825, TGS 830, TGS 2620, TGS 2602, TGS 2610 ve TGS 2104 sensörleridir.

Sensör haznesine yerleştirilen sensörlerden elde edilen veriler National Instrument DAQ 6259 veri toplama kartı ile bilgisayara aktarılmıştır. Yapılan bu işlemde örnekleme frekansı 100 Hz'dir. Kullanılan örnekleme frekansının değeri elektronik burun devresinin geliştirilme aşamasında belirlenmiştir. Bu aşamada farklı örnekleme frekansları ile deneyler gerçekleştirilerek veriler kaydedilmiştir. Elde edilen işaretlerin incelenmesi sonucu 100 Hz örnekleme frekansının kullanılmasıyla herhangi bir bilgi kaybı olmadan sensörlerden veri elde etmenin uygun olduğuna karar verilmiştir. Kullanılan sensörlere ait hedef gazlar ve bu sensörlere seri bağlı yük dirençlerinin değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

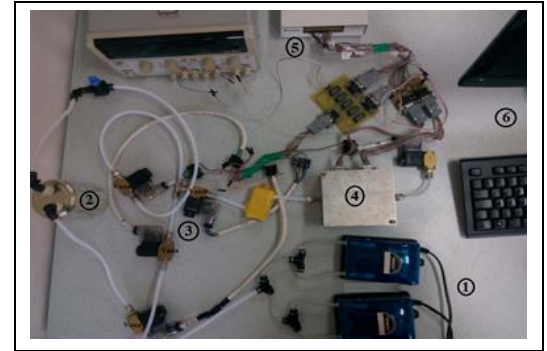
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler 4 aşamadan oluşmaktadır. Sistem ilk aşamada 130 sn. boyunca kuru hava ile temizlenir. İlk temizlemenin ardından örnek koku hava pompası kullanılarak 30 sn. boyunca sensör haznesine doğru itilir. Ardından sensör haznesinde bulunan sensörlerin sürekli duruma ulaşmaları ve hapsedilen örnek kokuya tepki vermesi için 30 sn. boyunca tüm valfler kapalı durumda beklenir.

Son olarak 410 sn. boyunca tüm sistem hava pompaları kullanılarak temizlenerek bir sonraki deneye hazır hale getirilir. Deney aşamalarının sürelerini belirlemek için farklı sürelerde deneyler yapılmış ve deney sonuçları incelenmiştir. Bu incelemelerin ardından, deney aşamalarının süreleri, sensör tepkelerinin kararlı hale gelme süresi olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 1. Elektronik burun blok diyagramı.

Figure 1. Electronic nose block diagram.



Şekil 2. Elektronik burun deney düzeneği.

Figure 2. Electronic nose experimental setup.

Örneğin temizleme aşamasında sensör tepkeleri kararlı hale geldikten sonra temizlik devam etse dahi sensörlerden alınan işaretin genlik seviyesinde bir değişiklik olmamaktadır. Benzer şekilde, sensörlere koku uygulanıp sensör tepkeleri kararlı hale geldikten sonra da (en büyük değerine ulaştığında) elde edilen işaretin genliğinde bir değişim olmamaktadır. Bu durumda deney süresini gereksiz yere uzatmamak için deneyin bir sonraki aşamasına geçilmesinin uygun olacağına karar verilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında yukarıda verilen deney aşamalarının süreleri üzerinde karar kılınmış ve deney süresi oluşturulmuştur.

2.2 Veri analizi ve ön işleme

Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen verilerden özneliteler çıkarılmadan önce veriler üzerinde bazı ön işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerden ilki deney sonucu elde edilen veriden taşıyıcı gazın etkisini çıkarmaktır. Bu işlem ile üzerinde referans düzeltme işlemi yapılacak fark sinyali elde edilir. Taşıyıcı gazın etkisinin sensör verisinden çıkarılması Eşitlik (1) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$V_D(t) = V_S(t) - V_T(t) \quad (1)$$

Tablo 1. Kullanılan sensörlerin hedef gazları ve yük dirençleri.

Table 1. Target gases and load resistances of the sensors used.

Sensör İsmi	TGS825	TGS826	TGS830	TGS880	TGS2104	TGS2602	TGS2610	TGS2620
Direnç (kΩ)	8.74	5.611	3.952	5.194	4.834	3.565	7.6	2.902
Hedef Gazlar	Hidrojen sülfid	Amonyak	R-113 R-22	Hidrojen amonyak	Egzoz gazları	Uçucu ve organik bileşikler, kokulu gazlar	Propan, bütan	Etanol, metanol

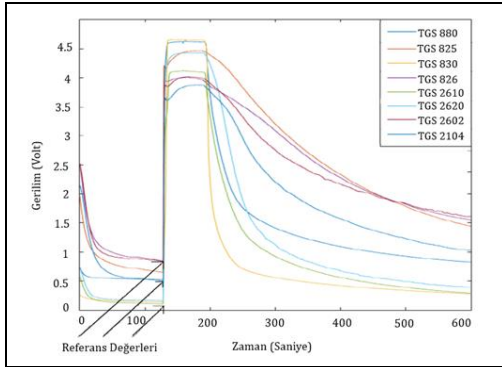
Eşitlik (1)'deki $V_D(t)$, $V_S(t)$ ve $V_T(t)$ sırasıyla fark sinyali, örneklenen kokuya ait sensör tepkisi ve taşıyıcı gazı temsil etmektedir. Bu denklem ile elde edilen fark sinyalini doğru bir şekilde görselleştirmek ve bu sinyallerden anlamlı bilgiler elde etmek için metal oksit gaz sensörlerinden alınan verilere (2) denklemi kullanılarak referans düzeltme işlemi uygulanmıştır.

$$V_{DB}(t) = V_D(t) - V_D(0) \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de $V_{DB}(t)$ ve $V_D(0)$ sırasıyla referansı düzenlenmiş sinyali ve fark sinyalinin koku uygulandığı ilk andaki değerini temsil etmektedir. Referansı düzeltilmiş işaret, ilgili elektronik burun devresindeki sensörlere seri olarak bağlı yük direncinin üzerindeki gerilim işaretini temsil eder. Elektronik burun araştırmalarına ilişkin literatür incelendiğinde, sensör iletkenliği veya sensör direnci bilgilerinin sıkça kullanıldığı gözlemlenmiştir [20]-[22]. Bu çalışmada da veri sınıflandırma için sensör iletkenliği bilgisi kullanılmaktadır. Eşitlik (3) kullanılarak sensörlere seri bağlı yük direnci üzerindeki gerilim sinyali sensör iletkenlik sinyaline dönüştürülmüştür.

