

## Terbiyumun *Pontastacus leptodactylus*'ta ki Oksidatif Stres ve Antioksidan Yanıtlarının Belirlenmesi

### Determination of Terbium's Oxidative Stress and Antioxidant Responses in *Pontastacus leptodactylus*

Ayşe Nur Aydın<sup>1\*</sup>, Osman Serdar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Tunceli-TÜRKİYE

\*Sorumlu Yazar: [aysenuraydin2016@gmail.com](mailto:aysenuraydin2016@gmail.com)

Received: 08.05.2023

Accepted: 09.08.2023

Published: 01.03.2024

**How to Cite:** Aydın, A. N., & Serdar, O. (2024). Terbiyumun *Pontastacus leptodactylus*'daki oksidatif stres ve antioksidan yanıtlarının belirlenmesi. *Acta Aquatica Turcica*, 20(1), 023-032. <https://doi.org/10.22392/actaquatr.1294250>

**Özet:** Terbiyum (Tb), su ortamında yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu sucul organizmalar için toksik hale gelebilen nadir toprak elementi (NTE)'dir. Tatlı su ekosistemindeki Tb toksitesinin meydana getirdiği oksidatif stres sonuçlarıyla ilgili hala yeterince çalışmalar mevcut değildir. Bu çalışma ile Tb'nin oksidatif stres sonuçlarını değerlendirmek için tatlı su canlısı olan *Pontastacus leptodactylus* kullanılmıştır. Bu organizmada, 1, 5 ve 25 mg/L konsantrasyonlardaki Tb'nin 24 ve 96. saatte meydana getirdiği oksidatif stres ve antioksidan değişimleri süperoksit dismutaz (SOD), glutatyon peroksidaz (GSH-Px), katalaz (CAT) enzim aktiviteleri ile Tiyobarbitürik asit (TBARS) ve redükte glutatyon (GSH) seviyeleri belirlenmiştir. Sonuçlar ELISA kitleri kullanılarak tespit edilmiştir. Biyobelirteç analizlerin istatistiksel değerlendirilmesinde SPSS 24.0 paket program tek-yönlü ANOVA (Duncan 0,05) testi kullanılmıştır. Kontrol grubu ile karşılaştırıldığında SOD aktivitesinde önemli bir değişim gözlemlenmezken ( $p>0,05$ ) CAT ve GPx aktivitelerinde anlamlı azalmalar ( $p<0,05$ ) gözlemlenmiştir; GSH ve TBARS seviyelerinde ise anlamlı ( $p<0,05$ ) artışlar gözlemlenmiştir. Çalışma verileri dikkate alındığında canlı organizma vücuduna nüfuz eden Tb ksenobiyotiklerinin organizma da oksidatif strese neden olduğu düşünülmektedir.

#### Keywords

- Terbiyum
- *Pontastacus leptodactylus*
- Oksidatif stres
- Antioksidan
- Biyobelirteç

**Abstract:** Terbium (Tb) is a rare earth element (REE) that can become toxic to aquatic organisms when present in high concentrations in the aquatic environment. There are still not enough studies on the oxidative stress consequences of Tb toxicity in the freshwater ecosystem. In this study, the freshwater creature *Pontastacus leptodactylus* was used to evaluate the oxidative stress consequences of Tb. The oxidative stress and antioxidant changes caused by Tb at 1, 5 and 25 mg/L concentrations at 24 and 96 hours in *P. leptodactylus*, were affected by the enzyme activities of superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GSH-Px), catalase (CAT) and thiobarbituric acid (TBARS) and reduced levels of glutathione (GSH) were determined. Results were determined using ELISA kits. SPSS 24.0 package program one-way ANOVA (Duncan 0.05) test was used in the statistical evaluation of biomarker analyses. While no significant change was observed in SOD activity ( $p>0.05$ ) compared to the control group, significant decreases were observed in CAT and GPx activities ( $p<0.05$ ); Significant ( $p<0.05$ ) increases were observed in GSH and TBARS levels. Considering the study data, it is concluded that the TB xenobiotic that penetrates the body of living organisms causes oxidative stress in the organism.

#### Anahtar kelimeler

- Terbium
- *Pontastacus leptodactylus*
- Oxidative stress
- Antioxidant
- Biomarkers

## 1. GİRİŞ

Bir NTE olan Terbiyum (Tb), gümüşü beyaz renkte, dövülebilir, sünek ve bıçakla kesilebilecek kadar yumuşak nadir toprak metalidir. Lantanid serisinin dokuzuncu üyesi olan Tb, su ile reaksiyona girerek hidrojen gazı üreten oldukça elektropozitif bir metaldir (URL-1, 2023). Terbiyum doğada



hiçbir zaman serbest bir element olarak bulunmaz; ancak serit, gadolinit, monazit, ksenotim ve öksenit olmak üzere birçok mineralde bulunmakla birlikte Tb nadir ve pahalı bir elementtir. Bu nedenle çok az ticari kullanımı vardır. Bazı küçük kullanımları lazerlerde, yarı iletken cihazlarda ve renkli televizyon tüplerindeki fosfordadır. Katı hal cihazlarında yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinin stabilizatörü olarak da kullanılır (URL-1, 2023).

