

Katalaz Enzim Aktivite Ölçüm Yöntemleri: Literatürdeki Mevcut Yaklaşımlar, Karşılaştırmalar ve Yeni Perspektifler

Meryem Sena AKKUŞ^{1*}, Ceylan BAL^{1,2}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Translasyonel Tıp Anabilim Dalı, 06800, Ankara.

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıbbi Biyokimya Anabilim Dalı, 06800, Ankara

¹<https://orcid.org/0000-0003-2550-550X>

²<https://orcid.org/0000-0002-1678-1281>

*Sorumlu yazar: msakkus@aybu.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 22.05.2025

Kabul tarihi: 22.10.2025

Online Yayınlanma: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler:

Katalaz

Katalaz ölçüm yöntemleri

Yapay zeka

Makine öğrenmesi

ÖZ

Katalaz enzimi, hidrojen peroksidi su ve oksijene parçalayarak oksidatif stresi düzenleyen kritik bir antioksidan enzimdir. Memeliler, bitkiler ve aerobik organizmalarda yaygın olarak bulunur ve özellikle eritrositler, karaciğer ve böbrekte yüksek konsantrasyonlarda yer alır. Tetramerik bir yapıya sahip olan katalazın NADPH bağlı formu, oksidatif inaktivasyona karşı korunmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, katalaz aktivitesini belirlemeye yönelik spektrofotometrik, kolorimetrik, elektroanalitik, titrimetrik, kemilüminesans ve jel bazlı yöntemler karşılaştırılmıştır. Her yöntemin avantajları, dezavantajları ve kullanım alanları detaylı şekilde değerlendirilmiş, daha hassas ve güvenilir ölçüm teknikleri geliştirmek için öneriler sunulmuştur. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenmesi destekli analizlerin katalaz aktivitesi ölçümlerinde nasıl kullanılabileceği ele alınmıştır. Makine öğrenmesi tabanlı regresyon modellerinin büyük veri kümelerinden yararlanarak katalaz aktivitesini tahmin edebileceği ve ölçüm hassasiyetini artırabileceği öne sürülmüştür. Bu derleme, katalaz aktivite ölçüm yöntemlerinin mevcut durumunu kapsamlı bir şekilde inceleyerek gelecekteki çalışmalar için yeni perspektifler sunmaktadır.

Catalase Enzyme Activity Measurement Methods: Current Approaches, Comparisons, and New Perspectives in the Literature

Reviews

Article History:

Received: 22.05.2025

Accepted: 22.10.2025

Published online: 16.03.2026

Keywords:

Catalase

Catalase measurement methods

Artificial intelligence

Machine learning

ABSTRACT

Catalase is a critical antioxidant enzyme that regulates oxidative stress by breaking down hydrogen peroxide into water and oxygen. It is commonly found in mammals, plants, and aerobic organisms, with particularly high concentrations in erythrocytes, the liver, and kidneys. The NADPH-bound form of catalase, which has a tetrameric structure, protects the enzyme from oxidative inactivation. This study compared spectrophotometric, colorimetric, electroanalytical, titrimetric, chemiluminescence-based, and gel-based methods for determining catalase activity. Each method's advantages, disadvantages, and application areas were evaluated in detail, and suggestions were presented for developing more sensitive and reliable measurement techniques. In addition, the potential use of artificial intelligence and machine learning-supported analyses in measuring catalase activity was discussed. It was proposed that machine learning-based regression models could utilize large datasets to predict catalase activity and enhance measurement accuracy. This review comprehensively examines the current state of catalase activity measurement methods and offers new

1. Giriş

Katalaz (CAT, EC 1.11.1.6), insan vücudunda yaygın olarak bulunan ve oksidatif stresin kontrolünde kritik rol oynayan temel bir antioksidan enzimdir (Anjum ve ark., 2016). Oksidatif stres, birçok hastalığın mekanizmasının temelinde yer almaktadır (Coremen ve ark., 2022). Hücresel oksidasyon-redüksiyon dengesi, hidrojen peroksit (H_2O_2) seviyeleri tarafından düzenlenir. Düşük konsantrasyonlarda önemli bir sinyal molekülü olarak işlev gören H_2O_2 , yüksek seviyelerde Fenton reaksiyonu aracılığıyla hidroksil radikalleri ($\bullet OH$) oluşturarak protein, lipid ve DNA'ya ciddi zarar verebilir (Henle ve Linn, 1997; Imlay ve ark., 1988; B. Wang ve ark., 2022). Canlı organizmalarda hidroksil radikallerinin ($\bullet OH$) başlıca kaynaklarından biri, süperoksit anyonlarının ($O_2^{\bullet -}$) Fe^{3+} iyonlarını Fe^{2+} 'ye indirgediği Haber-Weiss reaksiyonudur. Bu reaksiyon, reaktif oksijen türlerinin oluşumunda kritik bir rol oynayan önemli bir basamak olarak kabul edilir (Eş. 1). Oluşan Fe^{2+} iyonları, hidrojen peroksit (H_2O_2) ile reaksiyona girerek Fenton reaksiyonunu başlatır. Bu reaksiyon sonucunda son derece reaktif olan hidroksil radikalleri ($\bullet OH$) üretilir (Eş. 2).



Oksidatif stresin neden olduğu hücresel hasarlar, kronik inflamasyonu tetikleyerek yaşlanma sürecini hızlandırabilir ve bazı dejeneratif hastalıklar ile kanser türlerinin gelişimine katkıda bulunabilir. Bu nedenle, oksidatif stresin düzenlenmesi ve antioksidan savunma mekanizmalarının anlaşılması, hastalıkların önlenmesi ve tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Storz ve Imlay, 1999; Burton ve Jauniaux, 2011; Sies ve ark., 2017). Hücre bazında incelendiğinde, HepG2 hücreleri, oksidatif strese karşı korunmada yüksek katalaz aktivitesine sahip hücre hatlarından biridir. Spesifik inhibitörler kullanılarak bu aktivite azaltıldığında, reaktif oksijen türlerine (ROS) karşı direnç önemli ölçüde düşmektedir. HeLa ve diğer hücre hatlarına kıyasla HepG2 hücrelerinin daha yüksek katalaz aktivitesi, onları ROS kaynaklı apoptoza karşı daha dirençli hale getirmektedir (Góth ve ark., 2004; Zhao ve ark., 2019).

