



Electronic Tongue Applications in Food Engineering

Zeliha Kaya^{1,a,*}, İlkyay Koca^{2,b}

¹Food Engineering Department, Engineering Faculty, Giresun University, 28200 Giresun, Turkey

²Food Engineering Department, Engineering Faculty, Ondokuz Mayıs University, 55270 Samsun, Turkey

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 03/01/2020 Accepted : 01/06/2020</p> <p>Keywords: Electronic tongue Taste Flavour Chemical sensor Sensory Technology</p>	<p>The electronic tongue is defined as the device, consisting of a series of sensors, used to characterize the taste of complex liquid or converted into liquid form samples. This device can be used in many fields of application; in medicine, chemistry, environment, and food industry. In the food industry, usually, the electronic tongue is used to control the freshness, the maturity, and the non-deterioration of fruits, vegetables, meats, beverages, and dairy products. Commonly, trained panelists participate in taste and sensory analysis. However, the electronic tongue is preferred due to the encountered disadvantages, where the taste perception is subjective and moreover, varies from an individual to another. In the present review, the basic structure of electronic tongues with different systems, working principles, food application areas, advantages, and disadvantages are discussed.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(7): 1463-1471, 2020

Gıda Mühendisliğinde Elektronik Dil Uygulamaları

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derleme Makale</i></p> <p>Geliş : 03/01/2020 Kabul : 01/06/2020</p> <p>Anahtar Kelimeler: Elektronik dil Tat Lezzet Kimyasal sensör Sensör Teknolojisi</p>	<p>Elektronik dil, bir dizi sensörden oluşan ve sıvı ya da sıvı forma dönüştürülmüş karmaşık örneklerin tadını karakterize etmek için kullanılan cihaz olarak tanımlanmaktadır. Bu cihaz, tıp, kimya, çevre ve gıda alanlarında kullanım olanaklarına sahiptir. Elektronik dil gıda sanayinde; meyve, sebze, et ve süt ürünleri ile içeceklerde tazeliğin kontrolünde, bozulma veya olgunlaşmanın takibinde kullanılmaktadır. Yaygın olarak, tat analizlerinde eğitimli panelistlerden yararlanılmaktadır. Ancak, tat algısının bireyler arası değişkenlik göstermesi ve öznel olması gibi dezavantajlarından dolayı elektronik dil tercih edilmektedir. Bu derlemede, farklı sistemlere sahip olan elektronik dillerin temel yapısı, çalışma prensipleri, gıdalarda kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır.</p>

^a zeliha.kaya@giresun.edu.tr

^b <https://orcid.org/0000-0002-3285-9659>

^b itosun@omu.edu.tr

^b <https://orcid.org/0000-0001-6089-8586>



Giriş

Günümüzde, tüketicilerin bilinçlenmesi ile güvenilir, besleyici ve yüksek kaliteli ürünlere talep artmıştır. Gıdalarda kabul edilebilir bir kalite ve güvenlik düzeyi sağlayabilmek amacıyla tüm gıda ürünlerinin izlenmesi gerekmekte ve bu nedenle de hammaddeden başlayarak son ürüne kadar, tüm üretim aşamalarında birçok analiz yapılmaktadır.

Tüketiciler açısından kalite değerlendirilmesi temel olarak duyu organları kullanılarak yapılan duysal analizlerdir (Borràs ve ark., 2015). Ancak uzman panelistler tarafından yapılması gereken duysal analizler zaman alıcı ve yüksek maliyetli süreçlerdir. İnsan tepkisinin kokuya özneliği ve bireyler arasındaki değişkenlik gibi ilave sorunlar da göz önüne alınmalıdır. Diğer yandan çoğu gıda aromasının karmaşıklığı, gaz veya sıvı kromatografisi gibi geleneksel lezzet analiz teknikleriyle karakterize edilmesini zorlaştırmaktadır (Peris ve Escuder-Gilabert, 2009). Bu cihazlar gıdanın içindeki bileşenlerin ve miktarlarının belirlenmesinde, dolayısıyla lezzetinin değerlendirilmesinde yararlı olabilmektedirler. Fakat zahmetli, zaman alıcı ve özel analitik beceriler gerektiren yöntemler olmalarının yanı sıra, ön işlem gerektirmeleri, yüksek maliyetli ve tehlikeli organik çözücü kullanımı gerektirmeleri gibi dezavantajlara da sahiptirler (Legin ve ark., 1997; Huang ve ark., 2015). Tüm bunlar göz önüne alındığında, gıdaların kontrolü için panelistlerin duysal analiz sonuçları ile yüksek korelasyona sahip yanıtlar verebilecek sensör teknolojilerine ihtiyaç duyulmakta ve elektronik burun, elektronik dil gibi cihazlar geliştirilmektedir.

Elektronik burun ve diller düşük maliyetle üretilebildiği ve kısa bir analiz süreci sağladığı için, gıdanın koku ve lezzetini karakterize etmek için geliştirilmiş tahribatsız teknikler olarak giderek daha popüler hale gelmektedirler (Di Natale ve ark., 1998). Bu sensörlerin aynı zamanda tekrarlanabilirlik ve kararlılık özellikleri de oldukça iyidir (Di Natale ve ark., 1997). Bununla birlikte, özellikle sensörler teknolojisi, veri işleme, sonuçların yorumlanması ve geçerlilik çalışmaları ile ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Bu derlemede elektronik dil çeşitleri, çalışma prensipleri ve gıda sanayiinde kullanım olanakları hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır.

Elektronik Dil

İnsan Dilinin Yapısı ve Tat Algısı

Dil, çoğu omurgalıda ağız zemininde bulunan ve gıdaların çiğnenmesinde kullanılan kashı bir hidrostat olarak tanımlanmaktadır. Dil üst yüzeyi papilla ve tat tomurcukları ile kaplı olduğundan tat almak için kullanılan birincil organdır (Latha ve Lakshmi, 2012).

Tadı alınan madde, tat hücrelerinin en üst yüzeyinde bulunan ve ağız ile temasta olan reseptörler tarafından tespit edilir (Spielman ve ark., 1996). Tat algısı temelde, ekşi, tatlı, tuzlu, acı ve umami olmak üzere beş tattan oluşur. Tat alıcılarının yüksek ve kesin seçicilik yerine yarı seçici bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Yüksek seçicilik tat alıcılarının belirli bir kimyasal maddeye birebir karşılık gelmesi anlamına gelmektedir (Tahara ve Toko, 2013).