Lantandan (La: Z = 57) lutesyuma (Lu: Z = 71) kadar olan periyodik tablo elementleri genellikle nadir toprak elementleri (NTE'ler) olarak adlandırılır. Lantanitler veya 'Endüstriyel vitaminler' olarak da bilinen NTE'ler, aynı elektronik katmanları içeren ancak atom numaralarında küçük farklılıklar bulunan, neredeyse benzer elektronik konfigürasyona sahip, kimyasal olarak tekdüze bir metalik element grubudur (Adeel vd., 2022). Günümüzde NTE'ler, tarımda fosfatlı gübreler, temiz enerji, tıbbi ürünler, akıllı telefonlar, kalıcı mıknatıslar, flüoresan ampuller, güneş panelleri, hibrit motorlar, rüzgar türbinleri, karbon ark aydınlatması, cam parlatma, seramik, şarj edilebilir piller ve araba katalitik konvertörleri, demir ve çelik katkı maddeleri dahil olmak üzere birçok sektör için vazgeçilmezdir (Migaszewski ve Galuszka, 2015).

NTE'lerin tarımsal topraklarda ve kentsel alanlardaki konsantrasyonu; NTE'lerin kalıntılarının toprağa boşaltılması, NTE'lerle zenginleştirilmiş gübrelerin uygulanması veya madencilik alanlarını çevreleyen arazilerdeki tarım faaliyetleri gibi çeşitli antropojenik girdi ortamlarındaki bitkilerde NTE'lerin biyobirikimi gözlemlendiğinden önemlidir (Hu vd., 2004; Tyler, 2004). Çevredeki kalıcılıkları nedeniyle, toprak ve tortulardaki yaygın NTE'lerin riskleri, etkileri ve kronik toksisitesi endişe vericidir. Toprakta birikimleri, ekinlerde de biyobirikime yol açar ve yağmur suları, yeraltı suları ve rüzgarlar ile su ortamına karışarak nihayetinde besin zincirine girerler (Charalampides vd., 2015).

Sudaki NTE'ler hakkındaki bilgiler, özellikle arka plan konsantrasyonu, ekolojik ve insan sağlığı risk değerlendirmeleri için çok önemlidir. Suda yaşayan organizmalar üzerine yapılan son araştırmalar, lantanitlere maruz kalmanın su pirelerinin hayatta kalmasını, büyümesini ve çoğalmasını azalttığını ve deniz kestanesi embriyogenezini ve döllemesini etkilediği (Amato vd., 2016) bildirilmektedir. Ayrıca, NTE maruziyetinin midyelerde antioksidan ve biyotransformasyon savunmalarının aktivasyonu, lipid peroksidasyonu (Freitas vd., 2020) ve immünomodülasyon (Hanana vd., 2017; Hanana vd., 2018) ile ilişkili olduğu bulunmuştur.

Kabuklular, su ekosistemlerindeki kirlenmeye karşı hassasiyetleri nedeniyle ekotoksikoloji testlerinde ve biyoizleme çalışmalarında kullanılan organizmalardandır (Lebrun vd., 2015; Ronci vd., 2016).

Sucul organizmalar, su ortamındaki kirliliği izlemek için uygun kabul edilmekle birlikte (van der Oost vd., 2003), kirlenmeye kaynaklı biyokimyasal ve fizyolojik değişikliklere karşı hassas tepkileri nedeniyle de önemlidir (Lavado vd., 2006). NTE'lerin suda yaşayan organizmalar üzerindeki etkisi hakkında çok az bilgi mevcuttur ve ilgili çevresel riskler belirsizliğini korumaktadır. Oksidatif stres, reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı birikmesi nedeniyle gelişir. Kabaca tüm biyotik ve abiyotik stresleri gerçekleştiren fizyolojik ve kimyasal olayları kontrol eder (Demidchik, 2015). Oksidatif strese yol açan redoks dengesizliğinde çeşitli NTE'lerin rolü, hem bitki hem de hayvan modellerinde yürütülen bir dizi bağımsız çalışmada gösterilmiştir ve pek çok NTE'nin oksidatif strese neden olduğu rapor edilmiştir (Tseng vd., 2012; Wang vd., 2014; Zhao vd., 2013).

Bu çalışmada, endüstride kullanımı giderek artan Tb'nin çevrede oluşturduğu istenmeyen kirlenme ve hedef olmayan organizmalarda meydana getirdiği etkileri araştırmak amacıyla tatlı su ıstakozu *Pontastacus leptodactylus*'un hepatopankreas dokusunda SOD, CAT, GPx, aktiviteleri ile TBARS ve GSH seviyesi üzerindeki etkilerinin *in vitro* koşullarda araştırılması amaçlanmaktadır.

## 2. MATERYAL METOT

### 2.1. Test Organizması

Su ürünleri avcılık faaliyetleri yapılan ticari bir firmadan canlı olarak temin edilmiştir.

### 2.2. Test Organizmalarının Laboratuvar Ortamına Adaptasyonu

Model organizma *P. leptodactylus*, satın alındığı firmadan su ile birlikte polietilen kutularda laboratuvara nakledildi. Canlıların üzerindeki stresi azaltmak için mümkün olan en kısa sürede laboratuvara ulaştırıldı. Yaklaşık bir ay süreyle laboratuvar koşullarına adaptasyonları sağlandı. Ortam suyu sıcaklığı 15±2 °C; fotoperiyot döngüsü 14:10 aydınlık:karanlık olacak şekilde sabitlendi. Stok

tanklarının abiyotik parametreleri (çözünmüş oksijen:  $11,52 \pm 10,87$  mg/L; pH:  $8,14 \pm 0,4$ ; elektriksel iletkenlik:  $478 \pm 76$   $\mu$ S/cm; tuzluluk:  $0,3 \pm 0,02$  g/L) günlük düzenli olarak YSI Professional plus marka cihaz ile ölçüm yapılarak değişimler kayıt edildi. Su parametrelerinde meydana gelen bozulmalardan kaynaklanan ek stresi önlemek için her akvaryumdaki su kalitesi günlük olarak revize edildi. Günde 1 defa alabalık yemi ile yemleme yapıldı. Her akvaryumdan arta kalan yem ve dışkı maddesi çıkarıldı, su ortamına her gün tatlı su eklenerek yenilendi. Stok tanklarına pvc borular eklenerek kerevitler için barınaklar oluşturuldu.

