



**Doğanay Yüksel, Elif Çelik, Özlem Turgay**

Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş-Turkey  
dyuksel@ksu.edu.tr; elifcelik@ksu.edu.tr; ozlem@ksu.edu.tr

DOI	<a href="http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2021.16.1.5A0144">http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2021.16.1.5A0144</a>		
ORCID ID	0000-0002-1926-5573	0000-0002-8280-8809	0000-0003-2286-833X
CORRESPONDING AUTHOR	Doğanay Yüksel		

**SİYANOBAKTERİ KAYNAKLI TOKSİN TEHLİKESİ**

**ÖZ**

Siyanobakteri kaynaklı toksin tehlikesi incelenmiştir. Siyanobakteriler Dünya atmosferinin oluşumuna ve azot fiksasyonuna önemli katkıda bulunan canlılar olmakla beraber insan ve hayvanlar için zehirli çeşitli sekonder metabolitler üretebilmektedirler. Yaklaşık 2.5 milyar yıl önce fotosentez yapma yeteneği kazandığı düşünülen siyanobakteriler dünya atmosferinin oksik duruma geçmesinde rol alan en ilkel fotosentetik canlılardır. Alg ve bakteri arası prokaryotik bir form olan siyanobakteriler dünya üzerinde çok çeşitli ve geniş habitatlara yayılmışlardır. Son yıllarda dünya genelindeki su kaynaklarında ortaya çıkan kirlilik sucul ekosistemlerde siyanobakterilerin aşırı üremelerine öncülük etmektedir. Siyanobakterilerin besin girdisinin yüksek olduğu sucul alanlarda aşırı çoğalmaları olgusu "alg patlaması (bloom)" olarak tanımlanmaktadır. Toksik türlerin de dahil olduğu alg patlamaları su kaynaklarının insan faaliyetleri için kullanımını sınırlandırmakta ve içme suyu güvenliğini tehdit etmektedir. Bu derlemede alg patlamaları ile neticelenen süreçteki mekanizmalar ve özellikleri, bazı siyanobakteriler tarafından üretilen siyanotoksinler ve etkileri, zararlı alg patlamalarını tetikleyebilen çevresel dinamikler ve alg patlamalarının henüz gerçekleşmeden önlenmesi veya devam eden alg patlamalarının kontrol altına alınması için uygulanabilecek olası tedbirler tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Siyanobakteri, Alg patlaması, Siyanotoksin, Ötrofikasyon, Sucul Ekosistem

**CYANOBACTERIA INDUCED TOXIN HAZARD**

**ABSTRACT**

The danger of toxins from cyanobacteria has been studied. *Cyanobacteria* are ubiquitous microorganisms considered as important contributors to the formation of Earth's early atmosphere and nitrogen fixation although they may produce a diverse array of toxic secondary metabolites. *Cyanobacteria*, Earth's oldest known oxygenic photoautotrophs, were involved in the transition of the Earth's atmosphere to an oxic state around 2.5 billion years ago. *Cyanobacteria*, a prokaryotic form between algae and bacteria, inhabit a wide range of aquatic and terrestrial environments around the World. Over-enrichment (eutrophication) of water sources by nutrients, has led *Cyanobacteria* to form overpopulated areas in many aquatic ecosystems. The phenomenon of excessive cyanobacterial proliferation in eutrophicated aquatic ecosystems has been defined as "cyanobacterial bloom". Excessive cyanobacterial proliferation including toxin producer strains limits the use of water resources for human activities and threatens the safety of drinking water. This review presents the mechanism and the traits underlying cyanobacterial blooms, the cyanotoxins produced by *Cyanobacteria*, the potential environmental drivers of bloom development and, possible measures to prevent and control harmful cyanobacterial proliferation.

**Keywords:** *Cyanobacteria*, Bloom, Cyanotoxin, Eutrophication, Aquatic Ecosystem

**How to Cite:**

Yüksel, D., Çelik, E. ve Turgay, Ö., (2021). Siyanobakteri Kaynaklı Toksin Tehlikesi, Ecological Life Sciences (NWSAELS), 16(1):1-17, DOI: 10.12739/NWSA.2021.16.1.5A0144.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Siyanobakteriler dünya üzerinde geniş bir alanda canlılıklarını sürdüren en ilkel fotosentetik organizmalardır. Fototrofik siyanobakterilerin dünya atmosferinin anoksik durumdan oksik duruma geçişinden sorumlu oldukları düşünülmektedir. Siyanobakteriler taksonomik olarak Prokaryota alemi içinde yer alan Gram negatif hücre duvarına sahip büyük kısmı aerobik fotoototrof organizmalardır [24]. Tek hücreli veya çok hücreli koloniler oluşturabildikleri gibi iplikli yapıda da bulunabilirler [29]. Siyanobakterilerin sucul alanlarda birkaç gün veya haftada önemli düzeyde hücre yoğunluğuna ulaşarak kümelenmeleri "bloom" (alg patlaması) olarak tanımlanmaktadır [34]. Siyanobakterilerin aşırı çoğalması anlamını taşıyan bu tür biyolojik faaliyetler genellikle besin girdisinin yüksek olduğu, ılıman bölgelerde yer alan, ışığın yeterince penetre olabildiği durgun sularda gerçekleşmektedir [39]. Alg patlamaları; ekosistem ve insan sağlığı üzerinde tahrip edici etkileri olan, sucul ekosistemin biyoçeşitliliğini azaltan, tarımsal faaliyetler de dahil olmak üzere suyun insan faaliyetleri için kullanımını sınırlandıran ve içme suyu güvenliğini tehdit eden olaylardır. Küresel ısınmanın artan etkisiyle beraber son yıllarda daha sık gerçekleşen alg patlamalarının sudaki çözülmüş oksijen miktarını azaltarak sucul ekosistemin sağlığına ve stabilitesine önemli hasarlar verebildiği ifade edilmektedir [21, 47 ve 54]. Bu nedenle alg patlamalarının daha ortaya çıkmadan önlenmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Günümüzde bu amaçla kullanılan metotlar yetersiz kaldığı için alg patlamalarının risklerini ve sonuçlarını öngörmek mümkün olmamaktadır [60]. Sanayi ve tarım uygulamalarının yaygınlaşmasına bağlı olarak nehirlerde ve göllerde gözlenen besin girdisi artışının siyanobakterilerin aşırı çoğalması için elverişli şartlar sağladığı belirtilmektedir [18]. Sucul ekosistemlerde gerçekleşen ötrofikasyona bağlı olarak siyanobakterilerin aşırı çoğalmaları ise içme suyu güvenliğini tehlikeye atarak insan ve hayvan sağlığını tehdit edecek düzeyde risk oluşturabilmektedir [9, 36 ve 51]. Söz konusu sağlık risklerini ortaya çıkaran temel faktör, çeşitli nedenlerle (kimyasal müdahale, biyokütlenin aşırı artışı, türbidite vb.) gerçekleşen hücre ölümleri sonrasında siyanotoksinlerin serbest kalarak içme sularına karışmasıdır [14]. Siyanobakteriler anatoksin, saksitoksin gibi nörotoksik bileşikler, silindrospermopsin gibi hepatotoksik özellik gösteren düşük molekül ağırlıklı toksinler ve toksik etkili ribozomal olmayan oligopeptitler ve siyanopeptitler üretebilmektedir. Bu metabolitler arasında siyanopeptitler sınıfı içinde yer alan mikrosistinler üzerinde en yaygın çalışılan toksin olmuştur [25, 40 ve 58]. Brezilya'da 1996 yılında 52 diyaliz hastasının mikrosistin toksini sebebiyle hayatını kaybetmesi dikkatleri bu toksin üzerine çekmiştir [27]. Bununla beraber dünya genelinde siyanotoksin kaynaklı zehirlenmelerin rekreasyon alanlarındaki kontamine yüzey sularının doğrudan solunması veya yutulması şeklinde de gelişebildiği belirtilmektedir. Alg patlamaları sonucunda biyokütlenin kümelenmediği yüzey sularında mikrosistin konsantrasyonunun mikromolar düzeylerine çıkabildiği belirtilmektedir [9]. Bu bağlamda halk ve çevre sağlığını doğrudan ilgilendiren suların siyanotoksinlerden arındırılması, alg patlamalarının önceden tahmin edilerek ortaya çıkmadan önlenmesi ve en temelde siyanobakterilerin bu kompleks molekülleri neden sentezlediği sorusunun cevabı ilgi gören aktif bir çalışma alanıdır [25].