Tat maddeleri genelde hidrofiliktir ve gıdalardan tükürük ile ekstrakte edilen küçük molekül/iyonlardan oluşur. Bu moleküller daha sonra her bir temel tat için özel tat alıcıları ile etkileşmektedir (Zhang ve ark., 2012). Tat tomurcukları kemoreseptörlerdir. Gıdalardaki kimyasal sinyalleri, vücutta etki potansiyeli olarak adlandırılan elektrik sinyallerine dönüştürürler ve sinir sistemi vasıtasıyla beyne giderek tat hissi verirler (Latha ve Lakshmi, 2012).

Tat alımı mekanizması üzerine araştırmaların kısa bir geçmişi vardır; tat hücrelerinde bulunan acı tadı algılayan reseptörler 2000 yılında keşfedilmiş ve ardından tatlılık reseptörleri ile umami tat reseptörleri keşfedilmiştir (Adler ve ark., 2000). Tuzlu ve ekşi tadın algılanmasının arkasındaki mekanizmalar henüz netleşmemesine rağmen aday reseptörler araştırılmaya devam edilmektedir (Huang ve ark., 2006). Tatlı, umami ve acı tadı algılayan reseptörlerin sadece dildeki tat tomurcuklarında değil, aynı zamanda sindirim organlarında, böbreklerde ve hatta beyinde de bulunabildiği görülmüştür ve bu durumun fizyolojik öneminin açıklanabilmesi için çalışmalar devam etmektedir (Tahara ve Toko, 2013).

Elektronik Dil Gelişim Süreci

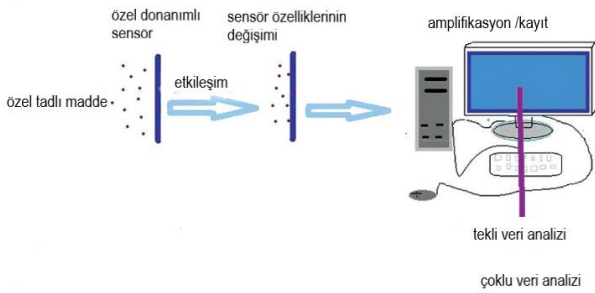
Dışardan yapılan uyarılara yapay olarak insan cevabını yeniden üretme fikri ilk kez 1943'te ortaya atılmıştır. Bu fikir, sinirsel bilgisayara dayalı bir "elektronik beyin" ve yapay zeka oluşturmak için geliştirilmiştir (Vlasov ve ark., 2005). Bu kavramların ilk analitik aracı ise, 1982'de gazların analizi için kullanılan "elektronik burun" olmuştur (Persaud ve Dodd, 1982). 1995'te tanıtılan "elektronik dil", çok bileşenli matrislerin nicel ve nitel analizinde umut verici bir araç olarak görülmektedir (Legin ve ark., 2000).

Tat alımının moleküler ve hücresele biyolojisi üzerine çalışmalar gerçekleştirilirken, tatların tanımlanması ve sınıflandırılması için algılama teknolojileri, tat reseptörlerinin keşfinden önce, 1990'lı yıllarda geliştirilmiştir (Tahara ve Toko, 2013). Bunun öncesinde ise tat değerlendirmelerinde özel eğitilmiş panelistler kullanılmakta ancak gıda endüstrisinde tadın değerlendirilmesinde temel metod olan panelist kullanımının düşük objektiflik ve tekrarlanabilirlik gibi bazı sorunlar teşkil ettiği bilinmektedir. Bu sorunları çözmek amacıyla tatların ayırım ve sınıflandırmasını nesnel olarak yapabilen ve elektronik dil olarak tanımlanan bir algılama teknolojisi geliştirilmiştir. Bu cihazlara elektronik dil denmesinin nedeni, çalışma prensiplerinin insanların tat alma duyusuna benzer şekilde olmasındandır. Elektronik diller taşınabilir olup, yerinde ölçüm sağlayabildikleri için önemli sistemler olarak görülmektedir. Aynı zamanda panelistlerin toksik maddelere veya kötü tatlara maruz bırakılmasını önlemektedirler (Ramamoorthy ve ark., 2014).

Tat algılama sistemleri, farklı yapay membranlar ve elektrokimyasal teknikler vasıtasıyla belirli maddeleri algılayan analitik sensör sistemleridir. Bu sistemleri için, tat sensörü, tat çipi, tat algılama sistemi, elektronik algılayıcı dizi sistemi, biyomimetik algılayıcı dizi sistemi veya elektronik dil gibi çeşitli isimler kullanılmaktadır (Woertz ve ark., 2011).

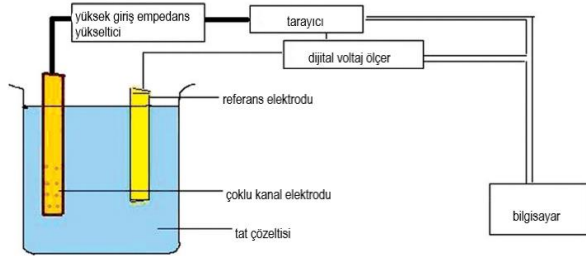
Elektronik Dil Çalışma Prensibi

Bir elektronik tat algılama sisteminin temel unsurları, Şekil 3'te görüldüğü gibi, değiştirilebilen farklı özellikteki sensörler, örnek tablası, amplifikatör ve veri kaydı için bir bilgisayardır. Bu sistem, belirli tat niteliğine sahip moleküllerin insan dilindeki tat tomurcuklarıyla etkileşime girdiğinde neler olduğunu taklit ederek sinyal oluşturmaktadır (Podrazka ve ark., 2017). Dildeki tat tomurcukları, yüzeyde bu moleküller ile etkileşerek potansiyel değişiklikleri başlatan sensörler ile temsil edilmektedir. Sinyaller ise insanda fizyolojik sinir ağına karşılık gelen bilgisayar tarafından kaydedilen fizyolojik etki potansiyelleri ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen veriler mevcut olan sensör tepkileri matrisi temelinde değerlendirilip sonuçlar insan hafızasıyla veya hazır tat şablonlarıyla bağlantılı olarak yorumlanabilmektedirler (Latha ve Lakshmi, 2012).



Şekil 1. Elektronik tat algılama sisteminin temel çalışma prensibi (Latha ve Lakshmi, 2012).

Figure 1. Basic working principle of electronic taste sensing system.



Şekil 2. Potansiyometrik çok kanallı tat algılayıcı sisteminin deneysel kurulumu (Latha ve Lakshmi, 2012).

Figure 2. Experimental design of potentiometric multi-channel taste detection system



Şekil 3. TS-5000Z Tat Algılama Sistemi (Intelligent Sensor Technology, Inc.) (Podrazka ve ark., 2017).