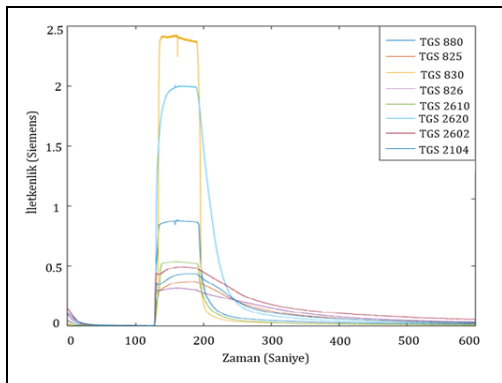
$$G_S = \frac{V_{DB}}{(V_{CC} - V_{DB}) \times R_L} \quad (3)$$

Burada R_L , metal oksit sensörün yük direncini, G_S önileme tabi tutulmuş gaz sensör sinyalinin iletkenliğini, V_{CC} ise metal oksit sensörün besleme gerilimini temsil etmektedir. Şekil 3 ve Şekil 4'te sırasıyla aseton kokusuna ait sensörlerden elde edilen ham işaret ve önileme sonucu elde edilen iletkenlik verisi görülmektedir.



Şekil 3. Aseton kokusuna ait ham işaret.

Figure 3. Raw signal of acetone odor.



Şekil 4. Önileme tabi tutulmuş aseton kokusuna ait işaret.

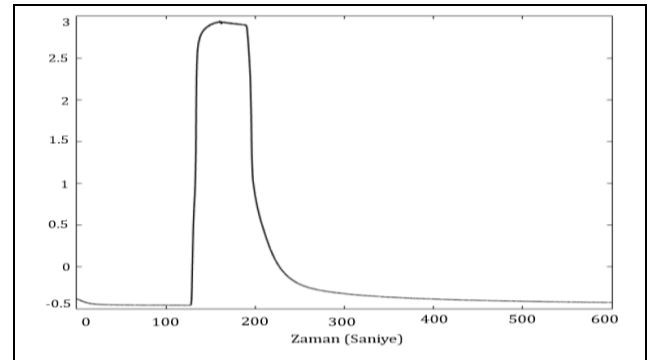
Figure 4. Preprocessed signal of acetone odor.

2.3 Öznitelik çıkarma

Makine öğrenimi ve sınıflandırma çalışmalarında, genellikle birçok değişkenle çalışılması gerekebilir. Bu durum aşırı öğrenme, çoklu doğrusal bağlantı ve eğitim-süresinin uzaması gibi istenmeyen sorunlarla sonuçlanabilir [23]. Hazırlanan modellerin hızlı bir şekilde ve en iyi performansla çalışması gerekmektedir. En iyi öznitelik çıkarma yöntemi, problemin niteliğine ve verinin yapısına bağlıdır [24]. Öznitelik çıkarma işleminin amacı, verilerin en doğru şekilde sınıflandırılmasını sağlayacak en uygun sayıda özniteliği kullanarak maksimum bilgi elde etmektir [25]. Öznitelik çıkarma yöntemleri, parametre çıkarma yöntemi, alt örnekleme yöntemi ve sistem tanımlama yöntemi olarak üç sınıfta incelenebilir [26]. Bu çalışmada öznitelik çıkarımı yapılırken kullanılan yöntemlerden biri de TBA yöntemidir. TBA yöntemi genel olarak bir veri seti içerisinde bulunan değişkenler arasındaki bağımlılığı yok eder ve boyut azaltma amacıyla kullanılır [27]. Analiz sonucunda elde edilen en büyük öz değere karşılık gelen öz vektör temel bileşen olarak adlandırılır. Literatürde TBA konusunda yapılan çalışmalarda seçilecek olan öz değerlerin toplamının bütün öz değerlerin toplamına oranının %90'ın üzerinde olması gerektiği belirtilmektedir [28]. Bu çalışmada da temel bileşen analizi yöntemi ile veri boyutu azaltımı yapılırken seçilen özdeğerlerin toplamının tüm özdeğerlerin toplamına oranı minimum %90 olacak şekildedir. Bu çalışmada giriş verisi olarak kullanılan öznitelikler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen 17. özniteliğin elde edilmesi için öncelikle (60000x8) boyutlu sensör iletkenlik verisi TBA yöntemi kullanılarak (60000x1) boyutlu veriye dönüştürülmüştür. Bu işlemin ardından Eşitlik (4) kullanılarak d_1 ve d_2 öznitelikleri elde edilmiştir.

$$d_1 = \frac{G_T(160) - G_T(130)}{30} \text{ ve } d_2 = \frac{G_T(220) - G_T(190)}{30} \quad (4)$$

Eşitlik (4)'de d_1 ve d_2 YSA ve BMY' de kullanılacak olan öznitelikleri, G_T ise (60000x1) TBA yöntemiyle boyutu indirgenmiş veriyi temsil etmektedir. $G_T(160)$ ve $G_T(130)$ sırasıyla G_T verisinin 160. ve 130. sn.lerdeki değerlerini ifade ederken $G_T(220)$ ve $G_T(190)$ sırasıyla G_T verisinin 220. ve 190. saniyelerdeki değerlerini ifade etmektedir. Aseton kokusuna ait TBA yöntemiyle boyutu indirgenmiş veri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Asetona ait iletkenlik işaretinin temel bileşeni

Figure 5. Principal component of the conductivity signature of acetone odor.

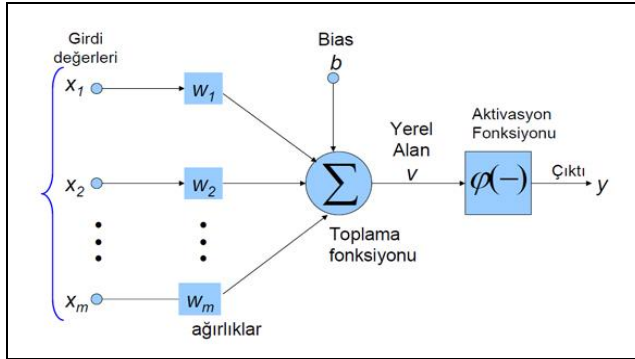
Tablo 2. Kullanılan öz nitelikler ve boyutları.