- **Siyanotoksinler:** Alg patlamasına yol açan siyanobakterilerin sekonder metabolitlerinden bazıları bitkiler, omurgasızlar ve insan dahil omurgalılar üzerinde doğal bulunma konsantrasyonlarında toksik etki gösterebilir [7 ve 9]. Siyanobakterilerin söz konusu metabolitleri neden ürettikleri

henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Toksik etkileri dışında mikrosistinlerin siyanobakteriler açısından tamamen farklı fizyolojik veya çevresel fonksiyonlarının olabileceği düşünülmektedir [61]. Bugüne kadar tanımlanmış olan siyanotoksinler, üretici türleri ve toksinlerin etkileri ile Tablo 1'de sunulmuştur. Siyanotoksinler etkileri bakımından nörotoksinler (anatoksin-a, anatoksin-a (s) ve saksitoksin), hepatotoksinler (mikrosistin, nodularin ve silindrospermopsin) ve dermatotoksinler olmak üzere üç grup altında incelenebilir [14].

Tablo 1. Siyanotoksinlerin üretici mikroorganizmaları ve etkileri  
(Table 1. Producing microorganisms of cyanotoxins and their effects)

Toksin	Mikroorganizma	Etki Mekanizması	Toksik Etki	Ref.
Mikrosistin	Microcystis, Anabaena, Dolichospermum, Leptolyngbya, Nostoc, Phormidium, Planktothrix ve Synechococcus	Ökaryotik Protein Fosfatazların İnhibisyonu	Karaciğer ve Böbrek Hasarı, Gastroenterit, Tümör Oluşturma, DNA'nın Tamir ve Transkripsiyon Kabiliyetinin Azalması	7, 8, 9, 14, 21, 29, 34, 40, 48
Nodularin	Nodularia	Ökaryotik Protein Fosfatazların İnhibisyonu	Mikrosistinler Benzer Olmakla Beraber Ek Olarak Zayıf Karsinojenik Etki	7, 14, 21, 29, 34, 40, 48
Silindrospermopsin	Cylindrospermopsis, Anabaena, Aphanizomenon, Chrysochloris ve Raphidiopsis	Protein Sentezinin İnhibisyonu, DNA Hasarı ve Hücre Ölümü	DNA Üzerinde Toksik Etki, Gastroenterit, Organ Hasarı	11, 14, 21, 22, 29, 34, 40, 48
Anatoksin-a	Anabaena, Aphanizomenon, Cuspidothrix, Dolichospermum, Oscillatoria ve Phormidium	Asetilkolini Taklit Ederek Nikotinik Asetilkolin Reseptörlerine Bağlanma	Koordinasyon Kaybı, Kas Titremesi, Solunum Yetmezliği	7, 14, 21, 29, 34, 48
Anatoksina[s]	Dolichospermum ve Anabaena	Asetilkolin Esterazın İnhibisyonu	Aşırı Tükürük Salgısı, İnkontinans, Kas Titremesi, Solunum Yetmezliği	14, 21, 29, 34, 48, 63
Saksitoksin	Aphanizomenon, Cuspidothrix, Cylindrospermopsis ve Dolichospermum	Sodyum Kanallarının Blokajı Edilerek Sinir Hücrelerindeki Sodyum Dengesinin Bozulması	Uyuşma Felç, Solunum Yetmezliği	14, 21, 29, 34, 40, 48, 58
Aplysiatoksin	Lyngbya, Schizothrix, Planktothrix (Oscillatoria)	Dermatotoksik Etki	Dermatitis, Diare	29, 34, 48
Lyngbyatoksin	Lyngbya	Dermatotoksik Etki	Dermatitis, Diare	29, 34, 48

- **Mikrosistinler (MC) ve Nodularinler (NOD):** Mikrosistinler bazı nadir aminoasitleri yapısında bulunduran ve 7 amino asitten oluşan siklik heptapeptitlerdir (Şekil 1). Mikrosistin toksik etkisi, yapısında bulunan nadir Adda amino asitinin içerdiği konjuge dien bağlarıyla ilişkilendirilmektedir [34]. Günümüze kadar amino asit kompozisyonları farklılık gösteren en az 246 mikrosistin varyantının toksisitesi bildirilmiştir [8]. Bunların içinde mikrosistin-LR (L:lösin, R:arginin) varyantının en toksik türev olduğu belirtilmektedir [9]. *Microcystis*, *Planktothrix*, *Oscillatoria* ve *Dolichospermum* cinslerinin birçok türü tarafından mikrosistin üretilmesi nedeniyle, mikrosistin biyosentez yollarının erken evrimsel bir uyum olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir [41]. Özellikle karaciğer dokusunda

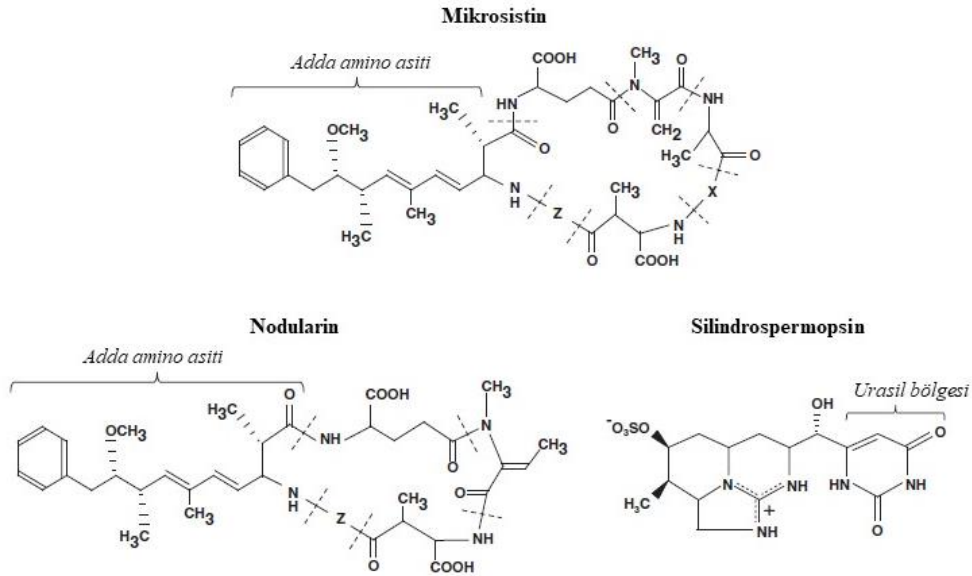


toksik izler bırakan mikrosistinin akciğer, üreme sistemi ve sinir sistemi üzerinde de olumsuz etkileri olduğu bildirilmiştir [8]. Mikrosistinlerin organizmaya alınımından sonra hızla karaciğerde biriktiği ve buradaki protein fosfatazlarla bağlanarak inhibisyona neden olduğu belirtilmektedir [40]. İnhibisyon derecesi, organizmaya alınan mikrosistin miktarına ve organizmanın ağırlığına bağlı olarak hücre ölümlerine, ciddi kanamaya ve nihayetinde ölüme yol açabilmektedir [34]. Genellikle referans olarak kullanılan MC-LR varyantının periton içi enjeksiyonu sonrası LD<sub>50</sub> dozu farelerde 25 ile 150 µg kg<sup>-1</sup> olarak bildirilmiştir [14]. Bununla beraber fareler üzerinde 13 hafta boyunca sürdürülen MC-LR oral maruziyet denemelerinden elde edilen günlük 40 µg kg<sup>-1</sup> NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) temel alınarak içme suyunda bulunabilecek maksimum MC-LR miktarı 1 µg L<sup>-1</sup> olarak tavsiye edilmiştir [57]. Mikrosistinler geçmişte kuş, balık, koyun, köpek, sığır gibi memelilerin ölümünden sorumlu tutulmuştur [7]. Bu toksinin insanlar üzerindeki etkisi genellikle gastroenterik enfeksiyonlar ile sınırlı kalmıştır. Ancak Brezilya'da 1996 yılında mikrosistinler ile kontamine suyun hemodiyaliz ünitesinde kullanımına bağlı olarak 50'den fazla diyaliz hastası hayatını kaybetmiştir [9 ve 27]. Nodularinler mikrosistinler ile yapısal benzerlik gösteren siklik pentapeptitlerdir (Şekil 1). Nodularinler acı sularda canlılık gösteren *Nodularia spumigena* türü tarafından üretilmektedir. Her iki toksinin de karaciğerde hepatotoksik etki göstererek protein fosfataz 1 ve 2A enzimlerini inhibe ettiği ifade edilmektedir [8 ve 14]. Suda kararlı şekilde çözünebilir nodularinlerin 10 yapısal varyantının bulunduğu belirtilmektedir [40]. Bunların içinde en bilineni, değişken amino asiti arginin olan NOD-R (R: arginin) varyantıdır. Değişken amino asite bağlı olarak nodularinlerin periton içi enjeksiyon sonrası LD<sub>50</sub> dozu farelerde 30 ile 70 µg kg<sup>-1</sup> aralığında bulunmuştur [14]. İnsanlarda nodularine bağlı toksik etki daha önce rapor edilmemiştir. Yeterli toksikolojik verinin bulunmamasından dolayı nodularinlerin içme suyunda bulunabileceği konsantrasyonlar ile ilgili bir düzenleme bildirilmemiştir.