Katalazın birincil görevi, hidrojen peroksiti su ve oksijene parçalayarak hücreleri bu güçlü oksitleyici ajanın zararlı etkilerinden korumaktır (Calabrese ve Canada, 1989). Bu nedenle, katalaz aktivitesi, metabolik bozuklukların bir belirtisi olarak düşünülebilir (Boriskin ve ark., 2019). Doğru ve hassas katalaz ölçümleri, biyomedikal araştırmalar, klinik tanı süreçleri ve oksidatif stresle ilişkili hastalıkların değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan katalaz aktivite ölçüm yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiş, her bir yöntemin prensipleri, avantajları ve sınırlamaları detaylandırılmıştır. Spektrofotometrik, kolorimetrik, elektroanalitik, titrimetrik, kemilüminesans ve jel bazlı teknikler

karşılaştırılarak, ölçüm hassasiyeti, biyolojik girişimlere karşı dayanıklılık, uygulama kolaylığı ve klinik geçerlilik gibi kritik faktörler açısından değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, mevcut yöntemlerin geliştirilmesi ve ölçüm hassasiyetinin artırılması için yeni yaklaşımlar ele alınmıştır. Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve büyük veri analizi gibi yapay zeka destekli modern teknolojilerin katalaz ölçümlerine entegrasyonu üzerine öneriler sunulmuştur. Bu sayede, biyomedikal araştırmalar ve klinik uygulamalarda katalaz aktivite ölçümlerinin güvenilirliğini artırabilecek yeni nesil metodolojilere yönelik bir perspektif sağlanmaktadır.

2. Katalaz Enzimin Yapısı ve Biyokimyasal Özellikleri

Katalaz enzimi, memeliler, bitkiler ve aerobik organizmalarda bulunur ve peroksizomlar ile sitoplazmada lokalizedir. Özellikle eritrositler, karaciğer ve böbreklerde yüksek konsantrasyonlarda bulunur (Boriskin ve ark., 2019; Bukowska ve ark., 2000; Farman ve Hadwan, 2021).

Katalaz, farklı kaynaklardan elde edilen formlarıyla benzer alt birim sayısı, moleküler ağırlık ve prostetik grup türleri göstermektedir. 500'den fazla amino asitten oluşan monomerlere sahip bir tetramerdir (Hadwan ve ark., 2024). Sığır ve insan katalazları ayrıca dört sıkı bağlı NADPH molekülü içerir. NADPH, enzim aktivitesi için gerekli olmamasına rağmen düşük H_2O_2 konsantrasyonlarına enzimin inaktivasyonunu önleyebilir. Oksidatif stres koşullarında, katalaz $NADP^+$ salarak düzenleyici bir rol oynar (Kirkman ve Gaetani, 1984; Anjum ve ark., 2016). Katalaz, hem yapısal hem de işlevsel olarak peroksidazlarla yakından ilişkilidir. İki temel fonksiyona sahiptir. Düşük peroksit konsantrasyonlarında peroksidaz aktivitesi gösterirken, yüksek peroksit konsantrasyonlarında katalitik mekanizma ile reaksiyon vermektedir (Wang ve Fung, 1986). Bu enzimin aktivitesi, substrat konsantrasyonu, pH, sıcaklık ve translasyon sonrası fosforilasyon gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Hadwan ve ark., 2024). Katalazın endojen substratları (indol, β -feniletilamin gibi), peroksidaz ve laktaz substratları ve bazı karsinogenik benzidin türevlerini okside edebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, indol-3-karbinol, ferulik asit, vanilik asit ve epigallokateşin-3-gallat gibi diyet bileşenleri katalaz oksidaz aktivitesini inhibe etmiştir (Vetrano ve ark., 2005).

H_2O_2 , nötrofiller tarafından enfeksiyonlara karşı savunma mekanizması olarak veya mitokondriyal monoamin oksidazlar gibi enzimatik reaksiyonların yan ürünü olarak üretilen bir bileşiktir (Wang ve ark., 2018; Martemucci ve ark., 2022). Bununla birlikte, ana kaynağı süperoksit anyonunun mitokondriyal (SOD2) veya sitozolik (SOD1) süperoksit dismutaz tarafından dönüşümüdür (Wang ve ark., 2018). H_2O_2 , yalnızca detoksifikasyonda değil, aynı zamanda redoks sinyalleşmesinde de kritik rol oynar ve birçok biyolojik süreci düzenler (Van Der Vliet ve Janssen-Heininger, 2014). CAT, H_2O_2 seviyelerinin dengelenmesinde kilit bir enzim olup, hem sitotoksik etkileri önler hem de hücrel sinyal mekanizmalarında önemli bir görev üstlenir (Glorieux ve ark., 2015).

3. Katalaz Aktivitesinin Ölçüm Yöntemleri

Spektrofotometrik, kolorimetrik ve florometrik analizler dahil olmak üzere serumdaki katalaz aktivitesini ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle katalazın hidrojen peroksidi parçalama yeteneğine dayanır ve parçalanma hızı katalaz konsantrasyonuyla orantılıdır.

3.1 UV-Spektrofotometrik yöntemler

UV-spektrofotometri, katalaz aktivitesinin belirlenmesi için en sık kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntem, H_2O_2 'nin 240 nm dalga boyunda gösterdiği absorpsiyon değişimini (≥ 30 mM) izleyerek aktivitenin belirlenmesine dayanmaktadır (Hadwan, 2018). CAT ile H_2O_2 'nin parçalanmasının izlenmesini içerir. Ancak bu yöntem, büyük hacimli numuneler gerektirir ve bir seferde yalnızca bir numuneyi ölçebilir (Grilo ve ark., 2020).

Ancak, bu yöntemin bazı kısıtlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, biyolojik örneklerde bulunan proteinler, nükleik asitler ve diğer bileşenler UV absorpsiyonuna neden olarak interferans riskini artırabilir. Ayrıca, reaksiyon sırasında oluşan oksijen gazı, absorpsiyon değişimlerini etkileyerek ölçüm hatalarına yol açabilir. Bunun yanı sıra, UV ışınımına bağlı olarak analitik duyarlılığın bazı durumlarda yetersiz kalması yöntemin düşük hassasiyet göstermesine neden olabilmektedir (Hadwan ve Ali, 2018). Bir de H_2O_2 'nin 240 nm dalga boyunda gösterdiği molar absorpsiyon katsayısının düşük olması yöntemin duyarlılığını kısıtlamaktadır.