Table 2. Descriptions and sizes of the features used.

Öznitelik Numarası	Öznitelik Detayı	Öznitelik Boyutu
1	Sensörlerin iletkenlik işaretinin maksimum değerleri	8x135
2	Sensörlerin iletkenlik işaretinin ortalama değerleri	8x135
3	Sensörlerin iletkenlik işaretinin standart sapma değerleri	8x135
4	Sensörlerin iletkenlik işaretinin maksimum değerlerinin doğal logaritma değerleri	8x135
5	Sensörlerin iletkenlik işaretinin ortalama değerlerinin doğal logaritma değerleri	8x135
6	Sensörlerin iletkenlik işaretinin standart sapma değerlerinin doğal logaritma değerleri	8x135
7	Sensörlerin iletkenlik işaretinin maksimum değerlerine TBA uygulanması sonucu bulunan değerler	2x135
8	Sensörlerin iletkenlik işaretinin ortalama değerlerine TBA uygulanması sonucu bulunan değerler	2x135
9	Sensörlerin iletkenlik işaretinin standart sapma değerlerine TBA uygulanması sonucu bulunan değerler	2x135
10	Sensörlerin iletkenlik işaretinin maksimum değerlerinin doğal logaritma değerlerine TBA uygulanmasıyla bulunan değerler	2x135
11	Sensörlerin iletkenlik işaretinin ortalama değerlerinin doğal logaritma değerlerine TBA uygulanmasıyla bulunan değerler	2x135
12	Sensörlerin iletkenlik işaretinin standart sapma değerlerinin doğal logaritma değerlerine TBA uygulanmasıyla bulunan değerler	2x135
13	7. 8. ve 9. öz niteliklerin birleştirilmesiyle oluşturulan veriler	6x135
14	13.öz niteliğe TBA uygulanmasıyla elde edilen veriler	2x135
15	10. 11. ve 12. öz niteliklerin birleştirilmesiyle oluşturulan veriler	6x135
16	15. öz niteliğe TBA uygulanmasıyla elde edilen veriler	2x135
17	Önişlemlerden sonra oluşturulan (60000x8) boyutlu veriye uygulanan TBA sonucu elde edilen ve boyutu (6000x1) olarak oluşan d1 ve d2 öz nitelikleri	6000x1

2.4 YSA ile yapılan sınıflandırma

YSA, insan beyninin öğrenme sürecini taklit ederek yeni bilgiler türetebilme, bilgi oluşturma ve keşfetme gibi becerileri otomatik olarak gerçekleştirebilen, dış yardım olmaksızın çalışabilen algoritmalar [29]. Bir yapay sinir hücresi, aktivasyon fonksiyonu, birleştirme fonksiyonu ve sinapslar olmak üzere üç ana bölümden oluşur [30]. Genel olarak bir yapay sinir hücresini oluşturan yapılar Şekil 6'da gösterilmektedir.



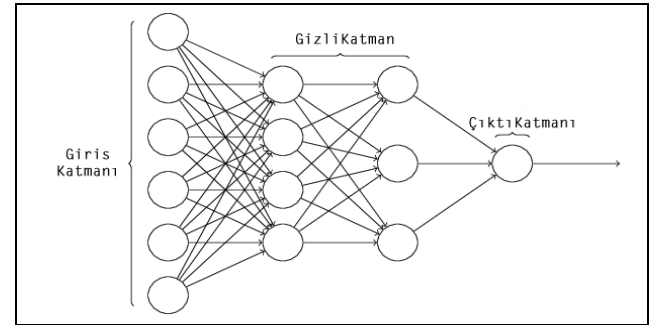
Şekil 6. Bir yapay sinir hücresinin yapısı [33].

Figure 6. Structure of an artificial neural cell.

Yapay sinir hücrelerinde bulunan aktivasyon fonksiyonu, bir yapay sinir hücresinin davranışını belirleyen başka bir kritik unsurdur. Bu fonksiyon yapay sinir hücresinin nöronuna gelen toplam girdi değerini işleyerek ilgili nöronun oluşturacağı çıkış değerinin hesaplanmasını sağlar. Yapay sinir hücrelerinin uygun şekilde birbirleri ile bağlantı kurması sonucu yapay sinir ağı oluşur [31].

YSA üç katmanda incelenir; bunlar sırasıyla giriş katmanı, gizli katman ve çıktı katmanıdır. Giriş katmanında bulunan yapay sinir hücreleri girişlerine uygulanan verileri herhangi bir değişiklik yapmadan gizli katmanda yer alan nöronlara aktarırlar. İşlenmek üzere nöronlara aktarılan veriler gizli

katman ve çıktı katmanında uygun şekilde işlenir ve YSA'nın çıkış değeri elde edilmiş olur [32]. Temel olarak bir yapay sinir ağının yapısı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Bir yapay sinir ağının yapısı [34].

Figure 7. Structure of an artificial neural network.

Bu çalışmada YSA ile yapılan sınıflandırma işleminde 17 öz nitelik için ayrı ayrı sınıflandırma yapılmıştır.

Her bir öz nitelik için gizli nöron sayısı 6, 8, 12 ve 16 olarak denenmiş, eğitim algoritması olarak Trainlm (Levenberg-Marquardt geri yayılımı) ve Trainbr (Bayes regülasyon geri yayılımı) algoritmaları kullanılmıştır. Gizli katman ve çıktı katmanı aktivasyon fonksiyonu olarak logaritmik sigmoid, hiperbolik tanjant ve özdeşlik fonksiyonları kullanılmıştır. Gizli nöron sayısı, eğitim algoritması ve aktivasyon fonksiyonlarının farklı kombinasyonları uygulanarak her bir öz nitelik için 32 adet doğruluk değeri olmak üzere toplamda 544 adet doğruluk değeri elde edilmiştir.