- **Silindrospermopsin:** Silindrospermopsin *Cylindrospermopsis raciborskii* ve diğer bazı siyanobakteriler (*Aphanizomenon ovalisporum*, *Raphidiopsis curvata*, *Umezakia natans*) tarafından üretilen trisiklik yapıya sahip bir guanin-alkaloiddir [40]. Molekülün toksik etkisi yapısındaki urasil bölgesi ile ilişkilendirilmektedir (Şekil 1). Silindrospermopsinlerin sudaki çözünürlüğünün oldukça iyi olduğu ve yarılanma süresinin yüksek saflıktaki suda 10 güne kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Silindrospermopsinin urasil bölgesine yakın OH<sup>-</sup> grubuna göre bilinen 3 varyantı bulunmaktadır ve bunların içinden OH<sup>-</sup> grubuna sahip olmayan 7-deoxycylindrospermopsin varyantının toksik etki göstermediği bildirilmektedir [11]. Silindrospermopsinlerin mikrosistinlerle benzer şekilde protein sentezini engelleyerek karaciğerde hepatotoksik etki gösterdiği, böbrek ve bağırsaklarda tahribata yol açtığı ifade edilmektedir [9 ve 14]. Periton içi enjeksiyondan 24 saat sonra LD<sub>50</sub> dozunun farelerde 2100 µg kg<sup>-1</sup> olduğu bildirilmektedir [34]. Fareler üzerinde 11 hafta sürdürülen oral maruziyet deneylerinden elde edilen günlük 30 µg kg<sup>-1</sup> NOAEL sonucuna göre içme suyunda bulunabilecek maksimum silindrospermopsin miktarı 1 µg L<sup>-1</sup> olarak tavsiye edilmiştir [22].

*Cylindrospermopsis raciborskii*, 1979 yılında Avustralya'nın Palm adasında 10 yetişkin ve 100'den fazla çocuk üzerinde su kaynaklı hepatit benzeri bir hastalığa yol açmasından sonra zararlı bir tür olarak tanımlanmıştır [20]. Geçmişte tropikal ve subtropikal bir tür olduğu düşünülen *C. raciborskii*'nin son yıllarda yaşam alanını ılımlı enlemlere (Almanya, Fransa) kadar genişlettiği bildirilmiştir [4].

### Siyanobakteriyal Hepatotoksinler

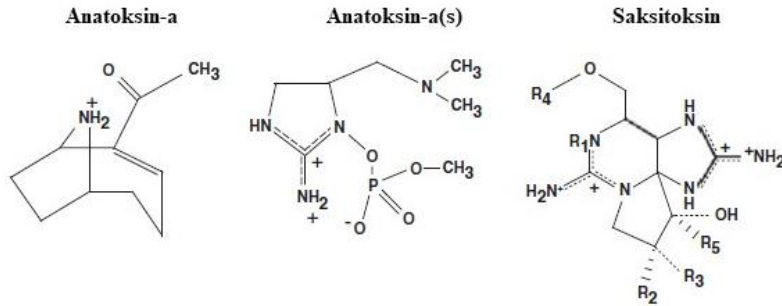


Şekil 1. Siyanobakteriler tarafından sentezlenen hepatotoksinler [34]  
(Figure 1. Hepatotoxins synthesized by cyanobacteria)

- **Anatoksin, saksitoksin:** *Anabaena* ve *Oscillatoria* türleri tarafından sentezlenen anatoksin kuşlarda ve memeli canlılarda hızlı nörotoksik etki gösteren alkaloid yapısında (Şekil 2) bir toksindir [40 ve 58]. Anatoksinin Anatoksin-a, homoanatoksin-a ve anatoksin-a (s) olmak üzere üç türevi bulunmaktadır. Anatoksinler  $\text{Na}^+$  kanallarını açık tutarak sinir sistemini olumsuz yönde etkilemektedir ve buna bağlı olarak kas demetlerinde kasılmalara yol açmaktadır. Anatoksin-a varyantının periton için enjeksiyonundan 24 saat sonra  $\text{LD}_{50}$  dozunun farelerde  $375 \mu\text{g kg}^{-1}$  olduğu bildirilmiştir [14]. Anatoksin-a geçmişte kusma, kasılma ve solunum durması ile sonuçlanan çeşitli hayvan zehirlenmelerinden sorumlu tutulmuş ancak günümüze dek insanların etkilendiği bir vaka bildirilmemiştir [30 ve 59]. Anatoksin-a (s) toksini ile ilgili çok az bilimsel çalışma bulunmasına rağmen bu toksinin periton içi enjeksiyonu sonrası  $\text{LD}_{50}$  dozu farelerde 20 ile  $31 \mu\text{g kg}^{-1}$  aralığında bildirilmiştir [34]. Yapısal olarak diğer anatoksinlerden ayrılan anatoksin-a (s) türevinin bilinen tek doğal organofosfat kolinesteraz inhibitörü olarak tükürük bezinin aşırı salgılanmasına yol açtığı belirtilmektedir. İçme suyunda bulunabilecek anatoksin-a ve anatoksin-a (s) miktarlarıyla ilgili herhangi bir resmi düzenleme bulunmamaktadır. Bir diğer alkaloid yapıli siyanotoksin olan saksitoksin (Şekil 2) özellikle tatlı su habitatlarında bulunan *Anabaena circinalis* ve *Oscillatoria* cinsine bağlı türler tarafından sentezlenmektedir [29]. A.

*circinalis* ve *Aphanizomenon flos-aquae* bu toksinle daha çok ilişkilendirilse de *Lyngbya wollei* ve *Cylindrospermopsis raciborskii*'nin de saksitoksin biyosentezini gerçekleştirebildiği bildirilmektedir. Saksitoksinler boyutları 241 ile 491 da arasında değişen trisiklik yapılı, suda iyi çözünebilir, yapısında 1 veya 2 adet sülfat grubu bulunabilen moleküllerdir. Tatlı suda 90 güne kadar stabilitesini koruduğu belirtilmektedir [34]. Bununla beraber yüksek sıcaklığa bağlı olarak moleküler yapısında ortaya çıkan değişiklik sonucunda saksitoksinlerin daha toksik moleküllere dönüşebileceği düşünülmektedir [48]. Doğal toksinler arasında en etkililerinden birisi olan saksitoksinlerin, sinir sistemindeki Na<sup>+</sup> kanallarını bloke ederek sinyal iletimini engelledikleri bilinmektedir [58]. En az 57 yapısal varyantı saptanan saksitoksinlerin tatlı su midyelerine aktarılabildiği ve *Alexverium spp.* gibi alglerle beslenen deniz midyelerinde birikim gösterdiği bildirilmiştir [14, 29]. Saksitoksinlerin birikim gösterdiği tatlı su ve deniz midyelerinin tüketimi, paralitik deniz kabukluları zehirlenmesine yol açan tetradoksin benzeri etkiler ortaya çıkarabilmektedir [9]. Saksitoksinin periton içi enjeksiyonu sonrası fareler üzerindeki LD<sub>50</sub> dozunun 10 µg kg<sup>-1</sup> olduğu saptanmıştır [14]. Saksitoksinlerin içme suyunda bulunabileceği miktarlar ile ilgili resmi bir düzenleme bulunmamaktadır.

#### Siyanobakteriyal Nörotoksinler



Şekil 2. Siyanobakteriler tarafından sentezlenen nörotoksinler [34]  
(Figure 2. Neurotoxins synthesized by cyanobacteria)

- **Aplysiatoksin ve Lyngbyatoksin:** *Lyngbya majuscula* tarafından üretilen aplysiatoksin ve lyngbyatoksin ciltte iltihaplı yaraların oluşmasına yol açan dermatotoksik alkaloidler olarak tanımlanmaktadır [29 ve 34]. Günümüze kadar her iki toksine yalnızca *Lyngbya majuscula*'nın canlılığını sürdürdüğü denizlerde rastlanmıştır. Bu toksinlere maruz kalan kişilerde dermatitis ve gastrointestinal enflamasyona bağlı olarak diare gözleendiği bildirilmiştir [37]. Bunlara ek olarak siyanobakterilerin yapısal elemanları olan lipopolisakkaritlerin de deri ile temas etmesi durumunda tahrişe, kabarcıklara yol açabildiği belirtilmektedir [12].