### 2.3. Kimyasal Madde Temini

Çalışmada kullanılan Tb, NTE'si ticari firma olan Bostonchem'den %99,99 saflık derecesinde temin edilmiştir.

### 2.4. Subletal Konsantrasyonlar

Tüm toksikolojik çalışmalarda olduğu gibi Tb uygulama çalışmamızda da belirlenen uygulama konsantrasyonları çevreye salınım oranları ve bu aralıktaki değerleri dikkate alınarak uygulama konsantrasyonları belirlenmiştir.

### 2.5. Deney Dizayını

Her biri 30 litreten oluşan cam akvaryumlara benzer büyüklükte ve sağlıklı 7'şer adet model canlı yerleştirildi. Canlıların O<sub>2</sub> ihtiyacı hava motorları ile sağlanmıştır. Deneysel çalışma biri kontrol grubu olmak üzere 4 gruptan oluşturulmuştur. Dört grup için iki zaman dilimi (24 ve 96 saat) belirlenmiştir.

C1: (Kontrol): Herhangi bir Tb konsantrasyonuna maruz bırakılmayan, organizmaların doğal ortamından alınan su ortamı,

C2: 24 ve 96 saatlerde 1 mg/L Tb konsantrasyona maruz bırakılan grup,

C3: 24 ve 96 saatlerde 5 mg/L Tb konsantrasyona maruz bırakılan grup,

C4: 24 ve 96 saatlerde 25 mg/L Tb konsantrasyona maruz bırakılan grup,

Deneysel araştırmada tüm çalışmalar üç tekrarlı olarak yürütülmüştür.

### 2.6. Biyobelirteç Parametre Analizleri

Uygulama gruplarındaki akvaryumdan rastgele üç adet model canlı seçilmiştir. Hepatopankreas doku örnekleri alınmak üzere canlılar yarım saat buzlu suda bekletilmiş, soğuk şok uygulaması yapılmış ve her bir canlıdan 0,5 gr hepatopankreas doku örneği alınmıştır. Numuneler tartılmış ve antioksidan parametreleri ölçmek için 1/5 w/v oranında PBS tamponu (fosfat ile tamponlanmış tuz solüsyonu) eklenerek, DAIHAN marka homojenizatör kullanılarak buz ile homojenize edilmiştir. Numuneler 17.000 rpm'de 15 dakika santrifüjlenmiştir. Süpernatantlar, ölçümleri yapılana kadar -86 °C'de derin dondurucuda tutulmuştur. SOD, CAT ve GPx aktiviteleri ile GSH ve TBARS seviyeleri ELISA kiti kullanılarak yapıldı.

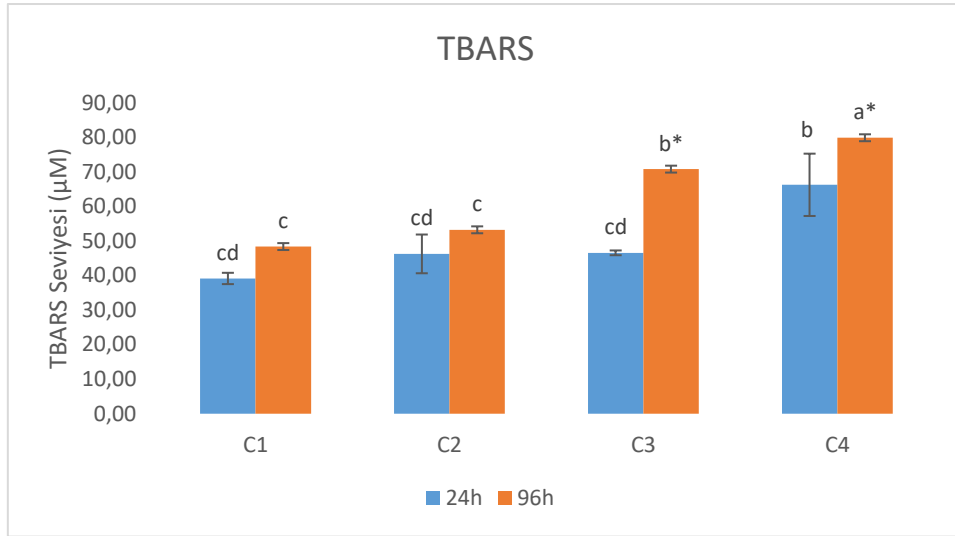
### 2.7. İstatiksel Analizler

Biyokimyasal analizlerin istatistiksel değerlendirilmesinde SPSS 24.0 paket program tek-yönlü ANOVA (Duncan 0,05) testi kullanılmıştır.