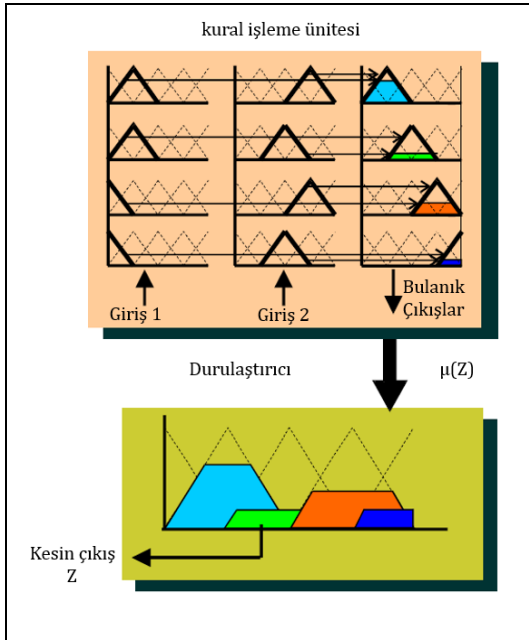
2.5 Bulanık mantık yöntemi ile yapılan sınıflandırma

Klasik mantık yaklaşımında bir nesne bir kümenin elemanıdır ya da değildir. Bulanık kümelerde ise her bir nesnenin (0-1) aralığında bir üyelik derecesi vardır. Bulanık bir sistem sırasıyla bulanıklaştırma, kural işleme ve durulaştırma bölümlerinden oluşur [35].

Bulanıklaştırma aşamasında, kesin girdi değerleri bulanık değerlere dönüştürülerek işlenir. Bu süreçte kullanılan üyelik fonksiyonları, problem yapısına ve amacına uygun olmalıdır [36]. Bu çalışma kapsamında üç farklı üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu fonksiyonlar sırasıyla gauss, çan ve üçgen üyelik fonksiyonlarıdır.

Kural işleme birimi, girdi değişkenlerinin sözel ifadelerle dönüştürüldüğü ve bulanık sonuç çıkarma adımının, güncel duruma dayalı olarak kurallara dayandırılarak uygulandığı birimdir. Kural işleme birimi çıkışında oluşan değerler durulaştırma biriminde kesin çıkış değerlerine dönüştürülür [37]. Durulaştırma yönteminde yaygın olarak kullanılan metotlar arasında alanların merkezi yöntemi, maksimumun ortalaması yöntemi, Tsukamoto ve Sugeno bulanık modelleri, maksimumun en büyüğü yöntemi, maksimumun en küçüğü yöntemi ve iki bölge yöntemi yer almaktadır [38].

Bu çalışmada, kesin çıkış değerlerinin elde edilmesi için alanların merkezi yöntemi tercih edilmiştir. Alanların merkezi yönteminin çalışma prensibine ilişkin görsel Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. Alanların merkezi durulaştırma yöntemi akış diyagramı [40].

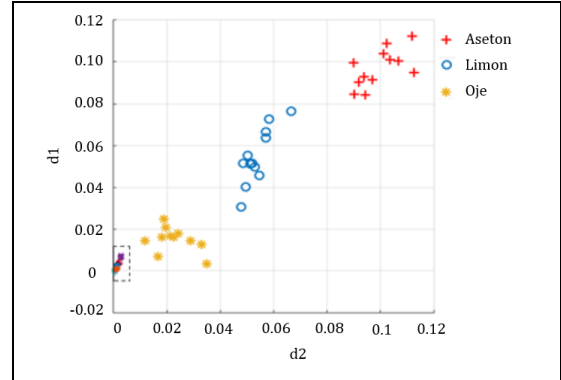
Figure 8. Flow diagram of center of area defuzzification method.

Burada Giriş1 ve Giriş2 kesin girdi değerlerini, $\mu(z)$ bulanık çıktıları Z ise kesin çıktıları temsil etmektedir. Alanların merkezi yöntemi kullanılarak kesin çıktı değerleri (5) denklemi kullanılarak elde edilir. Bu denklemde kural numarası "i" ile gösterilirken toplamda oluşturulan kural sayısı "n" ile belirtilmektedir.

$$Z_{duru} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i) x z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (5)$$

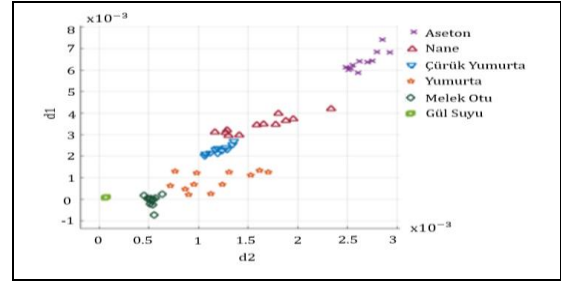
Bu çalışmada BMY ile sınıflandırmada kullanılan giriş verileri d_1 ve d_2 öz nitelikleridir. Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde d_1 ve d_2 öz niteliklerine ilişkin saçılım grafikleri verilerin üst üste gelerek herhangi bir çakışma olmadığını ortaya koymaktadır. Farklı öz nitelikler kullanıldığında, saçılım grafiklerinde

verilerin üst üste binmesi, kokuların sınıflandırılmasını zorlaştırmaktadır. d_1 ve d_2 değerlerinin kullanılmasıyla elde edilen saçılım grafiği Şekil 9'da verilirken Şekil 9'daki taralı alanın detaylı görünümü Şekil 10'da verilmektedir.



Şekil 9. d_1 ve d_2 verileri kullanılarak oluşturulan saçılım grafiği.

Figure 9. Scatter plot created using d_1 and d_2 data.

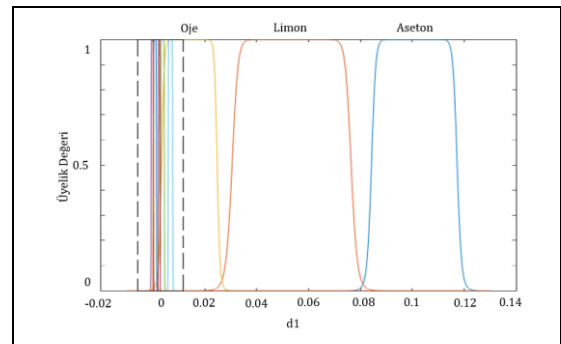


Şekil 10. Şekil 9'da kesikli çizgilerle belirlenen bölgenin detaylı görünümü.

Figure 10. Detailed view of the region marked with dashed lines in Figure 9.

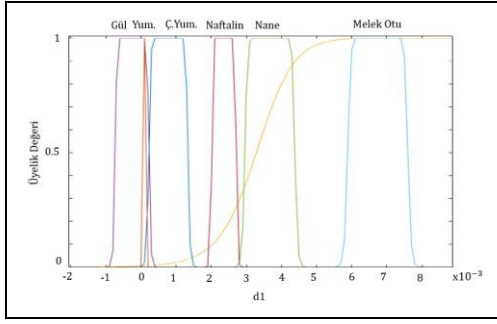
BMY'de kullanılan üyelik fonksiyonları, üzerinde çalışılan problemin en iyi şekilde çözümü için kritik öneme sahiptir [39]. Bu çalışmada 3 farklı üyelik fonksiyonu (üçgen, gauss, çan) kullanılmıştır. BMY kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin performansları göz önüne alındığında en yüksek sınıflandırma doğruluğu çan üyelik fonksiyonunun kullanılmasıyla elde edildiği görülmüştür.