Figure 3. TS-5000Z Taste Sensing System

Sensör Teknolojisi

Genel olarak, elektronik dil sistemlerinde elektrokimyasal (potansiyometrik, amperometrik, voltametrik vb.) ve gravimetrik - optik sensörler kullanılmaktadır (Ciosek ve Wróblewski, 2007; del Valle, 2012).

Potansiyometrik sensörler, özellikle iyon seçici elektrotlar (İSE), en yaygın kullanılan sensörlerdir. Günümüzde kullanılan elektronik dillerin çoğu İSE'lerin modifikasyonları ile üretilmektedir (Legin ve ark., 2002). İSE çalışma prensibi, sıfır akım koşullarında bir referans elektrota karşı potansiyel değişimlerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Bilinen ilk İSE, oksit camına duyarlı membran kullanılarak 1907 yılında sulu çözeltilerde hidrojen aktivitesini belirlemek amacıyla üretilmiştir. Sonrasında organik ve inorganik olmak üzere (kristal malzemeler, sıvı veya plastikleştirilmiş polimerler, kalkojenit camlar, immobilize enzimler vb) birçok membran kullanılmıştır (Vlasov ve ark., 1997; Vlasov ve Legin, 1998). Şekil 2'de potansiyometrik çok kanallı tat algılayıcı sistemin deneysel kurulumu verilmiştir.

İyon seçici elektrotlar, bilinen ve kolay bir çalışma prensibine sahip olmaları, düşük maliyetleri, kolay imal edilebilmeleri, basit kurulumları, birçok değişik türe seçici sensör edinme imkanı sunmaları ve en önemlisi moleküler tanımanın doğal mekanizmasına en yakın olmaları nedeniyle elektronik dillerde en çok tercih edilen elektrotlardır. Potansiyometrik ölçümlerin dezavantajları ise ölçümün sıcaklığa bağlı olması, çözelti değişiminin etkisi ve yük transferinin doğasını etkileyen çözelti bileşenlerinin adsorbe edilmesidir. Ancak bu faktörlerin etkisi sıcaklığın kontrolü, adsorpsiyonu sınırlayan çözücülerle elektrotların yıkanması gibi işlemlerle aşırıye indirilebilmektedir (Legin ve ark., 2002; Ciosek ve Wróblewski, 2007). Şekil 3'te yaygın olarak kullanılan bir tat algılama sistemi olan TS-5000Z'nin fotoğrafı verilmiştir.

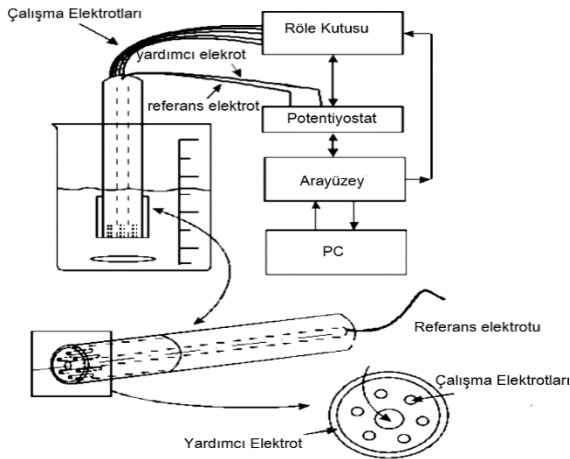
Bir sensör dizisinin seçiciliği ve saptama sınırları, sensörlerin bileşimine ve özelliklerine bağlıdır. Potansiyometrik sensörlerde seçicilik eşitlik 1'de gösterilen Nikolsky-Eisenman eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E = E^0 + \frac{RT}{z_i F} \left[a_i + \sum_j K_{ij} (a_j)^{z_i/z_j} \right] \quad (1)$$

Burada K_{ij} seçicilik katsayısını, i birincil iyon, j elektrota yanıt veren iyonu, a_i ve a_j bu iyonların aktifliğini, z_i ve z_j yine bu iyonların yüklerini göstermektedir. E^0 , elektrotun standart potansiyelinin ve bağlantı potansiyelinin toplamını, E ise iyon seçici ve referans elektrottan oluşan elektrokimyasal hücre için potansiyel farkı ifade etmektedir (del Valle, 2012; Latha ve Lakshmi, 2012).

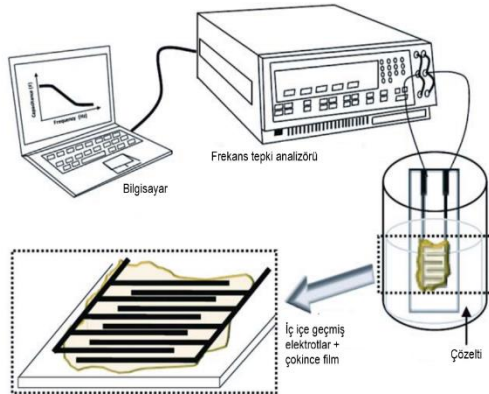
Voltametrik ölçümlerde ise elde edilen sinyal akım-potansiyel ilişkisine dayanmaktadır. En basit ölçüm düzeneğinde üç elektrot kullanılmaktadır, bunlar: referans, çalışma ve yardımcı (ikincil) elektrotlardır. Şekil 4'te voltametrik bir elektronik dil düzeneği verilmiştir. Referans elektrodun potansiyeli sabit olarak kabul edilmekte ve çalışma elektrodu ile ikincil elektrot arasında akım sağlanmaktadır. Akım, numunedeki elektroaktif

türlerin taşınması ile meydana gelen elektrolizin oranı ile ilişkilidir. Elektrolize etki eden faktörler de difüzyon katsayıları ve elektroaktif tür konsantrasyonlarıdır. Voltametrik sensörler, yüksek seçicilik ve duyarlılık, yüksek sinyal-gürültü oranı, düşük algılama limitleri ve çeşitli ölçüm modları bulunması (kare dalga, büyük darbeli voltametri, dönüşümlü voltametri, vb.) nedeniyle çok bileşenli ölçümler için avantajlı cihazlar olarak görülmektedir. Ayrıca, elektrotların pek çok muhtemel modifikasyonu bulunmaktadır ki bu çeşitli türlere karşı, çeşitli duyarlılık ve seçicilik gösteren sensörlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Ciosek ve Wróblewski, 2007). Bununla birlikte çalışma prensipleri nedeniyle voltametrik sensörler, sadece redoks aktif maddeler üzerinde uygulama alanına sahiptirler (Podrazka ve ark., 2017). Voltametrik ölçümler için kullanılan elektrotların yüzeyleri, kimyasala duyarlı malzemelerle modifiye edilebilmektedir. Bu şekilde elde edilen sensörler (metalik elektrotlar veya seçici filmler ile kaplı karbon pasta elektrotları vb.), yüzeyi kaplanmamış metal elektrotlara göre çok daha farklı bilgiler üretebildiği ve seçiciliği arttırabildiği için, zayıf sinyaller veren maddelerin tespit edilmesine olanak sağlamaktadırlar (Lvova ve ark., 2015).