## 3. BULGULAR

### 3.1. TBARS Seviyesi

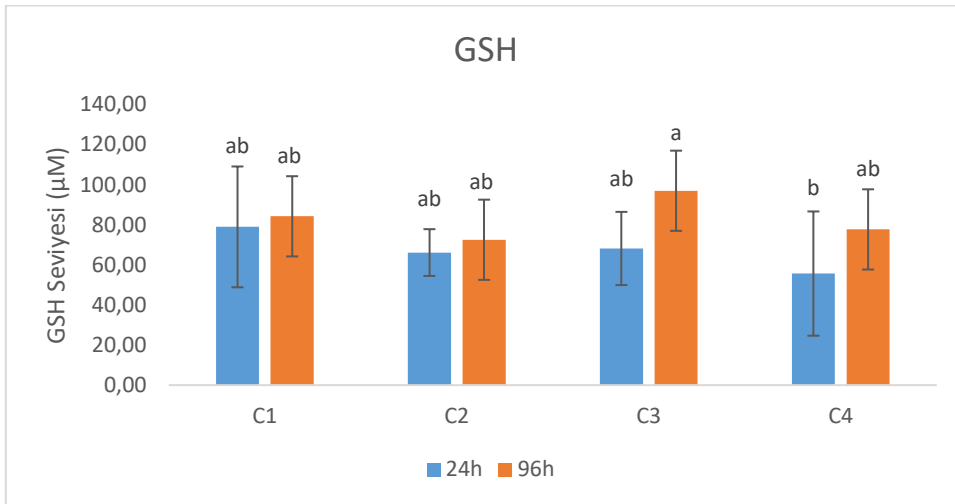
Tb'nin farklı konsantrasyonlarında zamana bağlı TBARS seviyeleri Şekil 1'de verilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla C3 ve C4 gruplarında istatistiksel açıdan anlamlı ( $p < 0,05$ ) bir artış olduğu tespit edilmiştir. Zamana göre (24 ve 96 s) kıyaslama da ise sadece C3 ve C4 gruplarında istatistiksel açıdan anlamlı artışın ( $p < 0,05$ ) olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 1.** Terbiyuma maruz bırakılan *P. leptodactylus*'un TBARS ( $\mu\text{M}$  doku) seviyeleri, sütun üzerindeki farklı harfler gruplar arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ), yıldız işareti ise aynı uygulama grubunda süreler arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) belirtir.

### 3.2. GSH Seviyesi

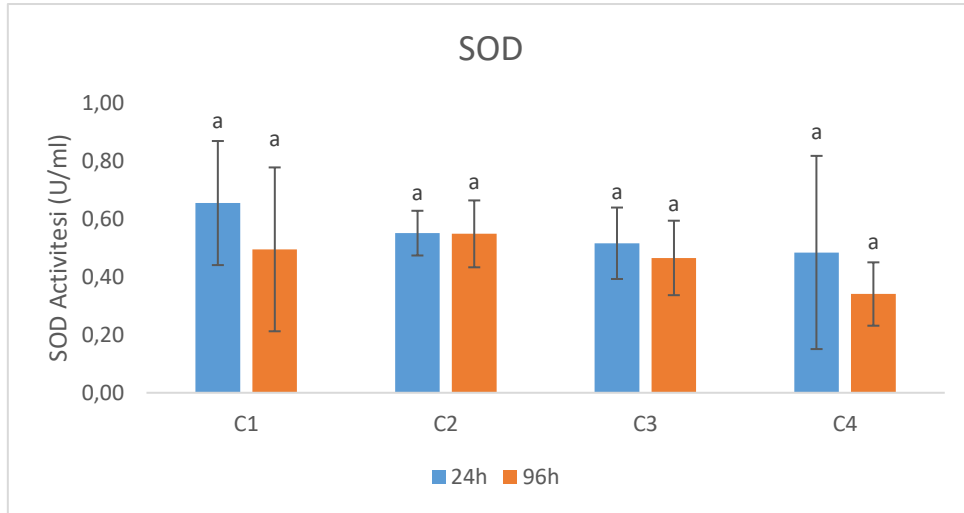
Tb'nin farklı konsantrasyonlarda zamana bağlı GSH seviyeleri Şekil 2'de verilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla uygulama gruplarında değişimler gözlemlenmiş ancak değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir. Zamana göre (24 ve 96 s) kıyaslamada da GSH seviyesindeki değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir.



**Şekil 2.** Terbiyuma maruz bırakılan *P. leptodactylus*'un GSH ( $\mu\text{M}$  doku) seviyeleri, sütun üzerindeki farklı harfler gruplar arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) yıldız işareti ise aynı uygulama grubunda süreler arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) belirtir.

### 3.3. SOD Aktivitesi

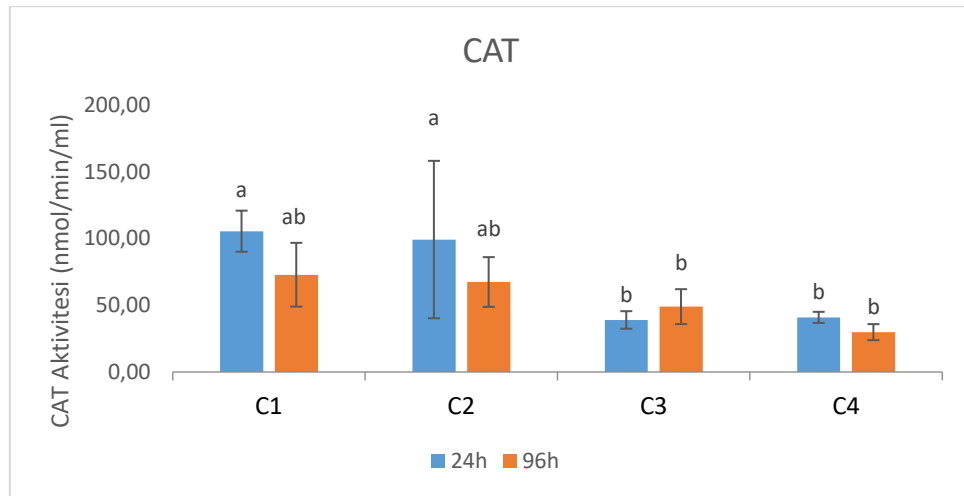
Tb'nin farklı konsantrasyonlarında zamana bağlı SOD aktiviteleri Şekil 3'te verilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla uygulama gruplarında SOD aktivitesinin azaldığı gözlemlenmiş ancak değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir. Zamana göre (24 ve 96 s) kıyaslamada da SOD aktivitesindeki değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir.



