



Araştırma Makalesi/Research Article

## Hava Kalitesi Ölçüm Amaçlı Kullanılan Metal-oksit Gaz Sensörlerinin Sıcaklık ve Nem Etkileşimlerinin Belirlenmesi

Ünal Kızıl\* Sefa Aksu

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, 17020/Çanakkale  
\*Sorumlu yazar: unal@comu.edu.tr

Geliş Tarihi: 26.03.2018

Kabul Tarihi: 31.05.2018

### Öz

Metal oksit yarı iletken gaz sensörleri farklı uygulama alanlarında ve sanayide yoğun olarak kullanılmaktadır. Diğer sensörlerle kıyaslandığında nispeten ucuz, sağlam, hafif, uzun ömürlü ve hızlı tepki sürelerine sahip bu sensörler hava kalitesi ölçümüyle ilgili akademik çalışmalarda ve ticari cihazlarda sıkça kullanılmaktadır. Yarı iletken aktif element her hangi bir gaza maruz kaldığında oksidasyona uğramakta ve sensörün direncinde bir farklılığa neden olmaktadır. Bu direnç farklılığı gaz konsantrasyonu ile orantılı olarak değişmektedir. Ancak çoğu zaman dirençteki değişim sadece gazın varlığıyla ya da miktarıyla açıklanamamaktadır. Ölçüm yapılan ortamın sahip olduğu sıcaklık ve bağıl nem de sensör performansını etkilemektedir.

Bu bağlamda geliştirilen akıllı sistemlerde sensör verilerinin direkt kullanılması hatalı sonuçların elde edilmesine neden olabilir. Stabil sonuç elde edebilmek için kompensasyon sağlayacak devrelerin kullanılması sistem performansını olumlu etkileyecektir. Bu çalışmada metan (CH<sub>4</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>), amonyak (NH<sub>3</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), uçucu organik bileşikler (VOC) ve genel amaçlı hava kalitesi kontrol sensörlerinin farklı sıcaklık ve bağıl nemdeki performansları değerlendirilmiştir. Sensör verileri üzerinde her iki parametrenin de etkisi olduğu istatistiki olarak ortaya konmuştur. Ancak sıcaklığın etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Söz konusu sensörler için kompensasyon eğrileri geliştirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Gaz sensörleri, sıcaklık ve bağıl nem, kompensasyon, hava kalitesi

## Determination of Temperature and Humidity Interactions of Gas Sensors Used in Air Quality Monitoring

### Abstract

Metal oxide semiconductor gas sensors are used extensively in different application areas and industries. These sensors, which are relatively inexpensive, robust, lightweight, long lasting and fast response times compared to other sensors, are frequently used in academic studies and commercial devices related to air quality measurement. The semiconductor active element undergoes oxidation when exposed to any gas and causes a difference in resistance of the sensor. This resistance variation varies with the gas concentration. But often the change in resistance is not explained only by the presence or quantity of the gas. The temperature and relative humidity of the medium under measurement also affect sensor performance.

Direct use of sensor data in intelligent systems developed in this context may result in erroneous results. The use of compensation circuits to achieve stable results will positively affect system performance. In this study, the performance of methane (CH<sub>4</sub>), hydrogen (H<sub>2</sub>), ammonia (NH<sub>3</sub>), hydrogen sulphide (H<sub>2</sub>S), volatile organic compounds (VOC) and general purpose air quality control sensors at different temperatures and relative humidity were evaluated. It is statistically shown that both parameters affect the sensor data. However, it is observed that the effect of temperature is higher. Compensation curves have been developed for such sensors.

**Keywords:** Gas sensors, temperature and relative humidity, compensation, air quality

### Giriş

Son yıllarda gaz sensörleri kullanılarak geliştirilen akıllı sistemler hem sanayide hem de akademik çalışmalarda son derece önemli bir yer tutmaktadır. Başlıca kullanım alanları endüstriyel üretim (madenlerdeki gazların tespiti), otomotiv sanayii (kirletici gazların tespiti), tıbbi uygulamalar (biyolojik salgıların kokusundan yola çıkarak hastalık tespiti), iç ortam hava kalitesi ölçümü (karbon monoksit ölçümü), çevresel çalışmalar (sera gazlarının belirlenmesi) (Liu ve ark., 2012) ve tarımsal hava kirleticilerin belirlenmesi (barınaklardan yayılan kokuların ölçümü) (Kızıl ve ark., 2017), gübre kokusundan hastalık tespiti (Kızıl ve ark., 2015a; Kızıl ve ark., 2015b) gibi konuları içermektedir.