3.2. Kolorimetrik yöntemler

Kolorimetrik yöntemler, spektrofotometrik tekniklere alternatif olarak geliştirilmiş ve daha pratik kullanım sağlayan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde, kalan hidrojen peroksit belirli reaktiflerle reaksiyona sokularak renk değişimi oluşturur ve absorpsiyon ölçümleriyle aktivite belirlenir (Aravapally ve ark., 2025; Ranaweera ve ark., 2025).

3.2.1. Amonyum molibdat yöntemi

Katalaz aktivitesi, hidrojen peroksit (H_2O_2) ve amonyum molibdat kompleksinin spektrofotometrik olarak ölçülmesiyle belirlenmiştir. İlk olarak, 0,2 mL serum örneği, 1,0 mL hidrojen peroksit içeren sodyum-potasyum fosfat tampon çözeltisi (pH 7,4, 65 μ mol/mL H_2O_2) ile 37°C'de 60 saniye inkübe edilmiştir. Enzimatik reaksiyon 1,0 mL 32,4 mmol/L amonyum molibdat eklenerek durdurulmuş ve oluşan hidrojen peroksit-molibdat kompleksi 405 nm'de spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. Katalaz aktivitesi, absorpsiyon farkları kullanılarak hesaplanmış ve mikrokat/litre veya kU/L cinsinden ifade edilmiştir (Goth, 1991). Ancak, bu yöntemde üç farklı kör tüp gerekliliği ve yüksek H_2O_2 konsantrasyonu kullanımı dezavantaj olarak öne çıkmaktadır.

3.2.2. *Ferro-o-dianisidine yöntemi*

Katalaz oksidaz aktivitesi, 10-asetil-3,7-dihidroksifenoksazin substratının katalaz tarafından oksidasyonu ile belirlenmiş ve spektrofotometrik ve florometrik yöntemlerle ölçülmüştür. Reaksiyon, 50 mM fosfat tamponu (pH 7,4), 2,2 µM katalaz ve 20 nmol substrat içeren bir ortamda gerçekleştirilmiş, oluşan resorufin ürünü 571 nm'de absorbans veya 540/595 nm dalga boylarında florometrik ölçüm ile tespit edilmiştir. Oksidaz aktivitesinin pH 7,0-9,0 aralığında maksimum olduğu ve oksijen bağımlı olduğu gösterilmiştir; azot gazı ile oksijen uzaklaştırıldığında reaksiyon durmuştur. Michaelis-Menten kinetik analiziyle K_m değeri $2,4 \times 10^{-4}$ M, V_{max} değeri $4,7 \times 10^{-5}$ M/s olarak hesaplanmıştır. Oksidaz aktivitesinin geniş substrat aralığı olduğu gösterilmiş, diasidin (o-dianisidin) ve diğer benzidin türevleri gibi peroksidaz substratlarının katalaz tarafından oksitlenebildiği belirlenmiştir. Diasidin, 10-asetil-3,7-dihidroksifenoksazin ile yarışmalı inhibitör olarak hareket etmiş ve katalaz oksidaz aktivitesini inhibe etmiştir. Spektroskopik analizlerle, katalaz oksidaz aktivitesinin heme-demir merkezinde ferrik (Fe^{3+}) formdan oksiferil ($Fe^{4+}=O$) forma geçiş ile gerçekleştiği gözlemlenmiş ve diasidinin bu oksidasyon sürecine etki ettiği belirlenmiştir (Vetrano ve ark., 2005).

3.2.3. *Metal bazlı yöntemler*

Son yıllarda geliştirilen yöntemler, hidrojen peroksitin belirli metal iyonlarıyla reaksiyonuna dayanmakta olup, oluşan renkli ürün spektrofotometrik olarak analiz edilmektedir. Bu tekniklere örnek olarak, Hadwan'ın çalışmasında eritrositler, karaciğer ve böbrek dokuları ile bakteriler kullanılarak katalaz aktivitesi spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. Çalışmada önerilen yeni yöntem, hidrojen peroksitin kobalt (II)'yi kobalt (III)'e oksitlemesiyle oluşan ve 440 nm ile 640 nm dalga boylarında maksimum absorbans gösteren karbonato-kobalt (III) kompleksini kullanarak katalaz aktivitesini belirlemektedir. Özellikle 440 nm'de yapılan ölçüm, düşük H_2O_2 konsantrasyonlarında bile yüksek hassasiyet sağlamak ve biyolojik örneklerde protein veya nükleik asit girişimini en aza indirmektedir. Yöntemin doğrusallık aralığı yaklaşık 12,75 U/mL olarak belirlenirken, tespit limiti (LOD) 0,012 U/mL, kantitatif ölçüm limiti (LOQ) ise 0,04 U/mL olarak hesaplanmıştır. Yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olan yöntemin iç test hassasiyeti (CV %), %2,96; günler arası hassasiyeti ise %3,83 olarak bulunmuştur. Ayrıca, yeni yöntem ile geleneksel dikromat yöntemi arasında yüksek korelasyon ($r = 0,9950$) saptanarak doğruluğu kanıtlanmıştır. Düşük H_2O_2 konsantrasyonlarında hassas ölçüm yapılabilmesi, UV 240 nm yöntemine kıyasla biyolojik girişimleri en aza indirmesi ve toksik reaktifler içermemesi, yöntemin önemli avantajları arasında yer almaktadır (Hadwan, 2018).

Diğer bir çalışmada ise, karaciğer dokusu ve bakteri homojenatlarında katalaz aktivitesinin ölçümü, hidrokinon/anilinyum sülfat/amonyum molibdat reaktifi ile reaksiyona giren artakalan hidrojen peroksitin belirlenmesine dayanmaktadır. Bu reaksiyon sonucunda mor renkli disüstitüe kinon bileşiği oluşur ve maksimum absorbansı 550 nm'de gözlemlenmiştir. Yöntemin tekrarlanabilirliği yüksek olup, iç test hassasiyeti (within-run CV %) %2,6, günler arası hassasiyet (between-run CV %) %4,7 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yeni yöntem ile peroksovanadat yöntemi arasında güçlü bir

korelasyon ($r = 0,9982$) bulunmuş, böylece yöntemin güvenilirliği doğrulanmıştır (Hamza ve Hadwan, 2020) .