**Şekil 3.** Terbiyuma maruz bırakılan *P. leptodactylus*'un SOD (U/ml) aktiviteleri, sütun üzerindeki farklı harfler gruplar arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) yıldız işareti ise aynı uygulama grubunda süreler arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) belirtir.

### 3.4. CAT Aktivitesi

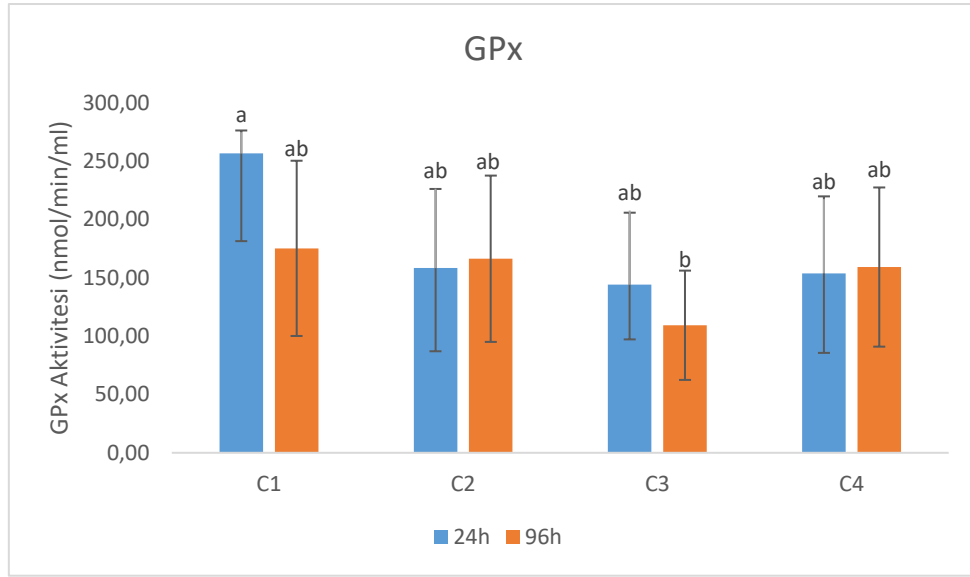
Tb'nin konsantrasyonlarına zamana bağlı olarak maruz bırakılan *P. leptodactylus*'da CAT aktiviteleri Şekil 4'de verilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla uygulama gruplarında CAT aktivitesinin azaldığı, C3 ve C4 gruplarında istatistiksel açıdan anlamlı ( $p < 0,05$ ) bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Zamana göre (24 ve 96 s) kıyaslamada ise CAT aktivitesindeki değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir.



**Şekil 4.** Terbiyuma maruz bırakılan *P. leptodactylus*'un CAT (nmol/min/ml) aktiviteleri, sütun üzerindeki farklı harfler gruplar arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) yıldız işareti ise aynı uygulama grubunda süreler arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) belirtir.

### 3.5. GPx Aktivitesi

Tb'nin farklı konsantrasyonlarında zamana bağlı olarak maruz bırakılan *P. leptodactylus*'da GPx aktiviteleri Şekil 5'te verilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla uygulama gruplarında GPx aktivitesinin azaldığı gözlemlenmiş ancak değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir. Zamana göre (24 ve 96 s) kıyaslamada da GPx aktivitesindeki değişimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ( $p > 0,05$ ) tespit edilmiştir.



**Şekil 5.** Terbiyuma maruz bırakılan *P. leptodactylus*'un GPx (nmol/min/ml) aktiviteleri, sütun üzerindeki farklı harfler grupları arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) yıldız işareti ise aynı uygulama grubunda süreler arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farkı ( $p < 0,05$ ) belirtir.

Terbiyumun *Pontastacus leptodactylus*'daki oksidatif stres ve antioksidan yanıtlarının belirlenmesine ait istatistiksel veriler Tablo EK-1'de verilmiştir.