Çok farklı teknolojilerde üretilmiş gaz sensörleri mevcuttur. Bunlardan bazıları, metal oksit yarı iletkenler (MOS), modifiye metal oksit yarı iletkenler (MMOS), iletken polimerler (CP), iletken oligomerler (CO), kütle akustik dalga (BAW), kuvars kristal mikrobalslar (QCM), kimyasal alan



etkili transistörler (ChemFET), fiber optik (FO) ve diskoik sıvı kristal (DLC) sensörlerdir (Kızıl ve ark., 2001)

İdeal bir gaz sensöründen beklenen hassasiyet, sağlamlık, seçicilik ve gaz ile teması kesildiğinde aktif elementlerin geri dönüşebilirliğidir. Sensör sistemlerinin performanslarının artırılabilmesi için birden fazla sensörün bir arada kullanıldığı sensör dizileri kullanılmalı, sinyal işleme metotları iyi seçilmeli ve bunun sonucunda uygun veri analizi yöntemleri kullanılmalıdır (Szcurek ve Maciejewska, 2012).

Düşük maliyetleri ve üretimlerinin kolaylığı gibi nedenlerden dolayı yukarıda örneklendirilmiş çalışmalarda çoğunlukla metal oksit sensörleri (MOS) kullanılmaktadır. Ancak bu sensörlerin mevcut gaz konsantrasyonlarına verdikleri tepkilerin çoğu zaman lineer özellikte olmadıkları görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık ve nem gibi çevresel koşulların sensör çıktıları üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Bu durum ise özellikle kalibrasyonlarının zorlaşmasına neden olmaktadır (Gerboles ve Buzica, 2009). Buna rağmen hassas bir kalibrasyona tabi tutulduklarında özellikle ortam havasındaki inorganik gazların izlenmesinde yeterince hassas sonuçlar verebilmektedirler (Aleixandre ve Gerboles, 2012).

Bu konuda yapılan en son çalışmalardan birinde Wei ve ark. (2018) laboratuvar koşullarında elektrokimyasal gaz sensörlerinin performansını değerlendirerek, kararlı koşullar altında hedef gazı mükemmel lineerliğe sahip olacak şekilde ( $R^2=0.99$ ) ölçebilmişlerdir. Sensörlerin ayrıca düşük konsantrasyonlarda bile yüksek hassasiyet gösterdiklerini ortaya koymuşlardır. Ancak çevresel faktörlerden sıcaklık ve bağıl nemin değişik sensör tiplerinde farklı etkilere sahip olduğunu da belirlemişlerdir. Kullanılacak sensörlerin doğru sonuçlar verebilmesi için farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarındaki tepkilerinin ve buna göre kompensasyonlarının yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada literatürdeki hava kalitesi ölçüm cihazları, elektronik burun sistemleri ve diğer akıllı sistemlerle ilgili çalışmalarda kullanılmış olan Figaro (Figaro Engineering, Inc., Mino, Japonya) gaz sensörlerinin farklı sıcaklık ve nem koşullarında verdikleri tepkilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### *Kullanılan Sensörler ve Devre*

Bu çalışmada, en yaygın olarak kullanılan tin-dioksit Figaro gaz sensörlerinin farklı sıcaklık ve nem koşullarında verdikleri tepkiler incelenmiştir. Figaro sensörleri yüzey-tepki sensörleridir. Sensör, duyarlı olduğu gazlar içeren bir atmosfere maruz kaldığında, tin-dioksit yüzeyi bu gaz moleküllerini adsorbe eder ve bunun sonucunda oksidasyon gerçekleşir. Bunun sonucunda direnç azalarak, elektronların daha kolay akması sağlanmış olur. Basit bir elektrik devresi, iletkenlikteki değişimi, gaz konsantrasyonuna karşılık gelen bir çıkış sinyaline, dönüştürerek ölçüm yapılmış olur. Çalışmada incelenen sensörler Çizelge 1’de sunulmuştur.