Honnur ve arkadaşlarının (2021) yaptıkları çalışmada insan serum, kan ve plazmada katalaz ölçülmüştür. Pirokatikol ve 4-aminoantipirin kullanılarak katalaz aktivitesinin hidrojen peroksit aracılığıyla oksidatif bağlanma reaksiyonu ile belirlenmesine dayanmakta olup, pembe renkli kinonimine bileşiğinin 530 nm dalga boyundaki absorbans değişimi ile ölçülmektedir. Çalışmada, yöntemin 0,316–10 U/mL arasında doğrusal bir ölçüm sağladığı, tespit limiti (LOD) 0,12 $\mu\text{mol/L}$, kantitatif ölçüm limiti (LOQ) 0,225 $\mu\text{mol/L}$ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, iç test hassasiyeti %1,98–3,02, günler arası hassasiyet %2,97– 4,40 olarak hesaplanmış ve peroksovanadat yöntemiyle yüksek korelasyon ($r = 0,9982$) gösterdiği tespit edilmiştir. UV 240 nm spektrofotometrik yöntemlerinin biyolojik örneklerde girişime açık olduğu belirtilirken, bu yöntemin biyolojik bileşenlerden (protein, nükleik asitler) daha az etkilendiği saptanmıştır (Krishna ve ark., 2021).

Metal bazlı yöntemlere örnek olarak, fenolik bileşikler ve flavonoidlerin hidroksil radikali temizleme kapasitelerini değerlendirmek amacıyla modifiye edilmiş bir Cupric Reducing Antioxidant Capacity (CUPRAC) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, hidroksil radikallerinin ($\bullet\text{OH}$) Fe(II)-EDTA kompleksi ile H_2O_2 'nin reaksiyonu sonucunda oluşmasını temel alır. Hidroksil radikalleri, salitsilat probu ile tespit edilir ve fenolik bileşikler veya flavonoidler gibi radikal temizleyicilerle rekabete girer. Bu durum, Cu(II)-neokuproin kompleksinin renk oluşumunu azaltarak hidroksil radikalini temizleyen bileşiklerin etkinliğini belirlemeye yardımcı olur. Reaksiyon sonunda katalaz eklenerek Fenton reaksiyonu inhibe edilir ve kalan H_2O_2 'nin fenolik antioksidanlarla redoks döngüsüne girmesi önlenir. Bu sayede CUPRAC yöntemi, özellikle askorbik asit, gallik asit ve klorojenik asit gibi bileşikler için hassas ve hızlı analiz imkanı sunmaktadır (Özyürek ve ark., 2008).

Spektrofotometrik ve kolorimetrik yöntemlerin doğruluk ve hassasiyetini artırmak için spesifik reaktiflerin kullanımı önemlidir. Metal iyonları ve nanopartikül bazlı reaktifler, hidrojen peroksitin tespitinde daha yüksek özgüllük sağlayabilir. Bunun yanı sıra, birden fazla antioksidan enzimin aynı anda ölçülmesini sağlayan multiplex analizler geliştirilerek biyolojik girişimler en aza indirilebilir. Ayrıca, 96 veya 384 kuyucuklu mikrolaka formatında ölçümler ile daha düşük numune hacimleriyle analizler yapılabilir.

3.3. Elektroanalitik yöntemler

Elektrokimyasal ölçüm teknikleri, katalaz aktivitesini doğrudan belirlemek için elektrotlar ve sensörler kullanır. Elektrokimyasal yöntemler, özellikle düşük konsantrasyonlarda hidrojen peroksit tespit etmek için kullanışlıdır. Bu yöntemle örnek olarak, ilgili bir çalışmada multiwall karbon nanotüpler (MWCNTs) ile modifiye edilmiş cam karbon elektrot üzerinde katalazın doğrudan elektrokimyası ve elektrokatalitik aktivitesi incelenmiştir. Katalazın Fe(III)/Fe(II) redoks çiftine ait iyi tanımlanmış tersinir voltametri zirveleri gözlemlenmiş ve katalaz ile elektrot arasında doğrudan elektron transferi sağlanmıştır. MWCNT'lerin yüzeyinde immobilize edilen katalazın yüzey yoğunluğu $2,4 \times 10^{-10}$

mol/cm² olarak hesaplanmıştır. Heterojen elektron transfer hız sabiti 80 s⁻¹ olarak bulunmuş, bu da katalaz ile elektrot arasındaki elektron transferinin oldukça kolay gerçekleştiğini göstermiştir. Katalazın MWCNT'ler üzerinde hidrojen peroksit ve oksijenin elektrokatalitik indirgenmesini sağladığı belirlenmiştir. Çalışmada, yeni nesil, mediatör içermeyen bir biyosensör tasarlanması için doğrudan elektrokimyanın büyük bir avantaj sunduğu vurgulanmaktadır. Michaelis-Menten sabiti (K_m) 1,70 mM olarak hesaplanmıştır ve bu, hidrojen peroksit tespiti için katalaz bazlı elektrokimyasal biyosensörlerin potansiyelini göstermektedir (Salimi ve ark., 2005).

Elektrokimyasal sensörlerin geliştirilmesi, katalaz aktivitesinin daha hızlı ve hassas ölçülmesine olanak tanıyabilir (Guliy ve Dykman, 2025; Li ve ark., 2025). Nanomalzeme temelli elektrotlar, özellikle karbon nanotüpler, grafen ve altın nanopartikümesine olanak tanıyabilir. Nanomalzeme temelli elektrotlar, özellikle karbon nanotüpler, grafen ve altın nanopartiküller gibi iletken yüzeylerin kullanımı, elektrokimyasal sinyalin artırılmasını sağlayabilir. Ayrıca, etiket içermeyen (label-free) sensörler, iki fazlı sıvı-sıvı arayüz (ITIES) sistemleri gibi yeni teknolojiler ile kombine edilerek daha hızlı ve girişimsiz analizler yapılabilir. Taşınabilir ve giyilebilir elektrokimyasal sensörlerin geliştirilmesi, klinik ve saha uygulamalarında katalaz ölçümünü kolaylaştırabilir (Saputra ve Karim, 2025).

3.4. Titrimetrik yöntemler

Düşük katalaz seviyelerine sahip dokular için önerilen titrimetrik yöntem, düşük hata kaynaklarıyla nispeten güvenilir sonuçlar sağlarken, yüksek örnek hacmi gereksinimi nedeniyle hassasiyeti sınırlıdır. Yöntem, ortamda kalan hidrojen peroksitin belirli bir reaktif ile titrasyonu prensibine dayanır ve kullanılan indikatöre bağlı olarak son nokta (end-point) titrasyonları gerçekleştirilebilir. Ancak manuel işlem gerektirmesi, analiz sürecini zaman alıcı hale getirirken, otomasyon açısından da önemli kısıtlamalar oluşturur (Grilo ve ark., 2020).