Şekil 11 ve Şekil 12'de sırasıyla d_1 kesin girişi için çan üyelik fonksiyonları ve üst üste binen bölgenin detaylı görünümü verilmiştir.



Şekil 11. d_1 öz niteliği için kullanılan çan üyelik fonksiyonları.

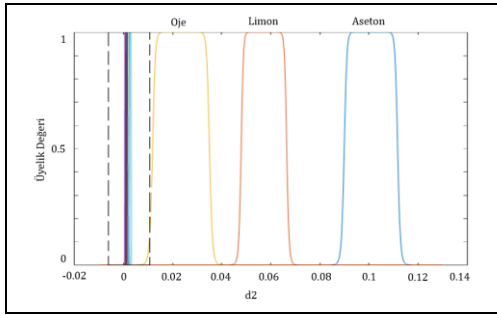
Figure 11. Bell membership functions used for feature d_1 .



Şekil 12. Çan üyelik fonksiyonlarının ayrıntılı gösterimi.

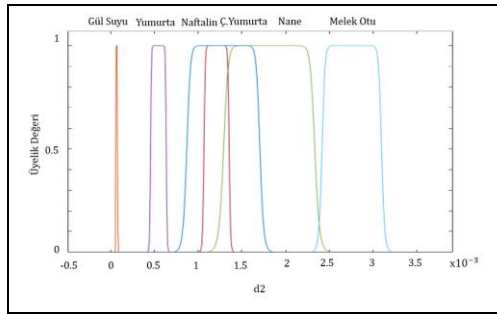
Figure 12. Detailed representation of bell membership functions used.

Şekil 13 ve Şekil 14'te sırasıyla d_2 kesin girişi için çan üyelik fonksiyonları ve üst üste binen bölgenin detaylı görünümü verilmiştir. Şekil 15'te ise çıkıştaki çan üyelik fonksiyonlarının ayrıntılı gösterimi verilmiştir.



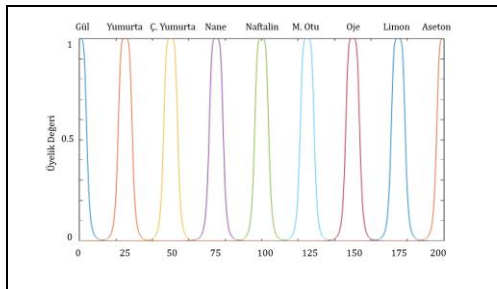
Şekil 13. d_2 öz niteliği için kullanılan çan üyelik fonksiyonları.

Figure 13. Bell membership functions used for the d_2 feature.



Şekil 14. Çan üyelik fonksiyonlarının ayrıntılı gösterimi.

Figure 14. Detailed representation of bell membership functions used.



Şekil 15. Kesin çıkış değerlerinin hesaplanmasında kullanılan çan üyelik fonksiyonları.

Figure 15. Bell membership functions used in calculating exact output values.

Kural tablosunun oluşturulması aşamasında uygulama yapılan sistemin uzman bireylerce detaylı olarak en iyi şekilde incelenmesi ve bütün detaylarına hâkim olunması gerekir. Bu çalışmada oluşturulan kural tablosu, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilen saçılım grafiklerine göre hazırlanmıştır. Bu grafiklerde her bir sınıfa ait verilerin d_1 ve d_2 eksenlerindeki izdüşümleri tespit edilmiştir. Elde edilen izdüşümlerin bulundukları alanlara, ait oldukları kokuların ismiyle aynı olacak şekilde üyelik fonksiyonları atanmıştır. Sonrasında üyelik fonksiyonlarının yerleşim bölgelerine bağlı olarak kurallar belirlenmiştir. Bu işlem sözel olarak “eğer d_1 x ve/veya d_2 y ise hedef sınıf z dir” ifadesiyle oluşturulmuştur. Bu işleme grafik üzerinden 3 adet örnek kural verecek olursak;

- Kural 1 : Eğer d_1 çürük yumurta ve d_2 çürük yumurta ise hedef sınıf çürük yumurtadır,
Kural 2 : Eğer d_1 yumurta ve d_2 çürük yumurta ise hedef sınıf çürük yumurtadır,
Kural 3 : Eğer d_1 nane ve d_2 çürük yumurta ise hedef sınıf nane dir.

Dağılım grafiği üzerindeki verilerin konumları detaylıca incelenerek tüm sınıflar için kurallar belirlenmiş ve belirlenen bu kurallara göre oluşturulan kural tablosu Tablo 3'te verilmektedir.

3 Bulgular

YSA ile gerçekleştirilen sınıflandırma işleminde farklı sayıda gizli katman nöron sayısı, iki çeşit eğitim algoritması ve çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılarak farklı YSA mimarilerinin sınıflandırma performansına etkileri detaylıca incelenmiştir. Gerçekleştirilen bu işlemde her bir öz nitelik 32 farklı YSA mimarisi ile sınıflandırılmış ve her bir öz nitelik için 32 farklı sınıflandırma sonucu elde edilmiştir.

Kullanılan toplam 17 öz nitelik için toplam olarak $32 \times 17 = 544$ adet farklı sınıflandırma sonucu elde edilmiştir. Kullanılan 17 öz niteliğe ait 544 farklı sonuç incelendiğinde, en yüksek doğruluk değeri %96,41 ile 6. öz nitelik kullanılarak elde edilmiştir.