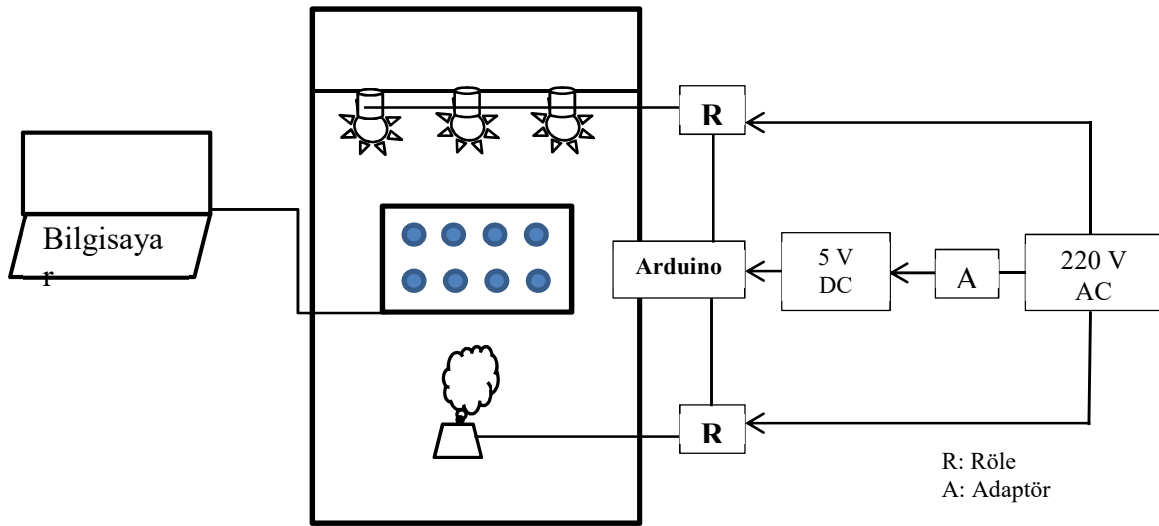
Çizelge 1. Kullanılan sensörler duyarlı oldukları parametreler

Sensor modeli	Ölçülen parametre
TGS-2600	Hava kalitesi kontrolü
TGS-813	CH <sub>4</sub>
TGS-821	H
TGS-826	NH <sub>3</sub>
TGS-825	H <sub>2</sub> S
TGS-822	VOC
SHT11	Sıcaklık ve nem sensörü

Söz konusu devre gaz ve sıcaklık/nem sensörlerini üzerinde barındıran Printed Circuit Board (PCB) üzerine yerleştirilmiştir. Gaz sensörleri 5V’luk bir gerilim ile beslenmekte ve analog çıkış vermektedirler. Maruz kaldıkları gaz konsantrasyonuna göre (0-5 V arası) bir çıkış voltajı üretirler. Sıcaklık – Nem için kullanılan SHT11 (Sensirion AG, Zurich, Switzerland) sensörü dijital 10 Bit çıkış vermektedir. Devrede hem dijital hem analog okuma yapabilen SPI protokolüne sahip mikroişlemcili veri toplama kartı kullanılmıştır (Kızıl ve ark., 2015b).