Şekil 4. Voltametrik bir elektronik dil konfigürasyonu (Riul et al., 2010).

Figure 4. A voltammetric electronic tongue configuration



Şekil 5. Empedans spektroskopisi deneysel tasarımı (Riul ve ark., 2010).

Figure 5. Experimental design of impedance spectroscopy

Elektronik dillerde kullanılan bir diğer elektrokimyasal sensör çeşidi, ölçümlerde empedans spektroskopisi kullanan sensörlerdir (Ferreira ve ark., 2003). Bu sensörlerde algılama ünitesi materyallerinin elektroaktif olmasına gerek yoktur ve diğer elektrokimyasal yöntemlerin aksine referans elektroda ihtiyaç duyulmamaktadır. Empedans spektroskopisinde, tüm sistemin karmaşık empedansı, ultra ince filmler ile kaplanmış ve iç içe geçmiş elektrotlara uygulanan, değişen frekanslardaki sinyaller ölçülerek değerlendirilmektedir. Elektrot/elektrolit ara yüzeyinde oluşturulan elektrostatik çift katman, düşük frekanslarda yanıtı yönetmektedir. Toplam empedansı, ara frekanslarda elektrotları kaplayan solüsyon iletkenliği ve ultra ince filmler belirlerken, yüksek frekanslarda büyük ölçüde geometrik direncin belirlediği bildirilmektedir (Riul ve ark., 2010). Empedans spektroskopisi ölçümlerinde kullanılan genel deney düzeneği Şekil 5'te gösterilmektedir.

Optik teknikler, ultraviyole (UV) görünür ışıktan yakın kızılötesine (NIR) ve kızılötesi (IR) spektruma kadar uzanan belirli dalga boylarında ışık emilimine dayanır. Birçok bileşik, farklı emilim spektrumlarına sahiptir, böylece belirli bir dalga boyunda tarama, test edilen numuneye spesifik spektrum verebilir (Kalit ve ark., 2014). Optik metodlar yüksek tekrarlanabilirlik ve uzun süreli istikrar açısından avantajlıdır (Ciosek ve Wróblewski, 2007). Optik sensörler, polarizasyon, floresans, optik tabaka kalınlığı, renk veya dalga boyu gibi ışık özelliklerinin değişimini ölçmektedir (Peris ve Escuder-Gilabert, 2016). Optik sensörler üç ana bölümden oluşmaktadır, bunlar; bir ışık kaynağı, optrod ve bir dedektördür. Işık kaynağı, sensörün en hassas şekilde çalışabilmesi için spesifik analitik dalga boyuna ayarlanmaktadır. Optrod, uygun indikatör molekülleri içeren polimerik membranlar gibi kimyasala duyarlı bir tabaka olarak tanımlanabilmektedir. Hedef analit ile temas ettiğinde, indikatörün optik özellikleri (floresans, absorpsiyon vb.) değişmektedir. Bu değişiklik, amacı optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürmek olan bir dedektör (genellikle bir fotodiyot veya foto çarpanı) tarafından izlenmektedir. Optik sensörlerde kullanılan çok fazla çeşitli indikatör bulunmaktadır ve böylece elektrokimyasal sensörlere göre daha fazla analit saptanabilmektedir (Ciosek ve Wróblewski, 2007; Ghasemi-Varnamkhasti ve ark., 2018). Optik sensörler çeşitli pH'larda amino asitler veya spesifik iyonlar gibi daha özel bileşik gruplarının saptanması için de kullanılabilirler (Krantz-Rülcker ve ark., 2001). Üstelik elektrokimyasal olarak tespit edilmesi zor olan türler (yükü olmayan ve/veya elektroaktif olmayan gibi) çoğunlukla optik sensörler kullanılarak analiz edilebilmektedirler. Ayrıca, optik sensörlerin birçok olası çalışma modu vardır, bunlar; floresans yoğunluğu, emilim, yansıtma vb. olarak örneklendirilebilir. Bununla birlikte, sensör hazırlığı, dayanıklılığının zayıf olması ve sinyal parazitleri gibi bazı dezavantajlar bu tür cihazların kullanımını sınırlandırmaktadır (Ciosek ve Wróblewski, 2007; Piriya ve ark., 2017).

Kütle sensörleri, piezoelektrik etkiyi kullanan minyatür katı hal cihazları olarak tanımlanmaktadır ve çoğunlukla elektronik burunlarda tercih edilmektedirler. Bununla birlikte kütle sensörleri yüksek hassasiyetleri, evrensel ağırlık değişikliklerine dayalı algılama prensipleri, gerçek zamanlı elektronik okuma özellikleri, küçük boyutları, sağlamlıkları ve düşük maliyetleri ile gelecek vadede

cihazlar olarak görülmektedirler (Sun et al., 2008). Sensörler genellikle çeşitli kimyasala duyarlı malzemelerle kaplanabilen kuvars kristallerden üretilmektedirler. Ölçüm, belirli bir frekanstaki piezoelektrik maddenin uyarılması ile yapılmaktadır ve bu, hedef analitin kimyasala duyarlı bir materyal tarafından adsorbe edilmesiyle sağlanmaktadır. Ölçülen sinyal adsorbe edilen analitin kütle değişikliklerinin bir fonksiyonudur. Kuvars rezonatörlerde akustik dalga, kütlelerin içinden ve/veya yüzeyi boyunca yayılabilmektedir. Bu sayede birçok olası çalışma modu bulunmaktadır (Ciosek ve Wróblewski, 2007). Piezoelektrik etkiyi ölçen başlıca iki çeşit sensör kullanılmaktadır. Bunlar; Kuartz Kristal Mikrobalans ve Yüzey Akustik Dalga cihazlarıdır. Sıcaklığı, kütle değişimlerini, basıncı, kuvveti ve ivmeyi ölçebilirler, ancak sıvı örneklerden ziyade gaz örneklerin analizinde kullanıldıkları için özellikle elektronik burunda kütle değişimini algılayan cihazlar olarak yapılandırılmışlardır (Jacesko ve ark., 2005; Ghasemi-Varnamkhasti ve ark., 2018).