En yüksek sınıflandırma doğruluğunun elde edildiği YSA mimarisinin yapısında 8 adet gizli nöron kullanılmış ve eğitim algoritması olarak Trainbr (bayes Normalizasyonu) seçilmiştir. Gizli katman ve çıkış katman aktivasyon fonksiyonu Tansig (hiperbolik tanjant) fonksiyonu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen sınıflandırma işlemleri sonucunda en yüksek ve en düşük ilk 5 sınıflandırma doğruluğunun hangi öz nitelikler ve hangi YSA mimarileri ile elde edildiğine dair detaylar sırasıyla Tablo 4 ile Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 4 ile Tablo 5 incelendiğinde hem en yüksek sınıflandırma doğruluğunun hem de en düşük sınıflandırma doğruluğunun 6. öz nitelik kullanılarak elde edildiği görülmektedir. Bu durum veri sınıflandırılması için kullanılan YSA mimarisinin sınıflandırma doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğinin bir kanıtı niteliğindedir. BMY ile yapılan sınıflandırmada, d_1 ve d_2 veri çifti beraber kullanılarak sırasıyla çan üyelik fonksiyonu, gauss üyelik fonksiyonu ve üçgen üyelik fonksiyonlarına uygulanmıştır. Bu sınıflandırma veri çiftinin beraber kullanılarak çan üyelik fonksiyonuna uygulanması ile elde edilmiştir. BMY'de farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Literatürde, konu ile alakalı çalışmalar incelendiğinde, elektronik burunların kullanıldığı birçok uygulamaya rastlanmaktadır [42]-[44].

Tablo 3. BMY için kullanılan kural tablosu.

Table 3. Rules table used for FLM.

d1 d2	Gül	Yumurta	Naftalin	Çürük Yumurta	Nane	Melek Otu Kökü	Oje	Limon	Aseton
Gül	Gül								
Yumurta		Yumurta		Çürük Yumurta	Nane				
Naftalin			Naftalin						
Çürük Yumurta		Yumurta		Çürük Yumurta	Nane	Çürük Yumurta			
Nane		Yumurta		Çürük Yumurta	Nane				
Melek Otu Kökü	Melek Otu Kökü			Melek Otu Kökü		Melek Otu Kökü			
Oje			Oje		Oje		Oje		
Limon								Limon	
Aseton									Aseton

Tablo 4. YSA ile sınıflandırmaya ait en yüksek doğruluk değerleri.

Table 4. The highest accuracy values for classification with ANN.

Başarı Sırası	Eğitim Algoritması	Gizli Nöron Sayısı	Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu	Çıkış Katman Aktivasyon Fonksiyonu	Elde Edilen En Yüksek Doğruluk Değeri	Elde Edilen En Düşük Doğruluk Değeri	Ortalama Doğruluk Değeri	Standart Sapma	Kullanılan Öznitelik
1	Trainbr	8	Tansig	Tansig	%100	%85.19	%96.41	1.72	6.
2	Trainbr	16	Tansig	Purelin	%100	%88.19	%96.20	2.10	4.
3	Trainbr	16	Tansig	Purelin	%100	%88.89	%95.76	4.25	1.
4	Trainbr	8	Tansig	Purelin	%100	%81.48	%94.48	3.24	17.
5	Trainbr	16	Purelin	Tansig	%100	%66.67	%94.354	4.224	5.

Tablo 5. YSA ile sınıflandırmaya ait en düşük doğruluk değerleri.

Table 5. The lowest accuracy values rates for classification with ANN.

Başarı Sırası	Eğitim Algoritması	Gizli Nöron Sayısı	Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu	Çıkış Katman Aktivasyon Fonksiyonu	Elde Edilen En Yüksek Doğruluk Değeri	Elde Edilen En Düşük Doğruluk Değeri	Ortalama Doğruluk Değeri	Standart Sapma	Kullanılan Öznitelik
544	Trainlm	12	Purelin	Tansig	%100	%70.37	%78.37	8.31	6.
543	Trainlm	16	Logsig	Tansig	%100	%62.96	%80.46	3.04	1.
542	Trainlm	16	Purelin	Tansig	%100	%70.37	%81.97	3.17	2.
541	Trainlm	6	Tansig	Purelin	%100	%74.07	%82.96	4.73	17.
540	Trainlm	6	Purelin	Tansig	%100	%62.96	%83.03	4,22	4.

Tablo 6. BMY ile sınıflandırmaya ait sonuçlar.

Table 6. Results of classification with FLM.

Kullanılan Üyelik Fonksiyonu	Ortalama Doğruluk Değeri	Standart Sapma
Üçgen	%86.73	3.17
Gauss	%77.63	3.48
Çan	%95.55	4.83

Bu çalışmalarda kullanılan elektronik burunlar arasında hazır ticari elektronik burunlar olmakla birlikte, araştırmacıların kendi geliştirdikleri elektronik burunların kullanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır. Ancak bu çalışmalar arasında, yapay sinir ağları ve bulanık mantık yönteminin kullanılmasıyla, 9 farklı kokunun %96.41 sınıflandırma doğruluğu ile ayırt edilebildiği bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Tüm bu bilgiler bize bu çalışmada geliştirilen elektronik burunun birçok farklı uygulamada başarı ile kullanılabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, 8 adet metal oksit sensör içeren bir elektronik burun sistemi geliştirilerek, yumurta, çürük yumurta, oje, aseton, limon, melek otu kökü, nane, gül suyu ve naftalin olmak üzere 9 farklı koku ile deneyler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, elde edilen veriler Bulanık Mantık Yöntemi (BMY) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında, sensörlerden alınan sinyallerin doğru bir şekilde işlenmesi ve anlamlı hale getirilmesi amacıyla kapsamlı bir öznitelik çıkarma aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, TBA yöntemi kullanılarak, veri setindeki birbiriyle ilişkili değişkenler, daha az sayıda ve birbiri ile ilişkisiz değişkenlere indirgenmiştir.

Yapay Sinir Ağları ile gerçekleştirilen sınıflandırma işleminde, 17 farklı öznitelik üzerinden detaylı analizler yapılmıştır. Bu analizler sırasında, sınıflandırma doğruluğunu en yüksek seviyeye çıkarmak için farklı gizli nöron sayıları, çeşitli eğitim algoritmaları ve farklı aktivasyon fonksiyonları kullanılarak çok sayıda deneme gerçekleştirilmiştir. Özellikle, 6. öznitelik üzerinde yapılan analizlerde, gizli nöron sayısı olarak 8, eğitim algoritması olarak trainbr, gizli katman ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu olarak tansig kullanıldığında, %96,41 gibi oldukça yüksek bir sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Bu sonuç, parametre optimizasyonunun sınıflandırma doğruluğunu büyük ölçüde etkilediğini ve kullanılan parametre kombinasyonlarının sistem performansı üzerindeki önemini ortaya koymuştur.