### Verilerin Toplanması ve İşlenmesi

Isıtma ve nemlendirme sistemi, SHT11 sıcaklık-nem sensöründen alınan verilere göre röleleri açıp kapatan bir geliştirme kartı (Arduino Uno R3) vasıtasıyla çalışmaktadır. Yazılımda belirtilen sıcaklık ve bağıl nem sınır değerleri sensörden okunduğu durumda, geliştirme kartının dijital çıkışlarına bağlanan röle kartlarına devre aç-kapa sinyali yollanmaktadır. Röle kartları, birbirlerinden bağımsız olarak 45 wattlık halojen ampüllere ve soğuk buhar üreten ultrasonik nemlendiriciye elektrik iletilmesini sağlamaktadır. Kabinin içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri belirlenen alt sınıra ulaştığında, geliştirme kartından röle kartlarına devre kapama sinyali iletilerek ampüllere ve nemlendiriciye elektrik iletilmesi sağlanmaktadır. Ampüllerin yaydığı ısı enerjisi ve nemlendiricinin ortama saldırdığı soğuk buhar sebebiyle değişen sıcaklık ve bağıl nem değerleri, sensör vasıtasıyla geliştirme kartında izlenebilmektedir. Bu değerler, yazılımda belirtilen üst sınır değerlerini yakaladığında röle kartlarına devre açma sinyali yollanır ve elektrik iletimi kesilir. Kabinin izolasyon yeteneğine bağlı olarak bir süre sonra sıcaklık ve nem değerleri alt sınır değerlerine ulaşır ve sistem döngüyü tekrarlar. Bu sırada bilgisayara aktarılan verilen MS Excel formatında depolanmaktadır. Test sırasında yaklaşık 2 saat süreyle sıcaklık ve bağıl nem değerleri dakikada bir kaydedilmiştir. Elde edilen verilerin istatistiksel analizinde SPSS 24 (IBM, New Orchard Road Armonk, New York, ABD) yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 1. Sensör test kabini şematik gösterimi

### Bulgular ve Tartışma

#### *Sıcaklığın Sensörün Ölçtüğü Veriler Üzerine Etkisi*

Ortam sıcaklığı ile sensör verileri arasındaki ilişki incelendiğinde TGS 825 sensörü hariç tüm sensörlerde bu iki değişken arasında pozitif yönlü çok güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Sensör verileriyle sıcaklık arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının 0,951 ile 0,999 arasında değiştiği görülmelidir (Çizelge 2). Yine TGS 825 sensörü hariç tüm sensörlerdeki değişimin en az %90'ının sıcaklığın etkisiyle gerçekleştiği görülmektedir. Çizelge 3'teki istatistiksel sonuçlara göre, TGS 825 hariç tüm sensörlerin verilerini sıcaklık ile açıklayan model 0,01 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ( $P < 0,01$ ).

Çizelge 2'deki çıktılarına göre TGS 825 H<sub>2</sub>S gaz sensörü ile sıcaklık arasındaki korelasyon katsayısının 0,136 olduğu görülmekte olup iki değişken arasında ilişki tespit edilmemiştir (Şekil 2). Sıcaklık bu sensördeki değişimin %1,8'ini açıklamaktadır ve bu da model için yetersizdir. Çizelge 3'teki istatistiksel sonuçlara göre, TGS 825 sensörünün verilerini sıcaklık ile açıklayan model 0,05 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ( $P > 0,05$ ).