#### 2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Göl, nehir ve içme suyu göletleri gibi sucul alanlarda, biyolojik kirliliğin artışına paralel olarak gözlenen ötrofikasyon, siyanobakteri popülasyonunda artışa neden olmaktadır. Yüzey sularında meydana gelen ötrofikasyonla birlikte alglerin aşırı çoğalması akarsularda ve göllerde su kalitesinin bozulmasına, suların içme suyu veya sulama suyu olarak kullanım olanaklarının sınırlandırılmasına neden olmaktadır. Toksin üreten türlerin eşlik ettiği vakalarda insan ve

sucul ekosistem canlıları açısından önemli sağlık riskleri oluşmaktadır. Bu nedenle siyanobakteri popülasyonlarının düzenli bir şekilde takip edilmesi ve sucul alanlarda toksin seviyesinin kontrolü önemlidir. Siyanotoksinlerin kontrolüne ilişkin alınması gereken önlemlerin başında yüksek riskli bölgelerde durum analizleri ve izleme programları oluşturularak, kontrollerin devamlı olarak yapılması, suların detoksifikasyonu için uygun arıtma metotlarının uygulanması ve en önemlisi insanların konu ile ilgili bilgilendirilerek, farkındalılık oluşturulması gelmektedir. Su kaynaklarında siyanobakteri kontrolü için en etkili yöntem, aşırı çoğalmalar ve buna bağlı oluşan toksin artışı öncesinde su kütlesinin kontrolü ile alg patlamasının engellenmesi olmalıdır. Bu kapsamda disiplinlerarası çalışılarak konu ile ilgili araştırmaların artırılması gerekmektedir. Bu derleme makalede, siyanobakteri kaynaklı toksinler, bu toksinlerin etki mekanizmaları ve sağlık üzerindeki etkileri, siyanotoksin içeren suların arıtılması ve içme sularında siyanotoksinlere ilişkin yapılması önerilen düzenlemeler konusunda derlenen bilgiler verilmektedir. Son yıllarda Türkiye 'de de meydana gelen alg patlaması hadiselerine dikkat çekmek ve bu konuda farkındalılık oluşmasını sağlamak amaçlanmaktadır.

### **3. TÜRKİYE'DE SİYANOTOKSİN ÇALIŞMALARI (STUDIES CONDUCTED IN TURKEY)**

Ülkemizde içme suyu kaynağı olarak kullanılan baraj göllerindeki siyanobakterilerin aşırı çoğalması ve siyanotoksin miktarı hakkındaki çalışmalar sınırlıdır. Kovada Gölünde gerçekleştirilen bir çalışmada [19] siyanobakteri kümelerinde tür kompozisyonu ve suda çözünen mikrosistin varyantlarının (MC-LR, -RR, -LA, -LW, -LF) konsantrasyonları araştırılmıştır. Buna göre toplam suda çözünür mikrosistin konsantrasyonu MC-LR cinsinden 0.73 ve 48.5 µg ml<sup>-1</sup> aralığında bulunmuştur. Gölden alınan numunelerde *Microcystis aeruginosa*, *Synechococcus* sp., *Phormidium limosum*, *Phormidium formosa* ve *Planktothrix limnetica* türlerinin saptandığı bildirilmiştir. Bir başka çalışma [2] siyanobakterilerin daha önce aşırı çoğaldığı ve balık ölümlerinin de görüldüğü Küçükçekmece Lagününde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kümelenme görülen bölgelerde *Microcystis aeruginosa*'nın baskın tür olduğu bildirilmiştir. Örneklem zamanı ve lokasyonuna bağlı olarak mikrosistin konsantrasyonunun MC-LR cinsinden 0.06 ve 24.2 µg L<sup>-1</sup> değerleri arasında değiştiği saptanmıştır. Sapanca, İznik ve Taşkısı Göllerinde gerçekleştirilen başka bir çalışmada [1] ise göllerin farklı derinliklerinden elde edilen numunelerin mikrosistin konsantrasyonu araştırılmıştır. Sapanca Gölü'nün 20 metre derinliğinden alınan örneklerde MC-LR cinsinden 3.65 µg L<sup>-1</sup>, Taşkısı Gölü'nün yüzeyinden alınan örneklerde MC-LR cinsinden 2.43 µg L<sup>-1</sup> mikrosistin saptanmıştır. Öte yandan İznik gölünde 5 metre aralıklarla yüzeyden 20 metre derinliğe kadar yapılan örneklemelerde mikrosistin saptanmamıştır. Yukarıda sıralanan çalışmaların tümünde örneklem derinliği ve bölgesine bağlı olarak mikrosistin konsantrasyonun değişkenlik gösterdiği ve içme suyu için Dünya Sağlık Örgütü tarafından deklare edilen 1 µg L<sup>-1</sup> MC-LR değerinin üzerinde sonuçlar elde edildiği görülmektedir [57].

### **4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)**

#### **4.1. Alg Patlamalarında Etkili Olan Çevresel Faktörler (Environmental Drivers That Effects Cyanobacterial Blooms)**

Alg patlamaları sucul ekosistemdeki besin bulunabilirliği, su sıcaklığı, ışık yoğunluğu, su kütlesinin yatay ve dikey hareketi, tuz konsantrasyonu ve su kütlesinin durgunluğu gibi birçok çevresel faktöre bağlı olarak gelişmektedir. Siyanobakterilerin ve alglerin

canlılıklarını sürdürmek ve çoğalmak için ihtiyaç duydukları besinlerin (öncelikli olarak karbon, azot ve fosfor) sudaki konsantrasyonları, alg patlamalarını tetikleyen faktörler arasında en kritik konumdadır. Alg patlamaları ile ilişkilendirilen çevresel faktörler aşağıda detaylandırılarak anlatılmıştır.

- **Ötrofikasyon:** Giderek yoğunlaşan tarım uygulamaları gibi insan aktivitesi kaynaklı faaliyetlerin, sucul ekosistemlere başta fosfat ve nitrojen olmak üzere besin girdisini artırdığı bilinmektedir. Göller ve nehirlerde ortaya çıkan ötrofikasyon, alg patlamalarına öncülük eden ve 1960'lerden itibaren dikkat çekmeye başlayan global bir çevre sorunudur [21]. Bu yıllardan itibaren siyanobakterilerin aşırı çoğalmasını engelleyerek su kalitesini iyileştirmek amacıyla, su kaynaklarına besin girdisinin azaltılması yönünde çeşitli önlemler alınmıştır [36]. Alınan önlemlerin fosfor girdisinin azaltılmasında başarılı olsa da nitrojen girdisi için aynı oranda başarılı olmadığı bildirilmiştir. Bu nedenle nitrojen:fosfat oranının giderek artarak *Microcystis* spp. ve *Planktothrix* spp. gibi nitrojen kullanan siyanobakterilerin yoğunluğunu artırabileceği, daha da ötesinde nitrojen bakımından zengin olan mikrosistin üretiminin artabileceği ileri sürülmektedir [18 ve 35].
- **Karbondioksit Konsantrasyonu:** Siyanobakterilerin yoğun olarak kümelenildiği alanlarda su yüzeyindeki fotosentetik aktiviteye bağlı olarak suda çözülmüş karbondioksit azalır [23]. Ancak siyanobakterilerin birkaç çeşit protein ve enzimden meydana gelen polihedral yapıdaki karboksizomları sayesinde karbon fiksasyonunu belirli bir süre daha sürdürerek bu duruma uyum sağladıkları bildirilmektedir. Bununla beraber farklı karbon kaynaklarından (bikarbonat) faydalanabilen siyanobakteriler karbon dioksiti fikse edemediği şartlarda da fotosentetik aktivitesini sürdürebilmektedir [42]. Ayrıca bazı matematik modellemeler ve laboratuvar çalışmaları, artan atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun ötrofik ve hipertropik sularda alg patlamalarını artıracaklarını öngörmektedir [26]. Geçmişte siyanobakterilerin, karbondioksit konsantrasyonunun düşük ve pH'nın yüksek olduğu şartlarda avantajlı tür olduğu düşünülürken, yeşil algler gibi ökaryotik fitoplanktonların karbon dioksit konsantrasyonunun yüksek olduğu şartlarda daha iyi geliştiği görüşü hakimdi. Ancak son yıllarda siyanobakterilerin çok çeşitli inorganik karbon fiksasyon sistemlerini bir arada kullanabildiği ifade edilmektedir [51 ve 54]. Bu anlamda bazı yüksek afiniteli, düşük akışlı bikarbonat alım sistemine sahip *Microcystis* türlerinin karbon dioksit konsantrasyonunun düşük olduğu şartlarda daha iyi gelişim gösterirken, tam tersi şekilde düşük afiniteli, yüksek akışlı bikarbonat alım sistemine sahip bazı *Microcystis* türlerinin yüksek çözülmüş inorganik karbon konsantrasyonuna daha iyi adapte olabildiği ve bu şartlarda cinsin diğer türlerine ve ökaryotik fitoplanktonlara karşı daha avantajlı olduğu ifade edilmektedir [62]. Değişen karbondioksit konsantrasyonu şartlarına karşı sergiledikleri hızlı adaptasyon siyanobakterilerin genetik çeşitliliğini ve fizyolojik esnekliklerini ortaya koymaktadır.
- **Küresel Isınma:** Dünya genelinde artan sıcaklıkların alg patlamalarını birkaç farklı şekilde tetikleyebildiği düşünülmektedir [38]. Alg patlamalarında rol alan siyanobakterilerin önemli bir kısmının, maksimum büyüme eğrilerine 25°C üstündeki sıcaklıklarda ulaştığı bilinmektedir.