3.5. Kemilüminesans bazlı yöntemler

Bu yöntemde örnek olarak Ghavamipour ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında, hidrojen peroksit (H₂O₂) duyarlı CdTe kuantum noktaları (QDs) kullanılarak kemilüminesans bazlı bir katalaz (CAT) aktivite tayin yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, katalazın H₂O₂'yi su ve oksijene parçalayarak CdTe/H₂O₂ sisteminin kemilüminesans sinyalinde azalmaya neden olması prensibine dayanmaktadır ve klasik UV absorpsiyon yöntemine kıyasla daha yüksek doğruluk ve hassasiyet sunmaktadır. 6-400 U/mL aralığında lineer ölçüm yapabilen ve 4,5 U/mL tespit limitine sahip bu sistem, yüksek H₂O₂ konsantrasyonları kullanılarak Michaelis-Menten kinetiği doğrultusunda daha güvenilir bir K_m değeri (519 ± 27 mM) belirleyebilmektedir (Ghavamipour ve ark., 2018). Ayrıca, enzim inhibisyonu ve oksijen salınımının UV yönteminde oluşturduğu hata paylarını minimize etmesi nedeniyle yöntemin güvenilirliği artırılmış olup, biyokimyasal analizler için güçlü bir alternatif olarak sunulmaktadır. Bu çalışmada elde edilen K_m değeri (519 ± 27 mM), literatürde bildirilen birçok katalaz K_m değerine

kıyasla yüksektir. Bu farklılık, çalışmada kullanılan yüksek H_2O_2 konsantrasyonlarının yanı sıra, CdTe/ H_2O_2 temelli kemilüminesans sisteminin spesifik ölçüm prensibinden kaynaklanabilir. Ayrıca, enzim kaynağındaki farklılıklar, ortam pH'ı, iyonik güç ve sıcaklık gibi parametreler de K_m değerinin yükselmesine neden olmuş olabilir.

Kemilüminesans bazlı yöntemlerin hassasiyetini artırmak için daha stabil kemilüminesans reaktifleri geliştirilmelidir (Chakraborty, 2025; Das ve ark., 2025). Özellikle, CdTe kuantum noktaları gibi nanopartiküllerin kullanımı, ışık emisyonunun daha kontrollü hale getirilmesini sağlayabilir. Fluoresan problemlerin kullanımı, katalaz aktivitesinin spesifik olarak tespit edilmesini mümkün kılabilir. Ayrıca, kemilüminesans yöntemlerin mikrofluidik sistemlerle birleştirilmesi, analiz süresini kısaltarak daha az reaktif ve numune kullanımı ile hızlı ölçümler yapılmasını sağlayabilir (Das ve Prajapati, 2025; Sethu ve ark., 2025; Sun ve ark., 2025).

3.6. Jel bazlı ölçüm yöntemleri

Bu yöntemde hücre ve doku örneklerinde oksidatif stresle ilişkili enzimlerin aktivitesini incelemek amacıyla kullanılır. Özellikle enzimatik aktivitenin doğrudan jel üzerinde görselleştirilmesini sağlaması nedeniyle, biyomedikal araştırmalarda önemli bir araçtır. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, yüksek özgüllük sağlaması ve enzimlerin aktivitesini doğrudan görselleştirebilmesidir. Jel bazlı teknikler, spektrofotometrik yöntemlere kıyasla daha az numune gerektirir ve farklı hücresel bölgelerdeki enzim aktivitelerini belirleyebilme imkânı sunar. Ancak, jel bazlı yöntemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İşlem süreci oldukça zaman alıcıdır; jel hazırlanması, protein yüklenmesi ve boyama işlemleri genellikle 24-48 saat sürebilir. Düşük enzim aktivitesine sahip örneklerde hassasiyet yetersiz kalabilir ve ek hassaslaştırıcı tekniklere ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, yöntem tamamen manuel işlem gerektirdiği için otomasyona uygun değildir ve laboratuvar personelinin deneyimine bağlı olarak sonuçlar değişkenlik gösterebilir (Weydert ve Cullen, 2010). Bunun yanı sıra, analizlerin doğruluğu açısından örnek homojenliği büyük önem taşır. Farklı hücresel bölgelerde değişen enzim aktivite düzeyleri, sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle, özellikle doku örneklerinde homojenizasyonun dikkatli yapılması gerekmektedir.

Bu yöntemin dezavantajlarını gidermek için hızlı boyama ve görselleştirme teknikleri geliştirilebilir. Özellikle biyofotometrik görüntüleme sistemleri ile enzim aktivitesinin daha hızlı belirlenmesi sağlanabilir. Ayrıca, otomasyon ve dijital görüntü analizi yazılımları ile jel bazlı ölçümlerin değerlendirilmesi daha güvenilir hale getirilebilir.

4. Katalaz Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Katalaz aktivitesini belirlemek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, spektrofotometrik, kolorimetrik, elektroanalitik, titrimetrik, kemilüminesans ve jel bazlı teknikleri içermektedir. Her yöntemin avantajları ve dezavantajları farklıdır ve kullanım amacına göre seçilmeleri gerekmektedir.

Tablo 1’de, farklı katalaz aktivite ölçüm yöntemlerinin avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