Ölçüm ilkesine dayanarak, sensör dizileri için kullanılan algılama materyalleri değişmektedir (Legin ve ark., 2002). Örneğin potansiyometrik ölçümlerde kullanılan malzemeler kalkogenit ve oksit camlar iken (Vlasov ve ark., 1997), amperometrik (akım duyarlı) ölçümlerde soy metaller kullanılmaktadır (Winquist ve ark., 1997). Optik sensörler için de plastikleştirilmiş organik polimerler kullanılmaktadır (Legin ve ark., 1999). Bir sensör dizisinin seçicilik ve algılama limitlerinin, algılama malzemelerinin bileşimine ve özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Dizideki sensörlerin sayısı 4 ile 40 arasında değişebilmektedir. Elektronik dil sistemlerinde kullanılan en yaygın sensör türü potansiyometrik sensörler olarak bildirilmektedir (Latha ve Lakshmi, 2012).

Veri İşleme

Uygulamanın türüne bağlı olarak, verilerin işlenmesi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan ikisi Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Temel Bileşen Analizi (PCA)'dir (Riul ve ark., 2010). Eğer sistem yapay sinir ağlarını kullanıyorsa biyomimikri (biyotaklit) durumu açığa çıkmaktadır yani verilen yapay sinir ağları hayvan sinir sistemi fizyolojisinden uyarlanmaktadır. Kullanılabilir farklı teknikler uygulama türüne göre sınıflandırılabilir. Eğer hedef niteliksel ise, yani örnekler sınıflandırılacak veya belli bir özelliğe göre nitelendirilecek ise PCA ilk adım olarak kullanılmaktadır. Bundan sonra, hangi sınıfa dahil olduğunu tahmin etmek için bazı kalıp tanıma araçları gerekmektedir. Bunun için, doğrusal diskriminant analizi, en yakın komşu modeli, hafif bağımsız sınıf kıyaslama modeli (SIMCA) veya ANN gibi yöntemler kullanılabilir. Hedef niceliksel olduğunda ise, sayısal bilgiler veren farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri Temel Bileşen Regresyonu (PCR)'dur ki bu PCA'dan çoklu bir regresyon kurması açısından ayrılmaktadır. Diğer yöntemler Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (PLS) ve yine ANN'dir. Başlangıç bilgilerinin çok karmaşık olduğu durumlarda, gereksiz bilgileri bastırıp önemli verileri korumak için öznelik çıkarımı yararlı görülmektedir. Bunun için PCA yöntemi kullanılmakta ve Legendre polinomları, Fourier veya Wavelet dönüşümleri ile özellikler değerlendirilmektedir (Ciosek ve Wróblewski, 2007; del Valle, 2012).

Elektronik Dil Kullanım Alanları ve Yapılan Çalışmalar

Elektronik diller, tat analizi, formülasyon, ürün geliştirme ve proses iyileştirme gibi alanlarda kullanılabilir için özel olarak tasarlanmış cihazlardır. Özellikle ilaç endüstrisi, gıda ve içecek sektörü olmak üzere çeşitli sanayi alanlarında çeşitli uygulamaları bulunmaktadır.

Tıp ve eczacılık alanında, ürünler sistemin işlev bozukluğu ve kreatinin düzeylerini tespit etmek için insan idrarının analizinde, ilaçların tat maskeleyme etkinliğini ölçmede, ilaçların tat stabilitesini kontrol etmede, bitkisel ilaç üretiminde ve kafein, paretamol vb. tayininde kullanılmaktadır (Latha ve Lakshmi, 2012).

Elektronik dil çevre analizlerinde, hava ve suyun tarımsal ve endüstriyel kirliliğini belirlemede, uyuşturucu tespitinde, biyolojik ve kimyasal silah araştırmalarında ve su, metal iyonları, endotoksinler, pestisitler açısından çevre kontrollerinde kullanılmaktadır.

Gıda sanayisinde ise özellikle içecek sektöründe elektronik dil yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin içeceklerde alkol bulunup bulunmadığını araştırılmasında, şaraplarda yıllanmayla değişen aroma bileşenlerinin tespitinde ve farklı menşei veya farklı markalardaki kahvelerin kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Aynı zamanda taze süt ile bozulmuş sütü ayırmada, meyve sularının raf ömrü tayininde ve maden sularının sertliğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Elektronik diller gıdalardaki aminoasitlerin karakterizasyonunda da kullanılmaktadır. Örneğin lösin ve izolösin acı, alanin tatlı aminoasitlerdir (Miyana ve ark., 2002). Restoran ve kafelerde ise elektronik diller yiyecek ve içeceklerde tat optimizasyonu amacıyla ve tatlar arası etkileşimi belirlemek amacıyla kullanılabilir. Çizelge 1'de gıda alanında elektronik dil kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

Sonuç

Elektronik diller memeli tat alma sistemlerini taklit ederek geliştirilmiş cihazlardır ve birçok sensörün bulunduğu sensör dizilerinden oluşmaktadır. Henüz insan dili kadar hassas ve seçici olmasalar bile algılamada oldukça başarılı cihazlar olarak değerlendirilmektedirler. Elektronik diller bir tadı algılayıp, tanımlayabilmenin yanı sıra ölçüm yapılan madde içinde her bir tat bileşeninden ne oranda bulunduğunu, aynı zamanda tatların hangi sınıflara dahil olduğunu ve ne kalitede olduklarını da algılayabilen cihazdır. GC ve HPLC gibi enstrümental yöntemlere göre hızlı cevap vermeleri ve taşınabilir ölçekte olan versiyonlarının da bulunması nedeniyle avantajlı görülmektedirler. Aynı zamanda bu enstrümental cihazlar örnekteki tat-koku bileşenlerini ve bunların miktarlarını belirlemeye yardımcı olsalar bile gıdanın tadının neye benzediğini analiz etmede yeterli görülmemektedirler. Bu yeni teknolojinin başka avantajları da bulunmaktadır. Bireysel değişkenlikleri elimine etme, çevrimiçi izlemenin imkansızlığını giderme, nesnel ölçümler verme, panelistlerde zararlı bileşimlere ve kötü tada maruz kalma durumunu ortadan kaldırma, sonuçların zihinsel durum gibi insan ruh hali ile ilgili sorunlardan etkilemesini önleme vb. bu avantajların en önemlileri olarak sayılabilirler. Bu özellikleri ile elektronik diller tat analizlerinde umut verici olarak değerlendirilmekte ve tüm dünyada bu cihazların iyileştirme-geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Çizelge 1. Gıdalarda elektronik dil kullanılarak yapılan bazı çalışmalar.

Table 1. Some studies using electronic tongue in foods.