Buna ek olarak sıcaklık artışının siyanobakteriler üzerindeki pozitif etkisinin ökaryotik fitoplanktonlar üzerindeki olumlu etkisinden fazla olduğu bildirilmiştir [36]. Sıcaklığın bir diğer etkisinin ise su yüzeyinin ısınarak su katmanları arasındaki tabakalaşmanın daha stabil hale gelmesi ve suyun derinliğine bağlı olarak dikey su hareketlerinin azalması olduğu ifade edilmektedir. Tabakalaşmanın olduğu suların, su yüzeyinde asılı kalamayan fitoplanktonlara kıyasla, gaz keselerine sahip siyanobakterilerin yüzeye doğru çıkarak daha fazla ışığa ulaşmalarını sağlayan ideal şartları sunduğu belirtilmiştir [13 ve 28]. Küresel ısınmanın bir etkisi olarak önümüzdeki yıllarda ılıman ve sıcak enlemlerdeki göllerde kış boyunca buz tabakasının daha kısa süreli oluşacağı tahmin edilmektedir. Su katmanları arasındaki tabakalaşmanın buna bağlı olarak ilkbahar aylarının daha erken zamanlarında başlayacağı, yazların daha ılıman geçeceği ve sonbahar aylarında tabakalaşma süresinin uzayacağı öngörülmektedir. Tüm bu tahminler bir araya geldiğinde alg patlamalarının daha geniş bir enlem aralığında, daha sık periyotlarla gerçekleşebileceği ileri sürülmektedir [36 ve 52]. Sığ ve ötrofik göllerde besin bulunabilirliği ve sıcaklık değişkenlerinin siyanobakterilerin gelişmesi ve kümelenmesi üzerinde sinerjik etki gösterdiği belirtilmektedir. Bu nedenle önümüzdeki yıllarda sıcaklığın daha da artacağı bölgeler göz önüne alındığında, alg patlamalarının kontrol altında tutulması için besin girdilerinin daha da azaltılması gerekliliği ortaya çıkacaktır. Derin mezotropik ve oligotropik göllerde ise dipten yüzeye besin akışını engelleyebilen güçlü bir tabakalaşma nedeniyle siyanobakterilerin aşırı üremelerinin baskılandığı ifade edilmektedir [3 ve 47]. İklim değişikliğinin diğer öngörülen etkilerinden olan tropik hortumlar, fırtınalar, yaz sahanakları ve kuraklık olaylarının gelecekte daha sık yaşanacağı ileri sürülmektedir [38]. Güçlü fırtına ve yağmurların besin yoğunluğunu azaltarak kısa vadede siyanobakteri kümelenmelerini dağıtabileceği öngörülmektedir. Öte yandan yaz aylarında gerçekleşen aşırı yağışları uzun süreli kuraklığın takip etmesi durumunda besin açısından zenginleşen durgun suların, siyanobakteri kümelenmeleri için elverişli şartlar oluşturabileceği ifade edilmektedir [31].

#### **4.2. Alg Patlamalarının Önlenmesi (Prevention of Cyanobacterial Bloom Occurrence)**

Alg patlamalarının kontrolü ve önlenmesi için besin girdisinin azaltılarak kontrol altına alınması, kimyasal ve biyolojik mücadele, hidrodinamik yaklaşımlar gibi çeşitli stratejiler öne sürülmektedir. Bu stratejilerin, siyanobakterilerin aşırı çoğalmasını teşvik eden ana faktörler (besin girdisi, ışık yoğunluğu, su sıcaklığı) ve bunların arasında sınırlayıcı veya manipülasyonu kolay olan değişkenler dikkate alınarak oluşturulması gerekmektedir. Öte yandan geçmişte benzer önlemlerin tüm sucul alanlarda aynı oranda başarı göstermediği ifade edilmektedir. Bu nedenle alınacak önlemlerin mevsimsel faktörlere, sucul alanın konumuna bağlı olarak da değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir [9].

- **Besin Miktarının Kontrolü:** Besinler göllere ve kıyı sularına çok sayıda farklı noktadan karışmaktadır. Bu nedenle besin girdisini azaltmak için hedef bölgedeki tüm su yollarının göz önüne alındığı, ulusal ve uluslararası çalışmalar yapılması gerektiği belirtilmektedir. 1970 ve 1980'li yıllarda deterjanların bileşiminde bulunan fosfatın yasaklanması ve nitrojen kullanımının katı kurallarla düzenlenmesi gibi örnekler su

kaynaklarına besin girdisinin azaltılması yönündeki geniş kapsamlı mücadeleye örnek teşkil etmektedir. Öte yandan alınan önlemlerin etkilerinin görülmesi için uzun yıllar geçmesi gerekebileceği düşünülmektedir [16 ve 21]. Nitekim uzun yıllardır devam eden nitrojen ve fosfor girdisinin göl sedimentinin kendi içindeki besin döngüsüne dahil olarak sistemden ayrılmasının zaman alacağı belirtilmektedir [44]. Buna ek olarak göl ekosisteminin, uzun ötrofikasyon sürecinden ötürü değişime dirençli durağan bir hale geçmiş olabileceği bu nedenle besin miktarının azalmasının daha da uzun sürebileceği ifade edilmektedir [43]. Sucul ekosistem döngüsüne dahil olan fosfor miktarını azaltarak besin dengesinin normal haline geçişini hızlandırmak için göl yataklarında fosfor bağlayıcı kil kullanımı, göl yatağındaki tortunun kazınması yoluyla tortu giderme ve sedimentlerin kalsit ile kaplanarak örtülmesi gibi yöntemler denenmiştir. Humik maddelerin veya rakip iyonların varlığında fosfor bağlayıcı kilin etkinliğinin azaldığı ve sığ göllerdeki tortulların rüzgar ve bentivor balıklar tarafından kolayca resüspanse edilebildiği, bu nedenle besinlerin su tabakaları arasına yeniden karışabileceği belirtilmektedir [6 ve 32]. Tüm bunlar göstermektedir ki alg patlamalarının uzun dönemli önlenmesi için yukarıda sıralanan jeomühendislik yaklaşımları besin girdisini azaltarak desteklenmelidir.

- **Hidrodinamikler:** Su yüzeyinde kalma becerisine sahip siyanobakterilerin yol açtığı alg patlamalarının önlenmesi için durgun sularda yapay su hareketi oluşturmak nispeten maliyetli fakat etkili bir yöntem olarak görülmektedir [52]. Suyun dikey hareket hızının siyanobakterilerin yüzeye çıkma hızını yenmesi durumunda, siyanobakterilerin yüzeye ulaşamayarak buradaki avantajlı şartlardan faydalanamayacağı dolayısıyla yüzeydeki diatomların ve yeşil alglerin baskın hale geleceği değerlendirilmektedir [53].
- **Kimyasal Kontrol:** Kimyasal mücadelenin siyanobakteri kümelerinin yoğunluğunu azaltarak alg patlaması gelişimini hızlıca durdurabileceği, ancak bu yaklaşımın nadiren uzun vadeli bir çözüm olabileceği değerlendirilmektedir. Bakır sülfat, diuron ve diğer birçok algisit, çevre kirliliğine yol açtıkları ve diğer sucul organizmalar üzerinde toksik etki gösterdikleri için önerilmemektedir [33]. Çevresel etkisi ve sürdürülebilirliğinin yanında kimyasal mücadelenin belki de en büyük dezavantajı hücresel parçalanmaya yol açmasıdır. Bütünlüğü bozulan hücrelerdeki toksinlerin suya karışarak, suyun kullanılabilirliğini ve kalitesini düşürdüğü belirtilmektedir [9 ve 14]. Öte yandan düşük doz hidrojen peroksit uygulamasının siyanobakterilerin seçici olarak hedef alınmasında iyi bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir. Siyanobakterilerin hidrojen peroksitine karşı ökaryotik fitoplanktonlardan daha duyarlı olduğu belirtilmektedir. Hidrojen peroksitin birkaç gün içinde su ve oksijene parçalanması nedeniyle çevresel anlamda iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir [5]. Bununla beraber siyanobakteriler, hidrojen peroksit parçalanarak ortamdaki uzaklaştıktan sonra yeniden kümelenerek zaman içinde yeniden aşırı çoğalabilirler. Bu anlamda sürdürülebilirlik konusu da kimyasal kontrol uygulamalarının yetersiz kaldığı bir noktadır.
- **Biyolojik Kontrol:** Siyanobakterilerin birkaç doğal düşmanı bulunmakla birlikte alg patlamalarının biyolojik metotlarla kontrol altında tutulmalarının pek mümkün olmadığı