Tablo 1. Katalaz aktivitesinin ölçümünde kullanılan yöntemler ve özellikleri

Yöntem	Prensip	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanı	Referanslar
UV-Spektrofotometrik	H ₂ O ₂ ’nin 240 nm’de absorbens değişimini izleme	Hızlı ve basit, en yaygın kullanılan yöntem	Biyolojik girişimler, düşük hassasiyet	Klinik ve biyokimyasal analizler	(Hadwan, 2018; Hadwan ve Ali, 2018; Grilo ve ark., 2020)
Kolorimetrik (Amonyum molibdat)	H ₂ O ₂ -molibdat kompleksinin 405 nm’de ölçümü	Düşük numune gereksinimi, hızlı	Yüksek H ₂ O ₂ konsantrasyonu gerektirir	Serum ve doku analizleri	(Goth, 1991)
Kolorimetrik (Metal bazlı)	H ₂ O ₂ ’nin metal iyonlarını oksitlemesi ile renk değişimi	Yüksek hassasiyet, düşük girişim	Toksik reaktifler içerebilir	Biyolojik örneklerde H ₂ O ₂ analizi	(Özyürek ve ark., 2008; Hadwan, 2018; Hadwan, 2018; Hamza ve Hadwan, 2020; Krishna ve ark., 2021)
Elektroanalitik	Katalazın elektrot üzerindeki doğrudan redoks aktivitesi	Mediator gerektirmez, yüksek hassasiyet	Elektrot modifikasyonu gerektirir	Biyosensörler, hızlı analizler	(Salimi ve ark., 2005; Guliy ve Dykman, 2025; Li ve ark., 2025; Saputra ve Karim, 2025)
Titrimetrik	H ₂ O ₂ ’nin reaktiflerle titrasyonu	Düşük hata oranı, manuel analiz	Düşük hassasiyet, uzun analiz süresi	Düşük katalaz aktivitesine sahip örnekler	(Grilo ve ark., 2020)
Kemilüminesans	H ₂ O ₂ tüketildiğinde ışık emisyonunun azalması	Yüksek hassasiyet ve doğruluk	Uygulama zorluğu, özel ekipman gerektirir	Klinik analizler, biyosensörler	(Ghavamipour ve ark., 2018; Das ve Prajapati, 2025; Sethu ve ark., 2025; Sun ve ark., 2025)
Jel Bazlı	Enzim aktivitesinin doğrudan jel üzerinde görselleştirilmesi	Doğrudan analiz, özgüllük yüksek	Zaman alıcı (24-48 saat), düşük hassasiyet	Biyomedikal araştırmalar, hücresel analizler	(Weydert ve Cullen, 2010)

5. Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Analizler

Gelişen yapay zeka ve makine öğrenmesi teknolojileri, katalaz aktivitesinin ölçümünde daha hızlı, hassas ve otomatik analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır (Dakal ve ark., 2025; Gao ve ark., 2025; Wang ve ark., 2025). Spektrofotometrik, elektroanalitik ve kemilüminesans tabanlı ölçüm verilerinin yapay zeka destekli olarak işlenmesi, ölçüm hatalarını en aza indirerek yüksek doğrulukta analizler yapılmasını sağlayabilir. Yapay sinir ağları, karar ağaçları ve regresyon modelleri gibi farklı yapay zeka teknikleri, katalaz aktivitesinin biyobelirteç olarak değerlendirilmesi için güçlü araçlar sunabilmektedir (Pantic ve ark., 2022).

Derin öğrenme algoritmaları, spektrofotometrik spektrum veya voltametrik verilerden anormallikleri tespit ederek biyolojik girişimlerin etkisini minimize edebilir. Makine öğrenmesi tabanlı regresyon modelleri, katalaz aktivitesini tahmin etmek için büyük veri kümelerinden elde edilen referans değerlerle eğitilebilir ve ölçüm hassasiyetini artırabilir. Ayrıca, görüntü işleme teknikleri kullanılarak jel bazlı ölçümlerde enzim aktivitesinin otomatik olarak kantitatif analiz edilmesi sağlanabilir. Özellikle konvolüsyonel sinir ağları (CNNs) ve derin sinir ağları (DNNs) gibi gelişmiş yapılar, biyokimyasal ölçümlerde doğruluğu artırmak için kullanılabilir (Guo ve ark., 2024).

Büyük veri analizi ve biyoinformatik yaklaşımları, katalaz aktivitesinin biyomarker olarak değerlendirilmesine ve çeşitli hastalıklarla ilişkilendirilmesine olanak tanıyabilir. Yapay zeka destekli klinik karar destek sistemleri, katalaz aktivite ölçümlerini hastalık teşhisi ve prognoz takibi için entegre ederek kişiselleştirilmiş tıbbi yaklaşımlar geliştirilmesini sağlayabilir (McIntyre ve ark., 2014). Blok zincir tabanlı veri yönetimi, laboratuvarlar arası veri paylaşımını güvenli hale getirerek daha geniş çaplı sağlık analizleri yapılmasına yardımcı olabilir (Yaqoob ve ark., 2022; Abbas ve ark., 2024).

Karar ağacı öğrenme, veri biliminde tahmine dayalı modelleme yöntemidir (Zane ve ark., 2019). Hedef değişkenler yapraklarla, dallar ise karar noktalarıyla temsil edilir. Bu yapı, programlamadaki "if" ifadelerine benzer kurallara dönüştürülebilir. Rastgele karar ormanları (random forests), birden fazla karar ağacından oluşur ve biyolojik örneklerin sınıflandırılmasında etkilidir. Genellikle bireysel karar ağaçlarından daha yüksek doğruluk sağlar (Tan ve ark., 2019; Davidovic ve ark., 2021). Karar ağaçları ve rastgele ormanlar gibi algoritmalar, katalaz aktivitesi ile oksidatif stres arasındaki ilişkileri modelleyerek çeşitli hastalıkların erken teşhisinde kullanılabilir. Destek vektör makineleri (SVMs), katalazın oksidatif stresle ilişkisini belirleyen en iyi sınıflandırıcıları geliştirmek için faydalı olabilir. Lojistik regresyon ve Bayes öğrenme yöntemleri, hastalıkların ilerleyişini tahmin etmek için katalaz aktivite ölçümlerine entegre edilebilir (Pantic ve ark., 2022).

6. Sonuç

Katalaz aktivitesi, oksidatif stresin düzenlenmesi ve hücrel detoksifikasyon süreçlerinde kritik bir rol oynayan önemli bir biyokimyasal belirteçtir. Bu nedenle, katalaz aktivitesinin doğru, hassas ve

tekrarlanabilir bir şekilde ölçülmesi, biyomedikal araştırmalar, klinik tanı süreçleri ve farmasötik geliştirmeler açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan spektrofotometrik, kolorimetrik, elektroanalitik, titrimetrik, kemilüminesans ve jel bazlı yöntemler kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve her bir yöntemin güçlü ve zayıf yönleri detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Spektrofotometrik yöntemler hızlı ve basit uygulanabilirlikleri ile öne çıkarken, elektroanalitik ve kemilüminesans tabanlı yöntemler yüksek hassasiyet ve düşük tespit limitleri sunmaktadır. Kolorimetrik yöntemler pratik kullanım avantajı sağlarken, jel bazlı ölçümler hücresel seviyede lokalizasyon çalışmaları için önemli bir araç sunmaktadır. Yapılan kapsamlı değerlendirme sonucunda, kolorimetrik yöntemin, katalaz aktivitesinin ölçümünde genel olarak en güvenilir ve tercih edilen yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, çalışılan dokunun özellikleri ve potansiyel interferans faktörleri göz önünde bulundurularak, uygun örnek hazırlama ve protein izolasyon protokollerinin uygulanması, ölçümlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracaktır.