Gıda	Kullanım Amacı	Sensör Çeşidi	Referans
Meyve- Sebze			
Domates	Lezzet profiline göre sınıflandırma	potansiyometrik	(Beullens ve ark., 2008)
Mandalina	Kurutulmuş mandalina kabuğundan fonksiyonel bileşen ekstraksiyonunda kullanılan çeşitli yöntemlerin etkisinin araştırılması	potansiyometrik	(Zhang ve arl., 2019)
Üzüm	Olgunlaşmanın izlenmesi	voltametrik	(Pigani ve ark., 2018)
Kayısı	Türler arası tat farkının belirlenmesi	potansiyometrik	(Kantor ve ark., 2008)
Elma	Türler arası tat farkının ve organik asit miktarının belirlenmesi	potansiyometrik	(Rudnitskaya ve ark., 2006)
Şizandra üzümü	Farklı türlerin ayırt edilemesi	potansiyometrik	(Mou ve ark., 2018)
İçecekler			
Şarap	Farklı sıcaklık uygulamaları ve yıkama işlemlerine tabi tutulan meşe parçacıklarının maserasyona etkisinin araştırılması	potansiyometrik	(Rudnitskaya ve ark., 2017)
Çay	Çay kalitesinin kalitatif ve kantitatif değerlendirilmesi	potansiyometrik	(Xu ve ark., 2019)
Şarap	Şarapların organik asit seviyelerine göre sınıflandırılması	voltametrik	(Milovanovic ve ark., 2019)
Yaban Mersini Şarabı	Yaban mersini şarabının lezzet özellikleri üzerine farklı mannoprotein içeriği etkisinin araştırılması	-	(Sun ve ark., 2019)
Nar şarabı	Fermentasyon ve olgunlaşma aşamalarında lezzet profilinin incelenmesi	potansiyometrik	(Lan ve ark., 2017)
Şarap	Brett karakterinin belirlenmesinde	voltametrik	(González-Calabuig ve del Valle, 2018)
Bira	Farklı bira çeşitlerinin kantitatif analizi	potansiyometrik	(Polshin ve ark., 2010)
Elma suyu	Elma suyu kalitesinin belirlenmesi	potansiyometrik	(Bleibaum ve ark., 2002)
Yaban Mersini Suyu	Mikroçip darbeleri elektrik alan uygulaması sonrası yaban mersini suyunun lezzet özelliklerinin araştırılması	-	(Zhu ve ark., 2019)
Süt ve Süt Ürünleri			
Süt	Açılmış pastörize sütlerin kalitelerinin ve depolama süresinin izlenmesi	voltametrik	(Wei ve ark., 2013)
Çedar peyniri	Olgunlaşma süresince değişen protein-yağ oranının lezzete etkisinin araştırılması	potansiyometrik	(Lipkowitz ve ark., 2018)
Keçi sütü	Keçi sütüne inek sütü karıştırılmasının tespiti	potansiyometrik	(Dias ve ark., 2009)
Et ve Et Ürünleri			
Kıyma	Kıymada NaCl, nitrit ve nitrat seviyelerinin tahmini	voltametrik	(Labrador ve ark., 2010)
Balık	Balıklarda tazeliğin kontrolü	potansiyometrik	(Gil ve ark., 2008)
Sığır eti	Çiğ ve pişmiş sığır etlerinin lezzet özelliklerinin değerlendirilmesi	potansiyometrik	(Xu ve ark., 2019)
Diğer Gıdalar			
Kahve	Farklı kurutma tekniklerinin kahve aromasına etkisinin araştırılması	potansiyometrik	(Dong ve ark., 2019)
Karides	Farklı radyasyon türü ile ışınlanan kurutulmuş karideslerin özelliklerinin belirlenmesi	voltametrik	(Chung ve ark., 2019)
Bal	Farklı coğrafyalardan toplanan balların lezzet profillerinin belirlenmesi	voltametrik	(El Alami El Hassani ve ark., 2018)
Kahve	Farklı kavurma derecelerinin lezzet profiline etkisinin aralıtılması	-	(Dong ve ark., 2017)
Mantar	Farklı ambalaj materyallerinin depolama süresince lezzet profiline etkisinin araştırılması	-	(Donglu ve ark., 2017)
Mantar	Farklı mantar türlerinde umami tad analizi	potansiyometrik	(Phat ve ark., 2016)
Zeytinyağı	Zeytinyağı sınıflandırılması	potansiyometrik	(Veloso ve ark., 2018)