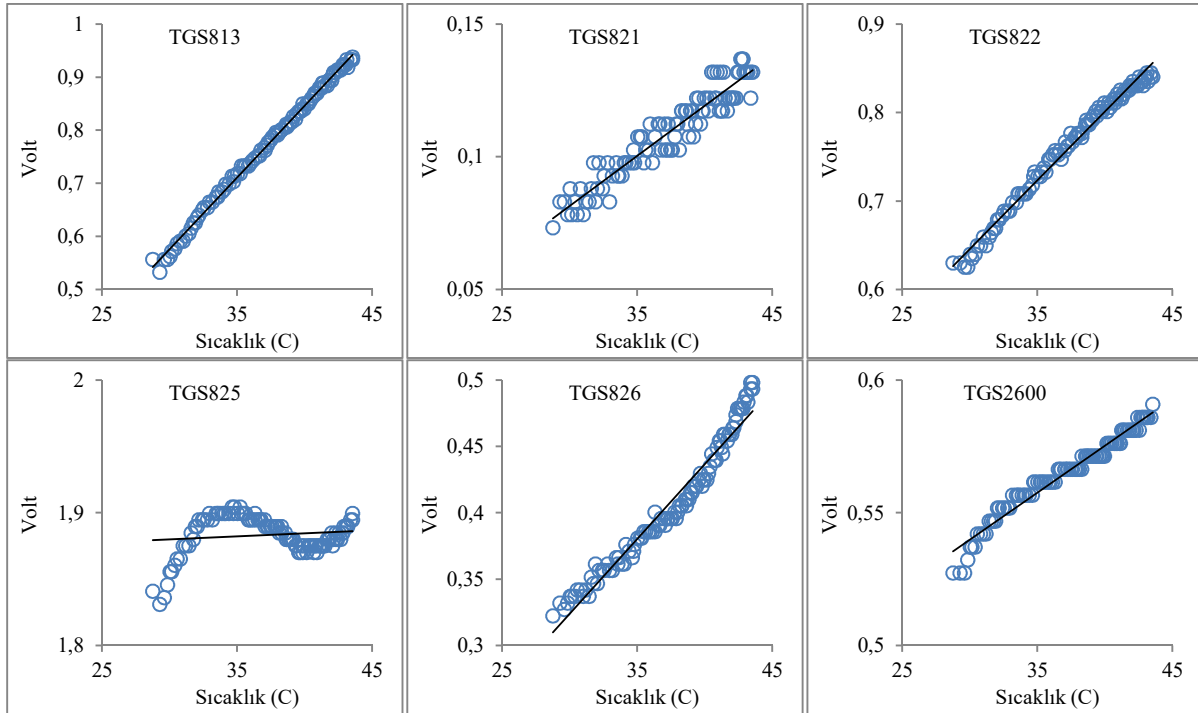
Çizelge 2. Sıcaklık model özetleri

Sensör	R	R-kare	Düzeltilmiş R-kare	Tahminin standart hatası
TGS 813	0,999	0,997	0,997	0,00617
TGS 821	0,951	0,904	0,903	0,00515
TGS 822	0,994	0,987	0,987	0,00738
TGS 825	0,136	0,018	0,009	0,01413
TGS 826	0,980	0,960	0,959	0,00965
TGS 2600	0,982	0,964	0,963	0,00287

Çizelge 3. Sıcaklık ANOVA değerleri

Sensör	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.	Model	
TGS813	Regresyon	1,343	1	1,343	35304,928	0,000	TGS813= -0,235+0,027×T <sup>a</sup>
	Artık	0,004	105	0,000			
	Toplam	1,347	106				
TGS821	Regresyon	0,026	1	0,026	987,710	0,000	TGS821= -0,032+0,004×T
	Artık	0,003	105	0,000			
	Toplam	0,029	106				
TGS822	Regresyon	0,443	1	0,443	8126,741	0,000	TGS822= 0,181+0,016×T
	Artık	0,006	105	0,000			
	Toplam	0,448	106				
TGS825	Regresyon	0,009	2	0,005	39,860	0,000	
	Artık	0,012	104	0,000			
	Toplam	0,021	106				
TGS826	Regresyon	0,234	1	0,234	2506,296	0,000	TGS826= -0,014+0,011×T
	Artık	0,010	105	0,000			
	Toplam	0,243	106				
TGS2600	Regresyon	0,023	1	0,023	2795,092	0,000	TGS2600= 0,434+0,004×T
	Artık	0,001	105	0,000			
	Toplam	0,024	106				