Bulanık Mantık Yöntemi ile yapılan sınıflandırma çalışmasında ise, TBA yöntemi sonrası elde edilen d_1 ve d_2 öznitelikleri üzerinde kapsamlı analizler yapılmıştır. Bu özniteliklerle birlikte çeşitli üyelik fonksiyonları kullanılmış ve her bir yaklaşım için doğruluk oranları değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, en yüksek doğruluk oranlarının çan üyelik fonksiyonunun kullanılmasıyla elde edildiği tespit edilmiştir. Bu işlem, %95,55 gibi oldukça yüksek bir doğruluk oranıyla sonuçlanmıştır. Özellikle d_1 ve d_2 özniteliklerinin birlikte değerlendirilmesi, sınıflandırma doğruluğunun önemli ölçüde artmasına katkı sağlamıştır. Bu bulgular, uygun öznitelik ve üyelik fonksiyon seçiminin sınıflandırma performansını önemli ölçüde etkilediğini net bir şekilde göstermektedir. Çalışmada kullanılan elektronik burun devresinde, farklı kokuları algılamada yüksek doğruluk sağlayan MOS sensörler kullanılmıştır. Bu sistemin tasarımı ve geliştirilmesi sırasında, her bir sensörün verdiği yanıtlar titizlikle değerlendirilmiş ve bu veriler kullanılarak, sınıflandırma algoritmaları için anlamlı öznitelikler çıkarılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, hem YSA hem de BMY yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu iki algoritma ve işaret işleme yöntemlerinin performansları, kullanılan öznitelik çıkarma yöntemine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilmiş elektronik burun sisteminin ve kullanılan

sınıflandırma yöntemlerinin kokuları ayırt etmede ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, elektronik burun sistemleri ile gerçekleştirilecek gelecekteki çalışmalara ışık tutacak nitelikte bir kaynak olma potansiyeline sahiptir.

5 Conclusions

In this study, an electronic nose system containing 8 metal oxide sensors was developed and experiments were conducted with 9 different odors, namely egg, rotten egg, nail polish, acetone, lemon, angelica root, mint, rose water and naphthalene. As a result of analyzes, the obtained data were classified using Fuzzy Logic Method (FLM) and Artificial Neural Networks (ANN). Within the scope of the study, a comprehensive feature extraction was carried out in order to process the signals received from the sensors correctly and make them meaningful. At this stage, by using the PCA method, the interrelated variables in the data were reduced to fewer and unrelated variables. In the classification process performed with ANN, detailed analyzes were made on 17 different features. During these analyzes, many trials were carried out using different hidden neuron numbers, various training algorithms and different activation functions in order to maximize the classification accuracy. In particular, in the analyses performed on the 6th feature, when the number of hidden neurons was 8, trainbr was used as the training algorithm, and tansig was used as the activation function of the hidden layer and output layer, a very high classification accuracy of 96.41% was obtained. This result revealed that parameter optimization greatly affects the classification accuracy and that the parameter combinations used are important on the system performance. In the classification study performed with the FLM, comprehensive analyses were performed on the d_1 and d_2 features obtained after the PCA method. Various membership functions were used with these features and the accuracy rates were evaluated for each approach. As a result, it was determined that the highest accuracy rates were obtained by using the bell membership function. This process resulted in a very high accuracy rate of 95.55%. Especially, the evaluation of the d_1 and d_2 features together contributed to a significant increase in the classification accuracy. These findings show that the selection of the appropriate feature and membership function significantly affects the classification performance. In the electronic nose circuit used in the study, MOS sensors that provide high accuracy in detecting different odors were used. During the design and development of this system, the responses given by each sensor were meticulously evaluated and meaningful features were extracted for the classification algorithms. The data were classified by both ANN and BMY methods. In addition, the performances of these two algorithms and signal processing methods were evaluated depending on the feature extraction method used. These results revealed how effective the developed electronic nose system and the classification methods used are in distinguishing odors. This study has the potential to be a resource that will shed light on future studies to be carried out with electronic nose systems.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Ümit Özsandıkçıoğlu ve Ayten Atasoy makale fikrinin oluşması, çalışma planının yapılması, deneylerin gerçekleştirilmesi, elde edilen verilerin işlenmesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında rol almışlardır. Bilal Talha Ayvaz literatür taramasının yapılması ve elde edilen