düşünülmektedir [10]. Alg patlamalarının virüsler, patojen bakteriler ve funguslarla baskılanması fikri ilgi uyandırmakla birlikte söz konusu mikrobiyal antagonistlerin büyük kısmı konak spesifik özellik taşıdığı için dirençli türlerin kümelenmesini önleyemeyeceği düşünülmektedir [17]. Bu nedenle viral veya fungal enfeksiyonların siyanobakteri biyokütlesinde ani azalmalara yol açabileceği fakat alg patlamalarını uzun dönemde nadiren azaltabileceği ileri sürülmektedir [50]. Bunlara ek olarak zebra midyesini (*Dreissena polymorpha*) de içine alan yumuşakçalar, fitoplanktonlar ve diğer asılı partikülleri, büyük miktarda suyu filtreleyerek uzaklaştırabilmektedir. Bu canlıların siyanobakteriler üzerindeki etkileri henüz açıklığa kavuşturulamamıştır. Bununla beraber Avrupa göllerindeki dreissenid midyelerinin daha önce siyanobakteri kümelenmesini oldukça etkili şekilde azaltabildikleri bildirilmiştir [55]. Ancak Kuzey Amerika'da bulunan bazı göllerde ise bu canlıların yalnızca tek hücrelileri ve küçük kolonileri filtreleyerek daha büyük ve askıda kalabilen siyanobakteri kolonilerine avantajlı şartlar sağladığı ortaya konmuştur [56]. Bir diğer biyolojik mücadele yöntemi olarak su kaynağında bulunan planktivor ve bentivor balıklar piskivor balıklarla değiştirilerek besin ağına müdahale edilmiştir. Bu uygulamada sediment yapısına katılan besinlerin resüspanse olmasının önlenmesi ve siyanobakteri biyokütlesini kontrol altında tutabilecek zooplanktonların sayısının artırılması hedeflenmiştir [49]. Sediment kaynaklı asılı parçacıkların azalmasına bağlı olarak suyun saydamlığında meydana gelen düzelmelerin makrofitlerin çoğalmasını teşvik ederek gölün temiz, berrak bir duruma geçmesini sağladığı ifade edilmektedir. Bununla birlikte, yüksek iç besin yüküne sahip, besin girdisinin kontrol altında tutulmadığı su kaynaklarında, alg patlamaları birkaç yıl sonra tekrar etme eğilimindedir. Bu nedenle, bu tarz bir biyomanipülasyonun uzun vadede etkili olabilmesi için aynı zamanda besin girdisinin de azaltılması, kontrol altında tutulması gerektiği bildirilmektedir [45 ve 46]. Siyanobakteri popülasyonunu kontrol altına almayı hedefleyen bu yaklaşımların yanında siyanobakteri kaynaklı toksinlerin biyolojik yollardan bertaraf edilmesi amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [64, 65 ve 67]. Probiyotik *L. rhamnosus* GG, *L. rhamnosus* LC-705, *B. lactis* 420, *B. lactis* Bb12 ve *B. longum* 46 suşlarının mikrosistin-LR toksininin sudan uzaklaştırılmasında farklı düzeylerde etkili olduğu bildirilmiştir [64]. Toksinlerin biodegradasyonunda pH, sıcaklık, toksin konsantrasyonu, bakteri hücre yoğunluğu ve canlılığı gibi fizyolojik koşulların etkili olduğu ifade edilmektedir [65]. Biodegradasyon mekanizmasının bakteri kaynaklı proteolitik enzimlerin aktivitesi ile ilgili olduğu yönünde bulgulara ulaşıldığı belirtilmektedir [66].

#### **4.3. Alg Patlamalarının Giderilmesi (Elimination of Occurring Cyanobacterial Blooms)**

Alg patlaması sonucunda su yüzeyinde gözlenen biyokütlenin dağılmasının iklim şartlarına ve su kaynağındaki besin miktarına bağlı olarak aylar sürebileceği belirtilmektedir [39]. Siyanobakterilerin çoğalmasını yavaşlatan ve bir noktada tamamen durdurabilen çevresel faktörler; sıcaklığın azalması, su yüzeyindeki bulanıklığın artmasından ötürü ışık penetrasyonunun azalması, rüzgar hızına bağlı olarak gerçekleşen karışma sonucunda fitoplanktonların yeniden rekabetçi duruma geçmeleri, akıntı hızı ve yönüne göre su katmanları arasında gerçekleşen geçişler şeklinde özetlenebilir [13 ve 28]. Henüz

gelişmekte olan bir siyanobakteri kümelenmesine karşı kimyasal müdahalenin (bakır sülfat, hidrojen peroksit vb.) daha hızlı sonuç verebildiği ifade edilmektedir [5 ve 32]. Ancak özellikle bazı algisitler sucul ekosistem döngüsüne dahil olarak uzun süre stabilitesini koruyabilmektedir. Bu nedenle türe özgü etki gösteren kimyasal madde tercih edilerek sucul ekosistem açısından daha olumsuz şartlar yaratılmamalıdır. Bu bağlamda çeşitli biyolojik mücadele yöntemleri sucul ekosistemin sağlığı açısından daha avantajlı görülmektedir [10, 17, 50, 55 ve 56]. Öte yandan biyolojik mücadele yöntemlerinin kimyasal yöntemler kadar hızlı sonuç vermediği bilinmektedir. Kimyasal ve biyolojik müdahaleye bağlı olarak hücre içinde tutulan siyanotoksinlerin sucul ekosisteme karışacağı belirtilmektedir. Bu durumun içme suyu kaynağı olarak kullanılan sucul alanlarda insan sağlığını tehdit edecek düzeyde siyanotoksin birikimine yol açabileceği değerlendirilmektedir. Bu gibi durumlarda sudaki siyanotoksin konsantrasyonunun azaltılması için filtrasyon, klor, ozon ve hidrojen peroksit uygulaması gibi yöntemlerin kullanılabilmesi belirtilmektedir [15 ve 34].

##### **5. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)**

Alg patlamalarının önlenmesi ve kontrol altına alınması amacıyla geliştirilen stratejilerden bazıları; tarımsal alanlarda bilinçsiz gübre kullanımının önlenmesi, evsel ve sanayi atıklarının kontrol altına alınması, sucul alanları sınırlayan bölgelerin bitkilerle çevrelenmesi, kimyasal ve biyolojik mücadele, hidrodinamik yaklaşımlar ve tüm bunların sürdürülebilir olması için gereken yasal düzenlemelerin belirlenmesi olarak sıralanabilir. Özellikle yaz mevsiminin sonu ve sonbahar mevsiminin başlangıcı arasında yağışların azaldığı ve su kaynaklarının nispeten durgunlaştığı dönemlerde alg patlamalarının yoğun şekilde takip edilmesi gerekmektedir. Bu dönemlerde daha sık aralıklarla olmak üzere yıl boyunca su kalitesi takip edilerek siyanobakterilerin aşırı çoğalmalarına zemin hazırlayan şartlar (suyun pH'sı ve sıcaklığı, türbidite, tuzluluk, besin girdisi vb.) gözlenmeli ve siyanobakterilerin çoğalma dinamiklerini etkileyen tüm faktörler dikkate alınarak riskli alanlar belirlenmelidir. Tespit edilen alanların farklı noktalarından (akarsu bağlantısı, yerleşim bölgesi kıyısı vb.) örnekler alınarak kirlilik giriş noktaları saptanmalıdır. Kirlilik kaynakları (tarımsal, evsel ve endüstriyel atıklar) giderilerek bu alanlardaki besin girdisi azaltılmalıdır. Siyanotoksinlerin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan klorlama, ozonlama ve filtrasyon tekniklerinin her birisi farklı siyanotoksinler üzerinde farklı derecelerde etkili olabilmektedir. Siyanotoksinler oral yolla vücuda alındığında toksik etki göstermekle beraber bazı toksinlerin deri ile teması sonucunda çeşitli cilt hastalıklarına yol açabildiği unutulmamalıdır. Bu nedenle alg patlaması gözlenen alanlardaki suyun içilmemesi, suyla temas edilmemesi ve bölgede avlanılmaması yönünde ikazlar bulunmalıdır.

Siyanobakteriler sucul ekosistemdeki varlıklarını dünya tarihinin çok büyük kısmında sürdürmüşlerdir. Ancak devam eden ötrofikasyon, artan atmosferik karbondioksit konsantrasyonu ve küresel ısınma nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından tahrip edici olan alg patlamalarının geçmiş on yıllarda dünya genelinde arttığı ve gelecek yıllarda da artarak devam edeceğine dair somut kanıtların bulunduğu dikkat çekilmektedir. Bu bağlamda ülkemizde sucul ekosistemlerdeki siyanobakteri yoğunluğunun belirlenmesi, siyanobakterilerin aşırı çoğalmalarına elverişli tüm sucul ekosistemler için sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi ve bunların yasal düzenlemelerle koruma altına alınması gerekmektedir. Alg patlamaları yukarıda sıralanan koruyucu ve önleyici tedbirler



alınarak daha ortaya çıkmadan engellenebilir. Küresel ölçekte ise karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarının engellenmesi, siyanobakterilerin aşırı çoğalmasını teşvik eden iklim şartlarının ortaya çıkmasını önlemek için atılabilecek en mantıklı adımdır.