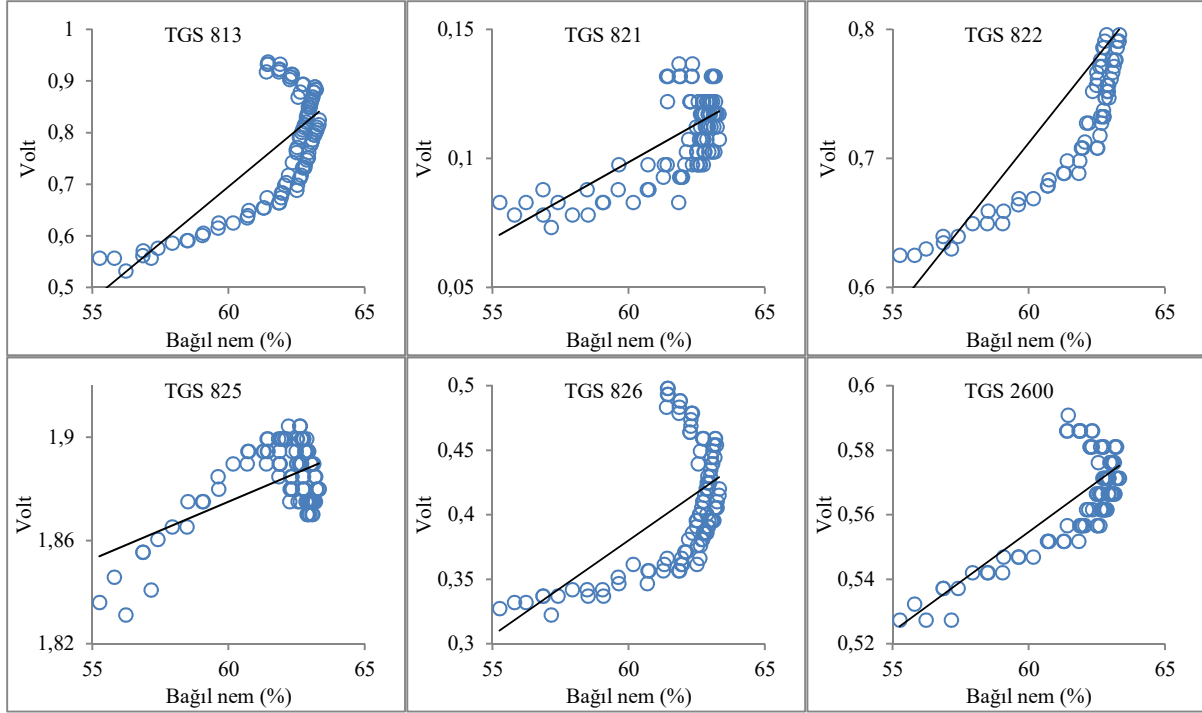
<sup>a</sup> Sıcaklık (°C)



Şekil 2. Sıcaklık-voltaj değişim modelleri

### Bağıl Nemin Etkisi

Farklı bağıl nem değerlerinin sensör verilerine etkisini incelemek üzere yapılan istatistik analizinde bütün sensör verileri ile bağıl nem arasındaki korelasyon katsayılarının 0,555 ile 0,735 arasında değiştiği görülmektedir (Çizelge 4). Çizelge 5 incelendiğinde, bütün sensör tepkilerini açıklayan model verilerinin 0,01 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.



Şekil 3. Bağıl nem-volatj değişim modelleri

Çizelge 6. Sıcaklık ve bağıl nem model özetleri

Sensör	R	R-kare	Düzeltilmiş R-kare	Tahminin standart hatası
TGS 813	0,999	0,998	0,998	0,00476
TGS 821	0,951	0,904	0,902	0,00517
TGS 822	0,997	0,995	0,995	0,00473
TGS 825	0,659	0,434	0,423	0,01078
TGS 826	0,990	0,981	0,980	0,00673
TGS 2600	0,988	0,976	0,975	0,00236

Çizelge 7. Sıcaklık ve bağıl nem ANOVA değerleri

Sensör modeli	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.	Model	
TGS813	Regresyon Artık Toplam	1,344 0,002 1,347	2 104 106	0,672 0,000 0,000	29638,67	0,000	TGS813= -0,385+0,026×T <sup>a</sup> + 0,003×BN <sup>b</sup>
TGS821	Regresyon Artık Toplam	0,026 0,003 0,029	2 104 106	0,013 0,000 0,000	489,5630	0,000	TGS821= -0,037+0,046×T + 0,000106×BN
TGS822	Regresyon Artık Toplam	0,446 0,002 0,448	2 104 106	0,223 0,000 0,000	9984,267	0,000	TGS822= -0,036+0,014×T + 0,004×BN
TGS825	Regresyon Artık Toplam	0,009 0,012 0,021	2 104 106	0,005 0,000 0,000	39,860	0,000	TGS825= 1,516-0,002×T + 0,007×BN
TGS826	Regresyon Artık Toplam	0,239 0,005 0,243	2 104 106	0,119 0,000 0,000	2631,206	0,000	TGS826= -0,2850+0,013×T - 0,005×BN
TGS2600	Regresyon Artık Toplam	0,023 0,001 0,024	2 104 106	0,012 0,000 0,000	2085,389	0,000	TGS2600= 0,371+0,003×T + 0,01×BN