#### 4. TARTIŞMA

Literatürde, kirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki etkilerinin çeşitli biyobelirteçlerle araştırıldığı birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Hanana vd. (2021a) yapmış oldukları çalışmada gökkuşağı alabalığında terbiyum ve praesodimyumun oksidatif stres belirteçlerini incelemişler ve sonucunda Tb'nin Pr'den 2 kat daha toksik olduğunu belirtmişlerdir. Lompré vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada yerli (*Ruditapes decussatus*) ve istilacı (*Ruditapes philippinarum*) akivadeslerde Tb ve karbon nanotüplere maruz bırakarak canlı üzerindeki etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak yalnızca Tb'ye maruz kalan akivadeslerde metabolik bozulma gözlenmesine rağmen, maruz bırakma uygulamasına bakılmaksızın her iki türde de redoks dengesi kaybı ve nörotoksisite kanıtlandığını belirtmişlerdir. Serdar vd. (2021) yaptıkları çalışmada gadolinyumun *Dreissena polymorpha* üzerindeki oksidatif stres etkilerini incelemişler ve sonucunda TBARS seviyelerinin arttığını belirtmişlerdir. Hücreleri oksidatif strese karşı koruyan SOD bir kofaktördür; detoksifikasyon ile ilişkili biyokimyasal süreçler, oksidatif reaksiyonların ve maksimum serbest radikal oluşumunun dokularını içeren karaciğerde tetiklenir (Wang vd., 2018). Hanana vd. (2021b) yapmış oldukları çalışmada dispersiyum ve lutesyuma maruz bıraktıkları gökkuşağı alabalığında SOD ve CAT aktivitelerinde azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. Bazı durumlarda  $O_2$  tek başına veya  $H_2O_2$ 'ye dönüştürüldükten sonra enzimdeki sisteinin güçlü oksidasyonuna neden olur ve SOD aktivitesini azaltır (Dimitrova vd., 1994; Durmaz vd., 2006). Tb'ye maruz bıraktığımız *P. leptodactylus*'da SOD verileri açısından literatür verileri ile uyumluluk göstermektedir. Kirlenmiş ortamlardaki CAT aktivitesi, maddeye bağlı olarak artabilir veya azalabilir (Sobjak vd., 2017). *P. leptodactylus*'da Tb etkisi ile CAT enzim aktivitesinin inhibe edildiği gözlemlenmiştir. Mevcut çalışmaya benzer şekilde, çeşitli kirletici maddelere maruz kalan suda yaşayan organizmalarda CAT aktivitesinde azalmalar bildirilmiştir. Figueiredo vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada *Anguilla anguilla*'da Lantan maruziyeti sonucu CAT aktivitelerinin azaldığını belirtmişlerdir. Andrade vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada *Mytilus galloprovincialis*'te itriyumun oksidatif stres sonuçlarını incelemişler ve inceleme sonucunda SOD aktivitesinde artış, CAT aktivitesinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. Barbosa vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada *Venerupis corrugata*'da lityumun etkisini araştırmışlar ve SOD aktivitesinde önemli bir değişim olmadığını, CAT aktivitesinde azalmalar ve GSH seviyesinde ise azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. Andrade vd. (2022) *M. galloprovincialis*'de lantanın etkisini

araştırmışlar ve CAT aktivitelerinde azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. GPx aktivitesinin inhibisyonu, kirleticilerle temas halindeki antioksidan sistemin başarısızlığını yansıtabilir (Ballesteros vd., 2009) veya süperoksit radikallerinin veya kirleticinin enzim sentezi üzerindeki doğrudan etkisiyle ilişkili olabilir (Bainy vd., 1993). Literatürde birçok çalışma GPx aktivitesinin kirleticiler tarafından tetiklendiğini bildirmektedir. Gobi vd. (2018) yaptıkları çalışmada *Oreochromis mossambicus*'da selenyumun oksidatif stres parametreleri üzerine etkisini incelemişler ve sonuç olarak GSH seviyesinde artışlar GPx aktivitelelerinde ise azalmalar gözlemlenmiştir. Sun vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada Lantan'ın *Chlorella vulgaris* ve *Phaeodactylum tricornutum*'da meydana getirdiği biyobelirteç sonuçlarını incelemişler ve sonuç olarak GSH seviyelerinde artışlar olduğunu belirtmişlerdir. TBARS, oksidatif stresi değerlendirmek için indirekt bir yöntemdir, reaktif oksidan radikaller ile hücrenin lipid membranı arasındaki etkileşimi temsil eder. Pereira vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada nefrektomi sonrası Gadolinium uygulanan sıçanlarda TBARS seviyelerinin arttığı bulunmuştur bu durum Gd'nin oksidatif streste bir artışı neden olduğunu düşündürmüştür. Hanna vd. (2017) araştırmaları sonucunda gadolinium chloride (GdCl<sub>3</sub>) uygulaması da çoklu biyobelirteç yaklaşımı ile 28 gün boyunca zebra midyeleri üzerinde çalışmışlar ve bulgularına göre, GdCl<sub>3</sub> maruziyeti sonrası SOD ve sitokrom c-oksidadin (CO1) arttığını rapor etmişlerdir. Aynı zamanda, CAT ve GST gen ekspresyonunun, lipid peroksidasyonu ve genotoksisite üzerinde hiçbir spesifik etki olmaksızın azaldığı diley getirmişlerdir. Pinto vd. (2019) oksidatif stres belirteçlerinin analizi yoluyla La'nın midye *Mytilus galloprovincialis* üzerindeki toksisitesini değerlendirmişlerdir. La maruziyeti sonrası midyelerde, özellikle orta konsantrasyonlarda antioksidan savunmalar SOD ve GPx'in yanı sıra biyotransformasyon enzimlerinin GST'lerinin aktivasyonu ile biyokimyasal bir cevap olduğu görülmüştür.