#### **ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)**

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Albay, M., Akçaalan, R., Tüfekçi, H., Metcalf, J.S., Beattie, K.A., and Codd, G.A., (2003). Depth Profiles of Cyanobacterial Hepatotoxins (microcystins) in Three Turkish Freshwater Lakes. *Hydrobiologia*, 505:89-95.
- [2] Albay, M., Matthiensen, A., and Codd, G.A., (2005). Occurrence of Toxic Blue-Green Algae in the Kucukcekmece Lagoon (Istanbul, Turkey). *Environmental Toxicology*, 20(3):277-284.
- [3] Anneville, O., Domaizon, I., Kerimoglu, O., Rimet, F., and Jacquet, S., (2015). Blue-green Algae in a "Greenhouse Century"? New Insights from Field Data on Climate Change Impacts on Cyanobacteria Abundance. *Ecosystems* 18:441-458.
- [4] Antunes, J.T., Leão, P.N., and Vasconcelos, V.M., (2015). *Cylindrospermopsis Raciborskii*: Review of the Distribution, Phylogeography, and Ecophysiology of a Global Invasive Species. *Front. Microbiol.* 6:473.
- [5] Barrington, D.J., Reichwaldt, E.S., and Ghadouani, A., (2013). The Use of Hydrogen Peroxide to Remove Cyanobacteria and Microcystins from Waste Stabilization Ponds and Hypereutrophic Systems. *Ecol. Eng.* 50:86-94.
- [6] Berg, U., Neumann, T., Donnert, D., Nüesch, R., and Stüben, D., (2004). Sediment Capping in Eutrophic Lakes: Efficiency of Undisturbed Calcite Barriers to Immobilize Phosphorus. *Appl. Geochem.* 19:1759-1771.
- [7] Carmichael, W.W., (2001). Health Effects of Toxin- Producing Cyanobacteria: "The CyanoHABs". *Hum. Ecol. Risk Assess.* 7:1393-1407.
- [8] Chen, L., Chen, J., Zhang, X., and Xie, P., (2016). A Review of Reproductive Toxicity of Microcystins. *J. Hazard. Mater.* 301:381-399.
- [9] Chorus, I. and Bartram, J., (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water: a Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*/edited by Ingrid Chorus and Jamie Bertram. World Health Organization.
- [10] Coloma, S. E., Dienstbier, A., Bamfor, D.H., Sivonen, K., Roine, E., Hiltunen, T. (2017). Newly Isolated Nodularia Phage Influences Cyanobacterial Community Dynamics. *Environ. Microbiol.* 19:273-286.
- [11] De la Cruz, A.A., Hiskia, A., Kaloudis, T., Chernoff, N., Hill, D., Antoniou, M.G., He, X., Loftin, K., O'Shea, K., and Dionysiou, D., (2013). A Review on *Cylindrospermopsis*: the Global Occurrence, Detection, Toxicity and Degradation of a Potent Cyanotoxin. *Environmental Science Processes & Impacts*, 15:1979-2003.
- [12] Durai, P., Batool, M., and Choi, S., (2015). Structure and Effects of Cyanobacterial Lipopolysaccharides. *Mar. Drugs*, 13:4217-4230.
- [13] Elliott, J.A., (2010). The Seasonal Sensitivity of Cyanobacteria and Other Phytoplankton to Changes in Flushing Rate and water Temperature. *Glob. Chang. Biol.* 16:864-876.

- [14] Evangelista, V., Barsanti, L., Franssanito, A.M., Passarelli, V., and Gualtieri, P., (2008). *Algal Toxins: Nature, Occurrence, Effect and Detection* (1. Baskı). Springer Netherlands.
- [15] Fakioğlu, Ö., Atamanalp, M. and Demir, N., (2011). Baraj Göllerinde Toksik Mavi-Yeşil Algler. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 3(2):56-71.
- [16] Fastner, J., Abella, S., Litt, A., Morabito, G., Vörös, L., Palffy, K., Straile, D., Kümmerlin, R., Matthews, D., Phillips, M.G., and Chorus, I., (2016). Combating Cyanobacterial Proliferation by Avoiding or Treating Inflows with High P Load: Experiences from Eight Case Studies. *Aquat. Ecol.* 50:367-383.
- [17] Gerphagnon, M., Macarthur, D.J., Latour, D., Gachon, C.M.M., Van Ogtrop, F., Gleason, F.H., and Sime-Ngando, T., (2015). Microbial Players Involved in the Decline of Filamentous and Colonial Cyanobacterial Blooms with a Focus on Fungal Parasitism. *Environ. Microbiol.* 17:2573-2587.
- [18] Gobler, C.J., (2016). The Dual Role of Nitrogen Supply in Controlling the Growth and Toxicity of Cyanobacterial Blooms. *Harmful Algae*, 54:87-97.
- [19] Gürbüz, F., Metcalf, J.S., Karahan, A.G., and Codd, G.A., (2009). Analysis of Dissolved Microcystins in Surface Water Samples from Kovada Lake, Turkey. *Science of the Total Environment*, 407:4038-4046.
- [20] Hawkins, P.R., Runnegar, M.T., Jackson, A.R., and Falconer, I.R., (1985). Severe Hepatotoxicity Caused by the Tropical Cyanobacterium (blue-green alga) *Cylindrospermopsis Raciborskii* (Woloszynska) Seenaya and Subba Raju Isolated from a Domestic Water Supply Reservoir. *Appl. Environ. Microbiol.* 50:1292-1295.
- [21] Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H., and Visser, P.M., (2018). Cyanobacterial Blooms. *Microbiology*, 16:471-483.9.
- [22] Humpage, A.R. and Falconer, I.R., (2003). Oral Toxicity of the Cyanobacterial Toxin Cylindrospermopsin in Male Swiss Albino Mice: Determination of No Observed Adverse Effect Level for Deriving a Drinking Water Guideline Value. *Environmental Toxicology*, 18(2):94-103.
- [23] Ibelings, B.W. and Maberly, S.C., (1998). Photoinhibition and The Availability of Inorganic Carbon Restrict Photosynthesis by Surface Blooms of Cyanobacteria. *Limnol. Oceanogr.* 43:408-419.
- [24] İspirli, S., (2009). İzmir Tahtalı Baraj Gölü'nün Toksik Siyanobakteri Türleri ve Bazı Mikrosistin Varyantları Yönünden Araştırılması. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 77 sayfa.
- [25] Janssen, E., (2019). Cyanobacterial Peptides Beyond Microcystins - A Review on Co-Occurrence, Toxicity and Challenges for Risk Assessment. *Water Research*. 151:488-499.
- [26] Ji, X., Verspagen, J.M.H., Stomp, M., and Huisman, J., (2017). Competition Between Cyanobacteria and Green Algae at Low Versus Elevated CO<sub>2</sub>: Who Will Win, and Why? *J. Exp. Bot.* 68:3815-3828.
- [27] Jochimsen, E.M., Carmichael, W.W., An, J., Cardo, D.M., Cookson, S.T., Holmes, C.E.M., Antunes, M.B.C., Filho D.A.M., Lyra, T.M., Barreto, V.S.T., Azevedo, S.M.F.O., and Jarvis, W.R., (1998). Liver Failure and Death After Exposure to Microcystins at A Hemodialysis Center in Brazil. *N. Engl. J. Med.* 338:873-878.
- [28] Jöhnk, K.D., (2008). Summer Heatwaves Promote Blooms of Harmful Cyanobacteria. *Glob. Chang. Biol.* 14:495-512.
- [29] Kahraman, S.D. and Küplülü, Ö., (2012). Siyanobakteriler ve Toksinleri. *Vet Hekim Der. Dergisi*. 83(2):36-47.