<sup>a</sup> Sıcaklık (°C), <sup>b</sup> Bağıl nem (%)

Sıcaklığın etkisiyle kıyaslandığında bağıl nem için elde edilen ilişkilerin daha zayıf olduğu görülmektedir (Şekil 3). TGS 825 sensöründe pozitif yönlü orta dereceli, diğerlerinde ise yine pozitif yönlü güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Bağıl nem, TGS 813 sensöründeki değişimin %49'unu, TGS 821 sensöründeki değişimin %42,1'ini, TGS 822 sensöründeki değişimin %54,1'ini, TGS 825 sensöründeki değişimin %32,2'sini, TGS 826 sensöründeki değişimin %30,8'ini ve TGS 2600 sensöründeki değişimin %55,3'ünü açıklamaktadır. Gerek Çizelge 4 ve 5, gerekse Şekil 3



incelendiğinde bağıl nemin sensör performansı üzerine etkisi olduğunu gösterse de, her birinin değişimdeki etkileri %32,2 ile %55,3 arasında gerçekleşmektedir. Hem sıcaklığın hem de bağıl nemin birlikte etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

Çizelge 4. Bağıl nem model özetleri

Sensör	R	R-kare	Düzeltilmiş R-kare	Tahminin standart hatası
TGS 813	0,700	0,490	0,485	0,08086
TGS 821	0,648	0,421	0,415	0,01265
TGS 822	0,735	0,541	0,536	0,04428
TGS 825	0,567	0,322	0,315	0,01175
TGS 826	0,555	0,308	0,302	0,04004
TGS 2600	0,743	0,553	0,549	0,01008

Çizelge 5. Bağıl nem ANOVA değerleri

Sensör modeli	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.	Model	
TGS813	Regresyon Artık Toplam	0,660 0,687 1,347	1 105 106	0,660 0,007	100,968	0,000	TGS813= -1,928+0,044×BN <sup>b</sup>
TGS821	Regresyon Artık Toplam	0,012 0,017 0,029	1 105 106	0,012 0,000	76,201	0,000	TGS821= -0,258+0,006×BN
TGS822	Regresyon Artık Toplam	0,242 0,206 0,448	1 105 106	0,242 0,002	123,603	0,000	TGS822= -0,878+0,026×BN
TGS825	Regresyon Artık Toplam	0,007 0,014 0,021	1 105 106	0,007 0,000	49,773	0,000	TGS825= 1,607+0,004×BN
TGS826	Regresyon Artık Toplam	0,075 0,168 0,243	1 105 106	0,075 0,002	46,817	0,000	TGS826= -0,504+0,015×BN
TGS2600	Regresyon Artık Toplam	0,013 0,011 0,024	1 105 106	0,013 0,000	129,777	0,000	TGS2600= 0,184+0,006×BN

<sup>b</sup> Bağıl nem (%)

#### *Sıcaklık ve Bağıl Nemin Sensörün Ölçtüğü Veriler Üzerine Olan Birliktelik Etkisi*

Çizelge 6'daki istatistiksel sonuçlara göre TGS 825 metan sensörü hariç diğer bütün sensör verilerinin % 90,2 ile 99,8'i sıcaklık ve bağıl nem tarafından birlikte açıklanırken, %0,2 ile 9,6 arasındaki kısmı modele dahil edilmeyen başka değişkenler tarafından açıklanmaktadır. Çizelge 7 incelendiğinde de bütün sensörler için sıcaklık ve bağıl nem dikkate alınarak geliştirilen modeller 0,01 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (P<0,01).

Yukarıdaki analizlerde olduğu gibi TGS 825 sensörü her ne kadar anlamlı etkiye sahip olsa da burada istatistiki olarak daha düşük etkiye sahip olmaktadır. Çizelge 6'ya göre TGS 825 H<sub>2</sub>S gaz sensörünün %43,4'ü sıcaklık ve nem tarafından açıklanırken, %56,6'lık kısmı modele dahil edilmeyen başka değişkenler tarafından açıklanmaktadır.