## 5. SONUÇ

Çalışma sonucu değerlendirildiğinde NTE'lerin *P. leptodactylus*'ta antioksidan ve oksidatif stres yanıtları belirlemiş ve model canlıların Tb maruziyeti ile oksidatif strese girdiği organizmaya hücrenel hasar verdiği düşünülmekte ve bu durum canlı organizmanın yaşam ortamına karışan herhangi bir kirleticinin canlı organizmayı etkilediği düşünülmektedir. Sonuç olarak *P. leptodactylus*'un NTE'lerin maruziyetiyle çalışmada kullanılan parametrelerin değerlendirilmesinde yararlı biyobelirteçler olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmadaki oksidatif stres ve antioksidan yanıtları hepotapankreasta belirlenen Tb konsantrasyonları ile ilişkili olduğu, konsantrasyona ve maruz kalma süresine bağlı olduğu düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Adeel, M., Lee, J. Y., Zain, M., Rizwan, M., Nawab, A., Ahmad, M. A., ... & Xing, B. (2019). Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms. *Environment international*, 127, 785-800.
- Amato, J., Morigi, R., Pagano, B., Pagano, A., Ohnmacht, S., De Magis, A., ... & Randazzo, A. (2016). Spesifik G-dörtlü bağlayıcıların geliştirilmesine doğru: Yeni hidrazon türevlerinin sentezi, biyofiziksel ve biyolojik çalışmaları. *Tıbbi kimya dergisi*, 59(12), 5706-5720.
- Andrade, M., Soares, A. M., Solé, M., Pereira, E., & Freitas, R. (2022). Do climate change related factors modify the response of *Mytilus galloprovincialis* to lanthanum? The case of temperature rise. *Chemosphere*, 307, 135577.
- Andrade, M., Soares, A. M., Solé, M., Pereira, E., & Freitas, R. (2023). Threats of Pollutants Derived from Electronic Waste to Marine Bivalves: The Case of the Rare-Earth Element Yttrium. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(1), 166-177.
- Bainy, A.C.D., Arisi, A.C.M., Azzalis, L.A., Simizu, K., Barros, S.B.M., Videla, L.A., & Junqueira, V.B.C. (1993). Differential effects of short-term lindane administration on parameters related to oxidative stress in rat liver and erythrocytes. *Journal of Biochemical Toxicology*, 8(4), 187-194.
- Ballesteros, M.L., Wunderlin, D.A., & Bistoni, M.A. (2009). Oxidative stress responses in different organs of *Jenynsia multidentata* exposed to endosulfan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(1), 199-205.

- Barbosa, H., Soares, A. M., Pereira, E., & Freitas, R. (2023). Lithium: A review on concentrations and impacts in marine and coastal systems. *Science of The Total Environment*, 857, 159374.
- Charalampides, G., Vatalis, K. I., Apostoplos, B., & Ploutarch-Nikolas, B. (2015). Rare earth elements: industrial applications and economic dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance*, 24, 126-135.
- Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 212-228.
- Dimitrova, M.S., Tishinova, V., & Velcheva, V. (1994). Combined effect of zinc and lead on the hepatic superoxide dismutase-catalase system in carp (*Cyprinus carpio*). *Comp Biochem Physiol C: Pharmacol Toxicol Endocrinol*, 108(1), 43-46.
- Durmaz, H., Sevgiler, Y., & Üner, N. (2006). Tissuespecific antioxidative and neurotoxic responses to diazinon in *Oreochromis niloticus*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 84(3), 215-226
- Freitas, R., Cardoso, C. E., Costa, S., Morais, T., Moleiro, P., Lima, A. F., ... & Pereira, E. (2020). New insights on the impacts of e-waste towards marine bivalves: The case of the rare earth element Dysprosium. *Environmental Pollution*, 260, 113859.
- Figueiredo, C., Grilo, TF, Lopes, C., Brito, P., Diniz, M., Caetano, M., ... & Raimundo, J. (2018). Cam yılan balıklarında (*Anguilla anguilla*) lantan maruziyeti altında birikim, eliminasyon ve nöro-oksidadif hasar. *Chemosfer*, 206, 414-423.
- Galdiero, E., Carotenuto, R., Siciliano, A., Libralato, G., Race, M., Lofrano, G., & Guida, M. (2019). Cerium and erbium effects on *Daphnia magna* generations: A multiple endpoints approach. *Environmental Pollution*, 254, 112985.
- Gobi, N., Vaseeharan, B., Rekha, R., Vijayakumar, S., & Faggio, C. (2018). Bioaccumulation, cytotoxicity and oxidative stress of the acute exposure selenium in *Oreochromis mossambicus*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 162, 147-159.
- Hanana, H., Turcotte, P., André, C., Gagnon, C., & Gagné, F. (2017). Comparative study of the effects of gadolinium chloride and gadolinium-based magnetic resonance imaging contrast agent on freshwater mussel, *Dreissena polymorpha*. *Chemosphere*, 181, 197-207.
- Hanana, H., Turcotte, P., Dubé, M., Gagnon, C., & Gagné, F. (2018). Response of the freshwater mussel, *Dreissena polymorpha* to sub-lethal concentrations of samarium and yttrium after chronic exposure. *Ecotoxicology and environmental safety*, 165, 662-670.
- Hanana, H., Taranu, Z. E., Turcotte, P., Gagnon, C., Kowalczyk, J., & Gagné, F. (2021a). Sublethal effects of terbium and praseodymium in juvenile rainbow trout. *Science of The Total Environment*, 777, 146042.
- Hanana, H., Taranu, ZE, Turcotte, P., Gagnon, C., Kowalczyk, J., & Gagné, F. (2021b). Nadir toprak elementleri disprosyum ve lutesyuma maruz kalan gökkuşağı alabalığında genel stres, detoksifikasyon yolları ve genotoksisitenin değerlendirilmesi. *Ekotoksikoloji ve Çevre Güvenliği*, 208, 111588.
- Hu, Z., Richter, H., Sparovek, G., & Schnug, E. (2004). Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: a review. *Journal of plant nutrition*, 27(1), 183-220.
- Lavado, R., Ureña, R., Martin-Skilton, R., Torreblanca, A., Del Ramo, J., Raldua, D., & Porte, C. (2006). The combined use of chemical and biochemical markers to assess water quality along the Ebro River. *Environmental Pollution*, 139(2), 330-339.
- Lebrun, J. D., Geffard, O., Urien, N., François, A., Uher, E., and Fechner, L. C. (2015). Seasonal variability and inter-species comparison of metal bioaccumulation in caged gammarids under urban diffuse contamination gradient: implications for biomonitoring investigations. *Science of the Total Environment*, 511, 501-508.
- Lompré, J. S., Moleiro, P., De Marchi, L., Soares, A. M., Pretti, C., Chielini, F., & Freitas, R. (2021). Bioaccumulation and ecotoxicological responses of clams exposed to terbium and carbon nanotubes: Comparison between native (*Ruditapes decussatus*) and invasive (*Ruditapes philippinarum*) species. *Science of The Total Environment*, 784, 146914.