Kaynaklar

- Adler E, Hoon MA, Mueller KL, Chandrashekar J, Ryba NJP, Zuker CS. 2000. A novel family of mammalian taste receptors. *Cell.*, 100: 693–702. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)80705-9](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)80705-9);
- Beullens K, Mészáros P, Vermeir S, Kirsanov D, Legin A, Buysens S, Cap N, Nicolaï BM, Lammertyn J. 2008. Analysis of tomato taste using two types of electronic tongues. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 131: 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.024>;
- Bleibaum RN, Stone H, Tan T, Labreche S, Saint-Martin E, Isz S. 2002. Comparison of sensory and consumer results with electronic nose and tongue sensors for apple juices. *Food Quality and Preference.*, 13: 409–422. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(02\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(02)00017-4);
- Borràs E, Ferré J, Boqué R, Mestres M, Aceña L, Busto O. 2015. Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment - A review. *Analytica Chimica Acta.*, 891: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042>;
- Chung N, Ameer K, Jo Y, Kwon JH. 2019. Comparison of electronic sensing techniques for screening dried shrimps irradiated using three types of approved radiation with standard analytical methods. *Food Chemistry.*, 286: 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.038>;
- Ciosek P, Wróblewski W. 2007. Sensor arrays for liquid sensing - Electronic tongue systems. *Analyst.*, 132: 963–978. <https://doi.org/10.1039/b705107g>;
- del Valle M. 2012. Sensor Arrays and Electronic Tongue Systems. *International Journal of Electrochemistry.*, 2012: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2012/986025>;
- Di Natale C, Macagnano A, Davide F, D'Amico A, Paolesse R, Boschi T, Faccio M, Ferri G. 1997. An electronic nose for food analysis. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 44: 521–526. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)00175-5](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)00175-5);
- Di Natale C, Macagnano A, Paolesse R, Mantini A, Tarizzo E, D'Amico A, Sinesio F, Bucarelli FM, Moneta E, Quaglia GB. 1998. Electronic nose and sensorial analysis: comparison of performances in selected cases. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 50 B50: 246–252. [https://doi.org/10.1016/s0925-4005\(98\)00242-1](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(98)00242-1);
- Dias LA, Peres AM, Veloso ACA, Reis FS, Vilas-Boas M, Machado AASC. 2009. An electronic tongue taste evaluation: Identification of goat milk adulteration with bovine milk. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 136: 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.025>;
- Dong W, Hu R, Long Y, Li H, Zhang Y, Zhu K, Chu Z. 2019. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry.*, 272: 723–731. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.068>;
- Dong W, Zhao J, Hu R, Dong Y, Tan L. 2017. Differentiation of Chinese robusta coffees according to species, using a combined electronic nose and tongue, with the aid of chemometrics. *Food Chemistry.*, 229: 743–751. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.149>;
- Donglu F, Wenjian Y, Kimatu BM, Liyan Z, Xinxin A, Qihui H. 2017. Comparison of flavour qualities of mushrooms (*Flammulina velutipes*) packed with different packaging materials. *Food Chemistry.*, 232: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.161>;
- El Alami El Hassani N, Tahri K, Llobet E, Bouchikhi B, Errachid A, Zine N, El Bari N. 2018. Emerging approach for analytical characterization and geographical classification of Moroccan and French honeys by means of a voltammetric electronic tongue. *Food Chemistry.*, 243: 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.067>;
- Ferreira M, Constantino CJL, Riul A, Wohnrath K, Aroca RF, Giacometti JA, Oliveira ON, Mattoso LHC. 2003. Preparation, characterization and taste sensing properties of Langmuir-Blodgett films from mixtures of polyaniline and a ruthenium complex. *Polymer.*, 44: 4205–4211. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00388-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00388-4);
- Ghasemi-Varnamkhasti M, Apetrei C, Lozano J, Anyogu A. 2018. Potential use of electronic noses, electronic tongues and biosensors as multisensor systems for spoilage examination in foods. *Trends in Food Science and Technology.*, 80: 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.018>;
- Gil L, Barat JM, Garcia-Breijo E, Ibañez J, Martínez-Mañez R, Soto J, Llobet E, Brezmes J, Aristoy MC, Toldrá F. 2008. Fish freshness analysis using metallic potentiometric electrodes. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 131: 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.11.052>;
- González-Calabuig A, del Valle M. 2018. Voltammetric electronic tongue to identify Brett character in wines. On-site quantification of its ethylphenol metabolites. *Talanta.*, 179: 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.10.041>;
- Huang AL, Chen X, Hoon MA, Chandrashekar J, Guo W, Tränkner D, Ryba NJP, Zuker CS. 2006. The cells and logic for mammalian sour taste detection. *Nature.*, 442: 934–938. <https://doi.org/10.1038/nature05084>;
- Huang L, Liu H, Zhang B, Wu D. 2015. Application of Electronic Nose with Multivariate Analysis and Sensor Selection for Botanical Origin Identification and Quality Determination of Honey. *Food and Bioprocess Technology.*, 8: 359–370. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1407-6>;
- Jacesko S, Abraham JK, Ji T, Varadan VK, Cole M, Gardner JW. 2005. Investigations on an electronic tongue with polymer microfluidic cell for liquid sensing and identification. *Smart Materials and Structures.*, 14: 1010–1016. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/5/039>;
- Kalit MT, Marković K, Kalit S, Vahčić N, Havranek J. 2014. Primjena elektronskog nosa i elektronskog jezika u mljekarskoj industriji. *Mljekarstvo.*, 64: 228–244. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2014.0402>;
- Kantor DB, Hitka G, Fekete A, Balla C. 2008. Electronic tongue for sensing taste changes with apricots during storage. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 131: 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.003>;
- Krantz-Rülcker C, Stenberg M, Winquist F, Lundström I. 2001. Electronic tongues for environmental monitoring based on sensor arrays and pattern recognition: A review. *Analytica Chimica Acta.*, 426: 217–226. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)00873-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)00873-4);
- Labrador RH, Masot R, Alcañiz M, Baigts D, Soto J, Martínez-Mañez R, García-Breijo E, Gil L, Barat JM. 2010. Prediction of NaCl, nitrate and nitrite contents in minced meat by using a voltammetric electronic tongue and an impedimetric sensor. *Food Chemistry.*, 122: 864–870. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.049>;
- Lan Y, Wu J, Wang X, Sun X, Hackman RM, Li Z, Feng X. 2017. Evaluation of antioxidant capacity and flavor profile change of pomegranate wine during fermentation and aging process. *Food Chemistry.*, 232: 777–787. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.030>;
- Latha RS, Lakshmi PK. 2012. Electronic tongue: An analytical gustatory tool. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology and Research.*, 3: 3–8. <https://doi.org/10.4103/2231-4040.93556>;
- Legin A, Rudnitskaya A, Vlasov Y. 2002. Electronic Tongues: Sensors, Systems, Applications. *Sensors Update.*, 10: 143–188. <https://doi.org/10.1002/1616-8984>