- 
- [30] Krienitz, L., Ballot, A., Kotut, K., Wiegand, C., Pütz, S., Metcalf, J.S., Codd, A.G., and Pflugmacher, S., (2003). Contribution of Hot Spring Cyanobacteria to the Mysterious Deaths of Lesser Flamingos at Lake Bogoria, Kenya. *FEMS Microbiology Ecology*, 43:141-148.
- [31] Lehman, P.W., (2017). Impacts of the 2014 Severe Drought on the Microcystis Bloom in San Francisco Estuary. *Harmful Algae*, 63:94-108.
- [32] Lüring, M. and Faassen, E.J., (2012). Controlling Toxic Cyanobacteria: Effects of Dredging and Phosphorusbinding Clay on Cyanobacteria and Microcystins. *Water Res.* 46:1447-1459.
- [33] Matthijs, H.C.P., Jančula, D., Visser, P.M., and Maršálek, B., (2016). Existing and Emerging Cyanocidal Compounds: New Perspectives for Cyanobacterial Bloom Mitigation. *Aquat. Ecol.* 50:443-460.
- [34] Merel, S., Walker, D., Chicana, R., Snyder, S., Baures, E., and Thomas, O., (2013). State of Knowledge and Concerns on Cyanobacterial Blooms and Cyanotoxins. *Environ. Int.* 59:303-327.
- [35] Nellan, B.A., Pearson, L.A., Muenchhoff, J., Moffitt, M.C., and Dittmann, E., (2013). Environmental Conditions That Influence Toxin Biosynthesis in Cyanobacteria. *Environ. Microbiol.* 15:1239-1253.
- [36] O'Neil, J.M., Davis, T.W., Burford, M.A., and Gobler, C.J., (2012). The Rise of Harmful Cyanobacteria Blooms: Potential Role of Eutrophication and Climate Change. *Harmful Algae*, 14:313-334.
- [37] Osborne, N.J., Shaw, G.R., and Webb, P.M., (2007). Health Effects of Recreational Exposure to Moreton Bay, Australia Waters During a *Lyngbya Majuscula* Bloom. *Environment International*, 33(3):309-314.
- [38] Paerl, H.W. and Huisman, J., (2009). Climate Change: A Catalyst for Global Expansion of Harmful Cyanobacterial Blooms. *Environ. Microbiol. Rep.* 1:27-37.
- [39] Paerl, H.W. and Otten, T.G., (2013). Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences and Controls. *Microb. Ecol.* 65:995-1010.
- [40] Pearson, L., Mihali, T., Moffitt, M., Kellmann, R., and Neilan, B., (2010). On The Chemistry, Toxicology and Genetics of the Cyanobacterial Toxins, Microcystin, Nodularin, Saxitoxin and Cylindrospermopsin. *Mar. Drugs* 8:1650-1680.
- [41] Rantala, A., Fewer, D.P., Hisbergues, M., Rouhlainen, L., Valtomaa, J., Börner, T., and Sivonen, K., (2004). Phylogenetic Evidence for The Early Evolution of Microcystin Synthesis. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 101:568-573.
- [42] Sandrini, G., Ji, X., Verspagen, J.M.H., Tann, R.P., Slot, P.C., Luimstra, V.M., Schuurmans, J.M., Matthijs, H.C.P., and Huisman, J. (2016). Rapid Adaptation of Harmful Cyanobacteria to Rising CO<sub>2</sub>. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 112:9315-9320.
- [43] Scheffer, M., Hosper, S.H., Meijer, M.L., Moss, B., and Jeppesen, E., (1993). Alternative Equilibria in Shallow Lakes. *Trends Ecol. Evol.* 8:275-279.
- [44] Sondergaard, M., Jensen, J.P., and Jeppesen, E., (2003). Role of Sediment and Internal Loading of Phosphorus in Shallow Lakes. *Hydrobiologia*, 506:135-145.
- [45] Sondergaard, M., Jeppesen, E., Lauridsen, T.L., Skov, C., Van Nes, E.H., Roijackers, R., Lammens, E., and Portielje, R. (2007). Lake Restoration: Successes, Failures and Long- Term Effects. *J. Appl. Ecol.* 44:1095-1105.
- [46] Sondergaard, M., Lauridsen, T.L., Johansson, L.S., and Jeppesen, E., (2017). Repeated Fish Removal to Restore Lakes: Case Study



- of Lake Væng, Denmark, Two Biomanipulations During 30 Years of Monitoring. *Water*, 9:43.
- [47] Taranu, Z.E., Zurawell, R.W., Pick, F., and Gregory-Eaves, I., (2012). Predicting Cyanobacterial Dynamics in The Face of Global Change: The Importance of Scale and Environmental Context. *Glob. Change Biol.* 18:3477-3490.
- [48] van Apeldoorn, M., Van Egmond, H.P., Speijers, G.J.A., and Bakker, G.J.I., (2007). Toxins of Cyanobacteria. *Mol. Nutr. Food Res.*, 51:7-60.
- [49] Van De Bund, W.J. and Van Donk, E., (2002). Short-Term and Long-Term Effects of Zooplanktivorous Fish Removal in a Shallow Lake: A Synthesis of 15 Years of Data From Lake Zwemlust. *Freshwater Biol.* 47:2380-2387.
- [50] Van Wichelen, J., Vanormelingen, P., Codd, G.A., and Vyverman, W., (2016). The Common Bloom-Forming Cyanobacterium *Microcystis* Is Prone to a Wide Array of Microbial Antagonists. *Harmful Algae*, 55:97-111.
- [51] Verspagen, J.M.H., Van de Waal, D.B., Finke, J.F., Visser, P.M., Van Donk, E., and Huisman, J., (2014). Rising CO<sub>2</sub> Levels Will Intensify Phytoplankton Blooms in Eutrophic and Hypertrophic Lakes. *PLOS ONE*, 9, e104325.
- [52] Visser, P.M., Ibelings, B.W., Bormans, M., and Huisman, J., (2016a). Artificial Mixing to Control Cyanobacterial Blooms: A Review. *Aquat. Ecol.* 50:423-441.
- [53] Visser, P.M., Ibelings, B.W., Van der Veer, B., Koedood, J., and Mur, L.R., (1996). Artificial Mixing Prevents Nuisance Blooms of The Cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, The Netherlands. *Freshwater Biol.* 36:435-450.
- [54] Visser, P.M., Verspagen, J.M.H., Sandrini, G., Stal, L.J., Matthijs, H.C.P., Davis, T.W., Paerl, H.W., and Huisman, J., (2016b). How Rising CO<sub>2</sub> and Global Warming May Stimulate Harmful Cyanobacterial Blooms. *Harmful Algae*, 54:145-159.
- [55] Waajen, G.W.A M., Van Bruggen, N.C.B., Dionisio Pires, L.M., Lengkeek, W., and Lürding, M., (2016). Biomanipulation with Quagga Mussels (*Dreissena rostriformis bugensis*) to Control Harmful Algal Blooms in Eutrophic Urban Ponds. *Ecol. Eng.* 90:141-150.
- [56] White, J.D. and Sarnelle, O., (2014). Size-Structured Vulnerability of The Colonial Cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*, to Grazing By Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*). *Freshwater Biol.* 59:514-525.
- [57] WHO, (2011). Guidelines for Drinking Water Quality (4. Baskı). World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- [58] Wiese, M., D'Agostino, P.M., Mihali, T.K., Moffitt, M.C., and Neilan, B.A., (2010). Neurotoxic Alkaloids: Saxitoxin and Its Analogs. *Mar. Drugs* 8:2185-2211.
- [59] Wood, S.A., Selwood, A.I., Rueckert, A., Holland, P.T., Milne, J.R., Smith, K.F., Smits, B., Watts, L.F., and Cary, C.S., (2007). First Report of Homoanatoxin-a and Associated Dog Neurotoxicosis in New Zealand. *Toxicon*, 50:292-301.
- [60] Zhao, C.S., Shao, N.F., Yang, S.T., Ren, H., Ge, Y.R., Feng, P., Dong, B.E., and Zhao, Y., (2019). Predicting Cyanobacteria Bloom Occurrence in Lakes and Reservoirs Before Blooms Occur. *Science of the Total Environment*, 670:837-848.
- [61] Zilliges, Y., Kehr, J.C., Meissner, S., Ishida, K., Mikkat, S., Hagemann, M., Kaplan, A., Börner, T., and Dittman, E., (2011). The Cyanobacterial Hepatotoxin Microcystin Binds to Proteins and Increases the Fitness of *Microcystis* Under Oxidative Stress Conditions. *PLOS ONE*, 6, e17615.





- 
- [62] Price, G.D., Woodger, F.J., Badger, M.R., Howitt, S.M., and Tucker, L., (2004). Identification of a SulP-Type Bicarbonate Transporter in Marine Cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(52):18228-18233.
- [63] Mahmood, N.A. and Carmichael, W.W., (1987). Anatoxin-a (s), an Anticholinesterase from the Cyanobacterium *Anabaena flos-aquae* NRC-525-17. *Toxicon*, 25(11):1221-1227.
- [64] Nybom, S.M.K., Salminen, S.J., Meriluoto, and J.A.O., (2007). Removal of Microcystin-LR by Strains of Metabolically Active Probiotic Bacteria. *FEMS Microbiology Letters*. 270:27-33.
- [65] Nybom, S.M.K., Salminen, S.J., and Meriluoto, J.A.O., (2008). Specific Strains of Probiotic Bacteria Are Efficient in Removal of Several Different Cyanobacterial Toxins from Solution. *Toxicon*. 52:214-220.
- [66] Nybom, S.M.K., Dziga D., Heikkilä, J.E., Kull, T.P.J., Salminen, S.J., and Meriluoto, J.A.O., (2012). Characterization of Microcystin-LR Removal Process in the Presence of Probiotic Bacteria. *Toxicon*. 59:171-181.
- [67] Dziga, D., Kokocinski, M., Maksylewicz, A., Czaja-Prokop, U., and Barylski, J., (2016). *Cylindrospermopsin* Biodegradation Abilities of *Aeromonas* Sp. Isolated from Rusalka Lake. *Toxins*, 8(3):1-10.