Bununla birlikte, biyolojik girişimler, düşük hassasiyet, analiz süresi, numune gereksinimi ve otomasyon zorlukları gibi sınırlamalar nedeniyle mevcut yöntemlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Özellikle, nanoteknoloji, mikroakışkan sistemler, gelişmiş spektroskopik analizler ve yapay zeka destekli analiz teknikleri gibi yeni yaklaşımlar, katalaz aktivite ölçümlerinde doğruluk ve güvenilirliği artırma potansiyeline sahiptir.

Gelecekte, derin öğrenme algoritmaları, makine öğrenmesi tabanlı regresyon modelleri ve büyük veri analizi gibi modern hesaplama tekniklerinin entegrasyonu ile katalaz aktivitesi daha hızlı ve otomatik olarak analiz edilebilir. Konvolüsyonel sinir ağları (CNNs) ve derin sinir ağları (DNNs) gibi yapay zeka tabanlı yaklaşımlar, biyokimyasal ölçümlerin hassasiyetini artırarak klinik karar destek sistemlerine entegre edilebilir. Ayrıca, blok zincir tabanlı veri yönetimi sayesinde laboratuvarlar arası veri paylaşımı güvenli hale getirilerek geniş çaplı sağlık analizleri mümkün hale gelebilir.

Sonuç olarak, katalaz aktivitesinin güvenilir ölçümü, yalnızca oksidatif stres araştırmaları için değil, aynı zamanda biyobelirteç olarak klinik teşhis ve tedavi süreçlerinde kullanım açısından da büyük potansiyel taşımaktadır. Bu nedenle, yeni nesil ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi ve geleneksel yöntemlerin otomasyon, hassasiyet ve güvenilirlik açısından iyileştirilmesi hem akademik araştırmalar hem de tıbbi uygulamalar için önemli bir gerekliliktir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Abbas A., Alroobaea R., Krichen M., Rubaiee S., Vimal S., Almansour FM. Blockchain-assisted secured data management framework for health information analysis based on Internet of Medical Things. *Personal and Ubiquitous Computing* 2024; 28(1): 59-72.
- Anjum NA., Sharma P., Gill SS., Hasanuzzaman M., Khan EA., Kachhap K. Catalase and ascorbate peroxidase—Representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants. *Environmental Science and Pollution Research* 2016; 23(19): 19002-19029.
- Aravapally PSN., Chandrasekar N., Verma A., Shah RP. Strategic approaches to assess and quantify the oxidative stress biomarkers in complex biological systems. *Bioanalysis* 2025; 1-14.
- Boriskin P., Deviatkin A., Nikitin A., Pavlova O., Toropovskiy A. Relationship of catalase activity distribution in serum and tissues of small experimental animals. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 2019; 403(1): 012113.
- Bukowska B., Chajdys A., Duda W., Duchnowicz P. Catalase activity in human erythrocytes: Effect of phenoxyherbicides and their metabolites. *Cell Biology International* 2000; 24(10): 705-711.
- Burton GJ., Jauniaux E. Oxidative stress. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology* 2011; 25(3): 287-299.
- Calabrese EJ., Canada AT. Catalase: Its role in xenobiotic detoxification. *Pharmacology & Therapeutics* 1989; 44(2): 297-307.
- Chakraborty A. Development of a deep learning-enhanced chemiluminescence method for trace formaldehyde detection in water samples. *Trans Comput Sci Methods* 2025; 5(2).
- Coremen M., Turkyilmaz IB., Us H., Us AS., Celik S., Ozel AE. Lupeol inhibits pesticides induced hepatotoxicity via reducing oxidative stress and inflammatory markers in rats. *Food Chem Toxicol* 2022; 164: 113068.
- Dakal TC., Xu C., Kumar A. Advanced computational tools, artificial intelligence and machine-learning approaches in gut microbiota and biomarker identification. *Front Med Technol* 2025; 6: 1434799.
- Das A., Paul P., Raj M., Sarkar A., De A., Banerjee T. Chemiluminescence-based biosensor: From principle to its applications. In: *Fundamentals of Biosensors in Healthcare*. Elsevier 2025: 315-336.
- Das A., Prajapati P. Navigating pharmaceuticals: Microfluidic devices in analytical and formulation sciences. *Discover Chemistry* 2025; 2(1): 49.
- Davidovic LM., Laketic D., Cumic J., Jordanova E., Pantic I. Application of artificial intelligence for detection of chemico-biological interactions associated with oxidative stress and DNA damage. *Chem Biol Interact* 2021; 345: 109533.
- Farman AA., Hadwan MH. Simple kinetic method for assessing catalase activity in biological samples. *MethodsX* 2021; 8: 101434.