- Legin A, Rudnitskaya A, Vlasov Y, Di Natale C, Mazzone E, D'Amico A. 2000. Application of electronic tongue for qualitative and quantitative analysis of complex liquid media. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 65: 232–234. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00324-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00324-X);
- Legin A, Rudnitskaya A, Vlasov Y, Natale C Di, Davide F, D'Amico A. 1997. Tasting of beverages using an electronic tongue. *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 44: 291–296. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)00167-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)00167-6);
- Legin A V., Rudnitskaya AM, Vlasov YG, Di Natale C, D'Amico A. 1999. Features of the electronic tongue in comparison with the characteristics of the discrete ion-selective sensors. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 58: 464–468. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00127-6);
- Lipkowitz JB, Ross CF, Diako C, Smith DM. 2018. Discriminating aging and protein-to-fat ratio in Cheddar cheese using sensory analysis and a potentiometric electronic tongue. *Journal of Dairy Science.*, 101: 1990–2004. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13820>;
- Lvova L, Pudi R, Galloni P, Lippolis V, Di Natale C, Lundström I, Paolesse R. 2015. Multi-transduction sensing films for Electronic Tongue applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 207: 1076–1086. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.086>;
- Milovanovic M, Žeravik J, Obořil M, Pelcová M, Lacina K, Cakar U, Petrovic A, Glatz Z, Skládál P. 2019. A novel method for classification of wine based on organic acids. *Food Chemistry.*, 284: 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.113>;
- Miyanaga Y, Tanigake A, Nakamura T, Kobayashi Y, Ikezaki H, Taniguchi A, Matsuyama K, Uchida T. 2002. Prediction of the bitterness of single, binary- and multiple-component amino acid solutions using a taste sensor. *International Journal of Pharmaceutics.*, 248: 207–218. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(02\)00456-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(02)00456-8);
- Mou Q, He J, Li X, Yang B, Yang L, Li H. 2018. Rapid discrimination of Schisandra sphenanthera and Schisandra chinensis using electronic tongue and ultra-performance liquid chromatography coupled with chemometrics. *Acta Ecologica Sinica.*, 38: 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.11.004>;
- Peris M, Escuder-Gilabert L. 2016. Electronic noses and tongues to assess food authenticity and adulteration. *Trends in Food Science and Technology.*, 58: 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.014>;
- Peris M, Escuder-Gilabert L. 2009. A 21st century technique for food control: Electronic noses. *Analytica Chimica Acta.*, 638: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.02.009>;
- Persaud K, Dodd G. 1982. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. *Nature.*, 299: 352–355. <https://doi.org/10.1038/299352a0>;
- Phat C, Moon B, Lee C. 2016. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system. *Food Chemistry.*, 192: 1068–1077. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.113>;
- Pigani L, Vasile Simone G, Foca G, Ulrici A, Masino F, Cubillana-Aguilera L, Calvini R, Seeber R. 2018. Prediction of parameters related to grape ripening by multivariate calibration of voltammetric signals acquired by an electronic tongue. *Talanta.*, 178: 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.09.027>;
- Piriya V.S A, Joseph P, Daniel S.C.G. K, Lakshmanan S, Kinoshita T, Muthusamy S. 2017. Colorimetric sensors for rapid detection of various analytes. *Materials Science and Engineering C.*, 78: 1231–1245. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.05.018>
- Podrazka M, Bączynska E, Kundys M, Jeleń PS, Nery EW. 2017. Electronic tongue-A tool for all tastes? *Biosensors.*, 8: 1–24. <https://doi.org/10.3390/bios8010003>;
- Polshin E, Rudnitskaya A, Kirsanov D, Legin A, Saison D, Delvaux F, Delvaux FR, Nicolai BM, Lammertyn J. 2010. Electronic tongue as a screening tool for rapid analysis of beer. *Talanta.*, 81: 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.11.041>;
- Ramamoorthy HV, Mohamed SN, Devi DS. 2014. E-Nose and E-Tongue: Applications and Advances in Sensor Technology. *Journal of NanoScience and NanoTechnology.*, 2: 370–376.
- Riul A, Dantas CAR, Miyazaki CM, Oliveira ON. 2010. Recent advances in electronic tongues. *Analyst.*, 135: 2481–2495. <https://doi.org/10.1039/c0an00292e>;
- Rudnitskaya A, Kirsanov D, Legin A, Beullens K, Lammertyn J, Nicolai BM, Irudayaraj J. 2006. Analysis of apples varieties - comparison of electronic tongue with different analytical techniques. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 116: 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.069>;
- Rudnitskaya A, Schmidtke LM, Reis A, Domingues MRM, Delgadillo I, Debus B, Kirsanov D, Legin A. 2017. Measurements of the effects of wine maceration with oak chips using an electronic tongue. *Food Chemistry.*, 229: 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.013>;
- Spielman AI, Nagai H, Sunavala G, Dasso M, Breer H, Boekhoff I, Huque T, Whitney G, Brand JG. 1996. Rapid kinetics of second messenger production in bitter taste. *American Journal of Physiology-Cell Physiology.*, 270: C926–C931. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1996.270.3.C926>;
- Sun H, Mo ZH, Choy JTS, Zhu DR, Fung YS. 2008. Piezoelectric quartz crystal sensor for sensing taste-causing compounds in food. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 131: 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.014>;
- Sun X, Yan Z, Zhu T, Zhu J, Wang Y, Li B, Meng X. 2019. Effects on the color, taste, and anthocyanins stability of blueberry wine by different contents of mannoprotein. *Food Chemistry.*, 279: 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.139>;
- Tahara Y, Toko K. 2013. Electronic tongues-a review. *IEEE Sensors Journal.*, 13: 3001–3011. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2263125>;
- Veloso ACA, Silva LM, Rodrigues N, Rebello LPG, Dias LG, Pereira JA, Peres AM. 2018. Perception of olive oils sensory defects using a potentiometric taste device. *Talanta.*, 176: 610–618. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.066>;
- Vlasov Y, Legin A. 1998. Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: From “electronic nose” to “electronic tongue.” *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry.*, 361: 255–260. <https://doi.org/10.1007/s002160050875>;
- Vlasov Y, Legin A, Rudnitskaya A, Di Natale C, D'Amico A. 2005. Nonspecific sensor arrays (“electronic tongue”) for chemical analysis of liquids: (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry.*, 77: 1965–1983. <https://doi.org/10.1351/pac200577111965>;
- Vlasov YG, Legin A V., Rudnitskaya AM. 1997. Cross-sensitivity evaluation of chemical sensors for electronic tongue: Determination of heavy metal ions. *Sensors and Actuators, B: Chemical.*, 44: 532–537. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)00241-4);
- Wei Z, Wang J, Zhang X. 2013. Monitoring of quality and storage time of unsealed pasteurized milk by voltammetric electronic tongue. *Electrochimica Acta.*, 88: 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.10.042>;
- Winqvist F, Wide P, Lundström I. 1997. An electronic tongue based on voltammetry. *Analytica Chimica Acta.*, 357: 21–31. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(97\)00498-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(97)00498-4);
- Woertz K, Tissen C, Kleinebudde P, Breitkreutz J. 2011. Taste sensing systems (electronic tongues) for pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics.*, 417: 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.11.028>

- Xu L, Wang X, Huang Y, Wang Y, Zhu L, Wu R. 2019. A predictive model for the evaluation of flavor attributes of raw and cooked beef based on sensor array analyses. *Food Research International.*, 122: 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.047>;
- Zhang H, Cui J, Tian G, DiMarco-Crook C, Gao W, Zhao C, Li G, Lian Y, Xiao H, Zheng J. 2019. Efficiency of four different dietary preparation methods in extracting functional compounds from dried tangerine peel. *Food Chemistry.*, 289: 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.063>
- Zhang MX, Wang XC, Liu Y, Xu XL, Zhou GH. 2012. Isolation and identification of flavour peptides from Puffer fish (*Takifugu obscurus*) muscle using an electronic tongue and MALDI-TOF/TOF MS/MS. *Food Chemistry.*, 135: 1463–1470. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.026>;
- Zhu N, Zhu Y, Yu N, Wei Y, Zhang J, Hou Y, Sun A dong. 2019. Evaluation of microbial, physicochemical parameters and flavor of blueberry juice after microchip-pulsed electric field. *Food Chemistry.*, 274: 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.092>