- Migaszewski, Z. M., & Gałuszka, A. (2015). The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(5), 429-471.
- Pereira, L.V., Shimizu, M.H., Rodrigues, L.P., Leite, C.C., Andrade, L. & Seguro, A.C. (2012). N-acetylcysteine protects rats with chronic renal failure from gadolinium-chelate nephrotoxicity. *Plos One*, 7(7), e39528.
- Pinto, J., Costa, M., Leite, C., Borges, C., Coppola, F., Henriques, B., Monteiro, R., Russo, T., Cosmo, A., Soares, MVN., Polese, G., Pereira, E., & Freitas, R. (2019). Ecotoxicological effects of lanthanum in *Mytilus galloprovincialis*: Biochemical and histopathological impacts, *Aquatic Toxicology*, 211, 181-192.
- Ronci, L., Meccoli, L., Iannilli, V., Menegoni, P., De Matthaeis, E., & Setini, A. (2016). Comparison between active and passive biomonitoring strategies for the assessment of genotoxicity and metal bioaccumulation in *Echinogammarus veneris* (Crustacea: Amphipoda). *Italian Journal of Zoology*, 83(2), 162-172.
- Serdar, O., Yıldırım, N., Tatar, Ş., & Yildirim, N. C. (2021). Gadoliniumun Tatlı Su Omurgasız *Dreissena polymorpha* Üzerindeki Biyokimyasal Etkileri. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(2), 229-236.
- Sun, D., He, N., Chen, Q., & Duan, S. (2019). Effects of lanthanum on the photosystem II energy fluxes and antioxidant system of *Chlorella Vulgaris* and *Phaeodactylum Tricornutum*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2242.
- Sobjak, T.M., Romão, S., do Nascimento, C.Z., dos Santos, A.F.P., Vogel, L., & Guimarães, A.T.B. (2017). Assessment of the oxidative and neurotoxic effects of glyphosate pesticide on the larvae of *Rhamdia quelen* fish. *Chemospher*, 182, 267-275.
- Tyler, G. (2004). Rare earth elements in soil and plant systems-A review. *Plant and soil*, 267, 191-206.
- Tseng, M.T., Lu, X., Duan, X., Hardas, S.S., Sultana, R., Wu, P., Unrine, J.M., Graham, U., Butterfield, D.A., Grulke, E.A., & Yokel, R.A. (2012). Alteration of hepatic structure and oxidative stress induced by intravenous nanoceria. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 260, 173-182.
- URL-1: <https://evrimagaci.org/terbiyum-10139> (14.04.2023).
- Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental toxicology and pharmacology*, 13(2), 57-149.
- Wang, L., Wang, W., Zhou, Q., & Huang, X. (2014). Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. *Chemosphere*, 112, 355-361.
- Wang, L., Zhang, X., Wu, L., Liu, Q., Zhang, D., & Yin, J. (2018). Expression of selenoprotein genes in muscle is crucial for the growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets supplemented with selenium yeast. *Aquaculture*, 492, 82-90.
- Zhao, H., Hong, J., Yu, X., Zhao, X., Sheng, L., Ze, Y., Sang, X., Gui, S., Sun, Q., Wang, L., & Hong, F. (2013). Oxidative stress in the kidney injury of mice following exposure to lanthanides trichloride. *Chemosphere*, 93, 875-884.
-

**Ek 1.** “Terbiyumun *Pontastacus leptodactylus*’daki Oksidatif Stres ve Antioksidan Yanıtlarının Belirlenmesi” çalışmasının istatistiksel verileri

		ANOVA				
		Kareler toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
TBARS	Gruplar arasında	4286,270	7	612,324	31,250	0,000
	Gruplar içinde	313,506	16	19,594		
	Toplam	4599,776	23			
GSH	Gruplar arasında	3285,410	7	469,344	1,359	0,287
	Gruplar içinde	5524,730	16	345,296		
	Toplam	8810,140	23			
CAT	Gruplar arasında	16785,187	7	2397,884	3,914	0,011
	Gruplar içinde	9803,450	16	612,716		
	Toplam	26588,636	23			
GPx	Gruplar arasında	36808,681	7	5258,383	1,386	0,277
	Gruplar içinde	60718,195	16	3794,887		
	Toplam	97526,876	23			
SOD	Gruplar arasında	0,167	7	0,024	0,635	0,721
	Gruplar içinde	0,599	16	0,037		
	Toplam	0,766	23			