- Gao S., Wang J., Miao Z., Zhao X., Zhang Y., Du W, et al. Artificial intelligence enhanced microfluidic system for multiplexed point-of-care-testing of biological thiols. *Talanta* 2025; 127619.
- Ghavamipour F., Sajedi RH., Khajeh K. A chemiluminescence-based catalase assay using H₂O₂-sensitive CdTe quantum dots. *Microchim Acta* 2018; 185: 1-8.
- Glorieux C., Zamocky M., Sandoval JM., Verrax J., Calderon PB. Regulation of catalase expression in healthy and cancerous cells. *Free Radic Biol Med* 2015; 87: 84-97.
- Goth L. A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range. *Clin Chim Acta* 1991; 196(2-3): 143-151.
- Góth L., Rass P., Páy A. Catalase enzyme mutations and their association with diseases. *Mol Diagn* 2004; 8: 141-149.
- Grilo LF., Martins JD., Cavallaro CH., Nathanielsz PW., Oliveira PJ., Pereira SP. Development of a 96-well based assay for kinetic determination of catalase enzymatic-activity in biological samples. *Toxicol In Vitro* 2020; 69: 104996.
- Guliy OL., Dykman LA. Prospects for the use of nanozyme-based electrochemical and colorimetric sensors for antibiotic detection. *Talanta* 2025; 286: 127524.
- Guo M., Tian S., Wang W., Xie L., Xu H., Huang K. Biomimetic leaves with immobilized catalase for machine learning-enabled validating fresh produce sanitation processes. *Food Res Int* 2024; 179: 114028.
- Hadwan MH. Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC Biochem* 2018; 19(1): 7.
- Hadwan MH., Hussein MJ., Mohammed RM., Hadwan AM., Al-Kawaz SH., Al-Obaidy SS. An improved method for measuring catalase activity in biological samples. *Biol Methods Protoc* 2024; 9(1): bpae015.
- Hadwan MH., Ali SK. New spectrophotometric assay for assessments of catalase activity in biological samples. *Anal Biochem* 2018; 542: 29-33.
- Hamza TA., Hadwan MH. New spectrophotometric method for the assessment of catalase enzyme activity in biological tissues. *Curr Anal Chem* 2020; 16(8): 1054-1062.
- Henle ES., Linn S. Formation, prevention, and repair of DNA damage by iron/hydrogen peroxide. *J Biol Chem* 1997; 272(31): 19095-19098.
- Imlay JA., Chin SM., Linn S. Toxic DNA damage by hydrogen peroxide through the Fenton reaction in vivo and in vitro. *Science* 1988; 240(4852): 640-642.
- Kirkman HN., Gaetani GF. Catalase: A tetrameric enzyme with four tightly bound molecules of NADPH. *Proc Natl Acad Sci USA* 1984; 81(14): 4343-4347.
- Krishna H., Avinash K., Shivakumar A., Al-Tayar NGS., Shrestha AK. A quantitative method for the detection and validation of catalase activity at physiological concentration in human serum, plasma and erythrocytes. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 2021; 251: 119358.

- Li W., Han L., Li D., Pu Z. High-frequency ultrasound based microfluidic chip for high-sensitive and quick-response electrochemical biosensing. *Sens Actuators B Chem* 2025; 427: 137204.
- Martemucci G., Costagliola C., Mariano M, D'Andrea L., Napolitano P., D'Alessandro AG. Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen* 2022; 2(2): 48-78.
- McIntyre RS., Cha DS., Jerrell JM., Swardfager W., Kim RD., Costa LG. Advancing biomarker research: Utilizing 'Big Data' approaches for the characterization and prevention of bipolar disorder. *Bipolar Disord* 2014; 16(5): 531-547.
- Özyürek M., Bektaşoğlu B., Güçlü K., Apak R. Hydroxyl radical scavenging assay of phenolics and flavonoids with a modified cupric reducing antioxidant capacity (CUPRAC) method using catalase for hydrogen peroxide degradation. *Anal Chim Acta* 2008; 616(2): 196-206.
- Pantic I., Paunovic J., Pejic S, Drakulic D., Todorovic A., Stankovic S. Artificial intelligence approaches to the biochemistry of oxidative stress: Current state of the art. *Chem Biol Interact* 2022; 358: 109888.
- Ranaweera CB., Senadeera S., Peiris DHS., Fernando DTK. Assessment of in vitro anti-inflammatory activity: A comprehensive review of methods, advantages, and limitations. 2025.
- Salimi A., Noorbakhsh A., Ghadermarz M. Direct electrochemistry and electrocatalytic activity of catalase incorporated onto multiwall carbon nanotubes-modified glassy carbon electrode. *Anal Biochem* 2005; 344(1): 16-24.
- Saputra HA., Karim MM. Enzymatic and enzyme-free electrochemical lactate sensors: A review of the recent developments. *Electrochem Sci Adv* 2025; 5(1): e202400021.
- Sethu N., Premchandra P., Kolhe SB., Kulkarni MB., Vyas R. An integrated microfluidic device driven by an automated system for precise detection of antibiotics in water. *Sens Actuators A Phys* 2025; 388: 116474.
- Sies H., Berndt C., Jones DP. Oxidative stress. *Annu Rev Biochem* 2017; 86(1): 715-748.
- Storz G., Imlay JA. Oxidative stress. *Curr Opin Microbiol* 1999; 2(2): 188-194.
- Sun J., Duan S., Xu W., He W., Li T., Liu S. fully automated paper-based smartphone-assisted microfluidic chemiluminescence sample-to-result immunoassay platform. *Anal Chim Acta* 2025; 344013.
- Tan J., Gao Y., Liang Z., Cao W., Pomeroy MJ., Huo Y. 3D-GLCM CNN: A 3-dimensional gray-level co-occurrence matrix-based CNN model for polyp classification via CT colonography. *IEEE Trans Med Imaging* 2019; 39(6): 2013-2024.
- Van Der Vliet A., Janssen-Heininger YMW. Hydrogen peroxide as a damage signal in tissue injury and inflammation: Murderer, mediator, or messenger? *J Cell Biochem* 2014; 115(3): 427-435.
- Vetrano AM., Heck De., Mariano TM., Mishin V., Laskin DL., Laskin JD. Characterization of the oxidase activity in mammalian catalase. *J Biol Chem* 2005; 280(42): 35372-35381.

- Wang B., Zhang X., Fang W., Rovira C., Shaik S. How do metalloproteins tame the Fenton reaction and utilize •OH radicals in constructive manners? *Acc Chem Res* 2022; 55(16): 2280-2290.
- Wang GJ., Fung DY. Significance of bacterial catalase in food microbiology: A review. *J Food Saf* 1986; 8(1): 47-67.
- Wang Y., Branicky R., Noë A., Hekimi S. Superoxide dismutases: Dual roles in controlling ROS damage and regulating ROS signaling. *J Cell Biol* 2018; 217(6): 1915-1928.
- Wang Y., Han S., Wang Y., Liang Q., Luo W. Artificial intelligence technology assists enzyme prediction and rational design. *J Agric Food Chem* 2025; 73(12): 7065-7073.
- Weydert CJ., Cullen JJ. Measurement of superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase in cultured cells and tissue. *Nat Protoc* 2010; 5(1): 51-66.
- Yaqoob I., Salah K., Jayaraman R., Al-Hammadi Y. Blockchain for healthcare data management: Opportunities, challenges, and future recommendations. *Neural Comput Appl* 2022; 1-16.
- Zane P., Gieschen H, Kersten E, Mathias N, Ollier C, Johansson P, et al. In vivo models and decision trees for formulation development in early drug development: A review. *Eur J Pharm Biopharm* 2019; 142: 222-231.
- Zhao MX., Wen JL., Wang L., Wang XP., Chen TS. Intracellular catalase activity instead of glutathione level dominates the resistance of cells to reactive oxygen species. *Cell Stress Chaperones* 2019; 24(3): 609-619.