sonuçların kullanılmasıyla makalenin yazım aşamasında katkı sunmuştur. Ümit Özsandıkçioğlu ve Ayten Atasoy ayrıca yazım ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır. Bu araştırma, Ayten Atasoy'un danışmanlığında Ümit Özsandıkçioğlu tarafından Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında hazırlanan "Farklı kokuların yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleriyle sınıflandırılması" adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".
"Ayrıca hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Loutfi A, Coradeschi S, Mani GK, Shankar P, Rayappan JBB. "Electronic noses for food quality: A review". *Journal of Food Engineering*, 144, 103-111, 2015.
- [2] Timsorn K, Thoopboochagorn T, Lertwattanasakul N, Wongchoosuk C. "Evaluation of bacterial population on chicken meats using a briefcase electronic nose". *Biosystems Engineering*, 151, 116-125, 2016.
- [3] Pearce TC, Schiffman SS, Nagle HT, Gardner JW. *Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology*. Weinheim, Germany, Wiley, 2003.
- [4] Saraoğlu HM. "Elektronik burun teknolojisi ve uygulama alanları". *Akademik Bilişim'08 10. Akademik Bilişim Konferansı*, Çanakkale, Türkiye, 30 Ocak - 1 Şubat 2008.
- [5] Valdez LF, Gutierrez JM. "Chocolate classification by an electronic nose with pressure controlled generated stimulation". *Sensors*, 6(10), 1745, 2016.
- [6] Viejo CG, Fuentes S, Godbole A, Widdicombe B, Unnithan RR. "Development of a low-cost e-nose to assess aroma profiles: An artificial intelligence application to assess beer quality". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 308, 127688, 2020.
- [7] Lin SS, Zhang XM. "A rapid and novel method for pre-dicting nicotine alkaloids in tobacco through electronic nose and partial least-squares regression analysis". *Analytical Methods*, 8(7), 1609-1617, 2016.
- [8] Zhang M, Guo, D, Wang H, Wu G, Ding N, Shi Y, Zhou J, Zhao E, Li X. "Integrated characterization of filler tobacco leaves: HS-SPME-GC-MS, E-nose, and microbiome analysis across different origins". *Bioresources and Bioprocessing*, 11(1), 11, 2024.
- [9] Özsandıkçioğlu Ü, Atasoy A. "Breath analysis for detection of lung cancer with hybrid sensor-based electronic nose," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 31, 550-565, 2023.
- [10] Voss A, Witt K, Kaschowitz T, Poitz W, Ebert A, Roser P, Bär KJ. "Detecting cannabis use on the human skin surface via an electronic nose system". *Sensors*, 14(7), 13256-13272, 2014.
- [11] Wilson AD. "Review of electronic-nose technologies and algorithms to detect hazardous chemicals in the environment". *Procedia Technology*, 1, 453-463, 2012.
- [12] Munoz R, Sivret EC, Parcsi G, Lebrero R, Wang XG, Suffet IH, Stuetz RM. "Monitoring techniques for odour abatement assessment". *Water Research*, 44(18), 5129-5149, 2010.
- [13] Mumyalmaz B, Karabacak K. "An E-nose-based indoor air quality monitoring system: Prediction of combustible and toxic gas concentrations". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23(3), 729-740, 2015.
- [14] Bax C, Sironi S, Capelli L. "Definition and Application of a Protocol for Electronic Nose Field Performance Testing: Example of Odor Monitoring from a Tire Storage Area". *Atmosphere*, 11(4), 426, 2020.
- [15] Bakiler H, Güney S, "Estimation of concentration values of different gases based on long short-term memory by using electronic nose". *Biomedical Signal Processing and Control*, 69, 102908, 2021.
- [16] Wu Z, Wang H, Wang X, Zheng H, Chen Z, Meng C. "Development of electronic nose for qualitative and quantitative monitoring of volatile flammable liquids". *Sensors*, 20(7), 1817, 2020.
- [17] Serdaroğlu M, Turp Y. "Recent techniques for evaluation of meat quality". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 111-117, 2004.
- [18] Bakar MAA, Abdullah AH, Saad FSA, Shukor SAA, Razak AAA, Mustafa MH. "Electronic nose calibration process for monitoring atmospheric hazards in confined space applications". *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 10, 15-19, 2018.
- [19] Sundic T, Marco S, Samitier J, Wide P. "Electronic tongue and electronic nose data fusion in classification with neural networks and fuzzy logic based models". *17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Maryland, USA, 1-4 May 2000.
- [20] Güney S. Karma Yapılı İkili Karar Ağacı tabanlı Koku Tanıma Sistemi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2013.
- [21] Güney S, Atasoy A. "Freshness Classification of Horse Mackerels with E-Nose System Using Hybrid Binary Decision Tree Structure". *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 34(03), 2050003, 2020.
- [22] Güney S, Atasoy A. "Study of fish species discrimination via electronic nose". *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 83-91, 2015.
- [23] Sathyavani R, JaganMohan K, Kalaavathi B. "Classification of nutrient deficiencies in rice crop using denseNet-BC". *Materials Today: Proceedings*, 56, 1783-1789, 2022.
- [24] Osuna RG, Nagle HT, Schiffman SS. "Transient Response Analysis of an Electronic Nose Using Multi-Exponential Models". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 61, 170-182, 1999.
- [25] Fornacon-Wood I, Mistry H, Ackermann CJ, Blackhall F, McPartlin A, Faivre-Finn C, O'Connor JP. "Reliability and prognostic value of radiomic features are highly dependent on choice of feature extraction platform". *European radiology*, 30, 6241-6250, 2020.
- [26] Gutierrez-Osuna R, Nagle HT. "A Method for Evaluating Data-Preprocessing Techniques for Odor Classification with An Array of Gas Sensors". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 29(5), 626-632, 1999. Timm NH. *Applied multivariate analysis*. New York, USA, Springer, 2002.
- [27] King JR, Jackson DA. "Variable selection in large environmental data sets using principal components analysis". *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*, 10(1), 67-77, 1999.
- [28] Bilginer O, Tunga B, Demirel RM. "Deri lezyonlarının evrimsel yapay sinir ağları ile sınıflandırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 208-214, 2022.

- [29] Ekersular MN, Alkan A. "Detection of COVID-19 disease with machine learning algorithms from CT images". *Gazi University Journal of Science*, 37(1), 169-181, 2024.
- [30] Alkan A. EEG işaretlerinin klasik ve modern yöntemlerle önışlenmesi ve sınıflandırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2005.
- [31] Alkan A, Koklukaya E, Subasi A. "Automatic seizure detection in EEG using logistic regression and artificial neural network". *Journal of neuroscience methods*, 148(2), 167-176, 2005.
- [32] Öztürk E. "Yapay Sinir Ağları (YS)". <https://academy.patika.dev/blogs/detail/yapay-sinir-aglariys> (15.02.2024).
- [33] Yılmaz E. "Yapay Sinir Ağları ile Araç Satışlarının Tahmin Edilmesi". <https://www.veribilimiokulu.com/yapay-sinir-aglari-ile-arac-satislarinin-tahmin-edilmesi/> (15.02.2024).
- [34] Altas İH. *Fuzzy Logic Control in Energy Systems with Design Applications in MatLab/Simulink*. 1st ed. London, England, The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [35] Altas İH, Sharaf AM. "A generalized direct approach for designing fuzzy logic controllers in Matlab/Simulink GUI environment". *International journal of information technology and intelligent computing*, 1(4), 1-27, 2007.
- [36] Altas İH, Sharaf AM. "A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems". *Renewable Energy*, 33(3), 388-399, 2008.
- [37] Maier J, Sherif YS. "Applications of fuzzy set theory". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), 175-189, 1985.
- [38] Jain A, Sharma A. "Membership function formulation methods for fuzzy logic systems: A comprehensive review". *Journal of Critical Reviews*, 7(19), 8717-8733, 2020.
- [39] Altas İH. "Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı". *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85, 1999.
- [40] Cheng L, Meng QH, Lilienthal AJ, Qi PF. "Development of compact electronic noses: A review". *Measurement Science and Technology*, 32(06), 062002, 2021.
- [41] Chen H, Huo D, Zhang J. "Gas recognition in E-nose system: A review". *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 16(2), 169-184, 2022.
- [42] Ali MM, Hashim N, Abd Aziz S, Lasekan O. "Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products". *Trends in Food Science & Technology*, 99, 1-10, 2020.
- [43] Karakaya D, Ulucan O, Turkan M. "Electronic nose and its applications: A survey". *International journal of Automation and Computing*, 17(2), 179-209, 2020.