#### **Sonuç ve Öneriler**

Figaro TGS XXX serisi 6 metal oksit yarı-iletken gaz sensörünün farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarında verdikleri tepkiler araştırılmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem'in tek tek ve ikisinin aynı anda sensör çıkış değerleri üzerine etkileri istatistiki olarak değerlendirilmiştir. Her bir parametrenin varyans analizleri yapılmış ve lineer modeller ortaya konmuştur. İstatistiksel analizler özellikle sıcaklığın önemli düzeyde etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Sıcaklığın etkisinin ortadan kaldırılması için mutlaka sıcaklık kompensasyonu devrelerinin tasarlanarak veri toplama ünitesine entegre edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra yapılacak çalışmalarda geliştirilen modeller kullanılarak ham sensör verileri düzeltilerek kullanılabilir.

Bağıl nem değerlerindeki farklılığın da sensörlerin voltaj çıkışı değerleri üzerinde etkisi olduğu istatistiki olarak ortaya konmuştur. Ancak bağıl nem ile sensör değeri arasındaki korelasyon katsayılarının 0,555'e kadar düştüğü görülmüştür. Bağıl nem'in sensörlerdeki değişimi etkileme derecelerinin de %40'lara kadar düştüğü gözlenmiştir. Aynı değerler sıcaklıkta %90'lar düzeyinde seyretmiştir. Dolayısıyla özellikle sıcaklık kompensasyonuna özel önem verilmelidir. Bir diğer önlemlerde tasarlanan akıllı algılama sistemlerinin sensör haznelerinin sıcaklık ve bağıl nem değerlerini



sabit tutacak iklimlendirme ünitelerinin tasarımıdır. Elektronik teknolojilerindeki hızlı gelişmeler gerek kompensasyon devrelerinin gerekse otomatik iklimlendirme mekanizmalarının tasarımını hem kolay hem de ekonomik hale getirmiştir. Sonuç olarak, geliştirilecek algılama sistemlerinde sensör kompensasyonlarına önem verilmesi önerilmektedir.

#### **Teşekkür**

İstatistiksel analizlere yaptığı katkılarından dolayı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü öğretim elemanı Dr. Tuğba Söküt AÇAR'a emeğinden dolayı teşekkür ederiz.

#### **Kaynaklar**

- Aleixandre, M., Gerboles, M., 2012. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas. *Chemical Engineering Transactions*. 30: 169–74.
- Gerboles, M., Buzica, D., 2009. Evaluation of micro-sensors to monitor ozone in ambient air. *Joint Research Center for Environment and Sustainability*, EUR 23676 EN, DOI 10.2788/5978.
- Kızıllı, U., Panigrahi, S., Kubiak, A., 2001. Development of a prototype electronic nose system for meat quality assessment, 2001 North Central ASAE-CSAE Intersectional Conference, ABD, 28-29 Eylül 2001.
- Kızıllı, U., Genç, L., Genç, T. T., Rahman, S., Khaitsa L. M., 2015a. E-nose identification of *Salmonella enterica* in poultry manure. *British Poultry Science*. 56(2): 149-156.
- Kızıllı, U., Genç, L., Rahman, S., Khaitsa L. M., Genç T. T., 2015b. Design and test of a low-cost electronic nose system for identification of salmonella enterica in poultry manure, *Transactions of the ASABE*. 58: 819-826.
- Kızıllı, U., Genç, L., Aksu, S., 2017. Air quality mapping using an e-nose system in Northwestern Turkey, *Agronomy Research*.15(1): 205-218.
- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H., 2012. A survey on gas sensing technology. *Sensors*. 2012(12): 9635-9665.
- Szczurek, A., Maciejewska, M., 2012. Gas sensor array with broad applicability, *Sensor Array*, Prof. Wuqiang Yang (Ed.), ISBN: 978-953-51-0613-5, InTech.  
<http://www.intechopen.com/books/sensor-array/gas-sensor-array-with-broad-applicability>
- Wei, P., Ning, Z., Ye, S., Sun, L., Yang, F., Wong, K.C., Westerdahl, D., Louie, K. P. K., 2018. Impact analysis of temperature and humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient air quality monitoring. *Sensors* 2018, 18, 59. doi:10.3390/s18020059.