

# HAVA KİRLİLİĞİNİN BİYOLOJİK İZLENMESİNDE LİKENLERİN KULLANIMI

Gülşah Çobanoğlu<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Özellikle belirtmek isterim ki, LİKENLER çok kapsamlı akademik çalışma ve araştırmaların konusu olarak bilim insanları tarafından çeşitli yönlerden incelenmekte ve bunların sonuçlarıyla ilgili yayınlar yapılmaktadır.

Bu yazıda LİKEN konusu, özellikle iklimlendirme ve iklimlendirme tesisatı üzerine çalışan veya bu konuya ilgi duyan ancak biyoloji bilgileri okul eğitimiyle sınırlı olan makina mühendislerinin de anlayabileceği bir dille, akademik terim ve anlatımlardan olabildiğince kaçınılarak, Mühendis ve Makina Güncel dergisi okuyucularına yönelik olarak hazırlanmıştır. Burada, tanıtmak amacıyla, likenlerin nasıl canlılar olduğu ve onların ne amaçlarla kullanıldığı anlatılmaya çalışılmıştır. Likenlerin ne olduğunu öğrenen ve yapacakları iklimlendirme tesisatı tasarım ve çalışmalarında onlardan yararlanabileceğini gören mühendislerin ilgisini çekeceğini ve bu yazıdan yararlancıklarını düşünüyorum.

Son yıllarda fosil yakıt kullanımının azalmasıyla, kükürt dioksit yoğunluğunda da görece bir düşüş söz konusu olmakla birlikte, insan sağlığı için havadaki kirleticilerin sürekli ve özenle izlenmesi ve kirletici kaynakların incelenerek gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Anlık veya süregelen hava kirliliği düzeyi, doğrudan veya dolaylı olarak çeşitli yöntemlerle ölçülebilmektedir. Bu yazıda; "Atmosferik Kirliliğin Biyolojik İzlenmesinde Likenlerin Kullanımı" başlıklı derleme makalemdeki bilgiler esas alınmıştır [1]. Günümüze kadar yapılan çeşitli çalışmalar irdelenerek geniş bir bakış açısıyla, hava niteliğini etkileyen kükürt dioksit, ağır metaller, radyonüklidler gibi kirleticilerin nicelikleri ve etkileri bakımından değerlendirilmesi için biyoindikatör (biyolojik gösterge) ve biyomonitör (biyolojik izleyici) özelliği olan likenlerden nasıl yararlanıldığı, uygulanan yöntemler ve bu biyolojik yöntemlerin üstün ve zayıf yönleri ele alınmıştır.

Bunun yanı sıra, likenlerin kirliliğe duyarlılığında etkili olan

<sup>1</sup> Prof. Dr., Marmara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü - [gcoban@marmara.edu.tr](mailto:gcoban@marmara.edu.tr)

çevresel ve insan kaynaklı etmenler, kirliliğin liken yapısı üzerindeki olumsuz etkileri, liken yapısının metal alım sistemi ve likenlerin canlılık değişkenliklerindeki değişimlerine ilişkin verilerin karşılaştırmalı incelemesi gibi, konuyla ilgili çeşitli tamamlayıcı bilgilere de yer verilmiştir.

## 2. LİKENLER

Likenler, yaklaşık 25.000 kadar türü olan, daha çok keseli mantarlar (küfler) ile yeşil alglerin ve/veya siyanobakterilerin (daha çok bilinen adıyla mavi-yeşil alglerin) ortak yaşamının başarılı örnekleridir. Bu ortak yaşam, her iki ortamın da fayda sağladığı, birlikte ve birbirine bağımlı yaşam şeklidir. Doğada mantarların serbest yaşayamaması ve bir konağa gereksinim duymaları nedeniyle, Ahmadjian'ın görüşüne göre mantarın alg üzerinde kurduğu denetimli bir asalaklık şeklindedir [2]. Liken durumunda mantar türü, besin kaynağı olarak yararlanabileceği (fotosentez yapan) ortaklar seçmektedir.

Liken konusuyla ilgili terimlerin bazıları dilimize yerleşmiş ancak çoğunun Türkçe karşılıkları henüz kesinlik kazanmamıştır.

Yeryüzündeki çoğu ekosistemde, ağaç, kaya ve toprak gibi çeşitli "substratlar" (tutundukları ortam) üzerinde gelişen likenler, bitkisel canlılardır. Bitki olarak anılmaları, bitkilere benzer olarak fotosentez yapabilen klorofilli ortağının sayesinde likenin kendisine besin üretebilmesinden kaynaklanmaktadır ama aslında, türleşmede daha etkili olan mantar ortağından dolayı çoğunlukla bitki olarak değil, mantar olarak kabul görürler.

Likenlerin çok geniş bir yapısal çeşitliliği vardır. Ağaçlar-

dan sarkan, metrelerce uzunlukta ipliksi-şeritsi "dalsılar", dik duran "çalımsılar", büyüklü küçüklü lobları ile rozet şeklinde yayılan "yapraksılar" veya 1 cm'den bile küçük ya da 10 cm'den çok daha büyük olabilen "kabuksular", hatta "unsu" formlara kadar çok farklı şekil, boyut ve renkte görülebilirler (Fotoğraf 1).

### 2.1 Likenlerin Biyolojik Üstünlükleri

Likenlerin kirliliğe duyarlılığının yüksek oluşu, onların biyolojisi ile yakın ilişkilidir. Likenlerin hava kirliliğinin biyolojik izlenmesinde kullanılmasını sağlayan birçok özellikleri vardır:

- Likenler çok geniş bir coğrafi alana yayıldığından, evrensel düzeyde karşılaştırılabilirler.
- Kök, gövde, yaprak gibi ana organları olmayan (talli) yavaş büyüyen ve uzun yıllarca yaşayabilen ilkel bitkisel organizmalar olduklarından, çiçekli bitkiler gibi mevsimsel olarak görülmez ve zamana bağlı olarak değişmezler.
- Likenlerin metabolik hareketleri, havadaki nemle ilişkilidir.
- Yüksek bitkilerde olan stoma (yaprak veya gövdedeki gözenekler) ve kütikula (yaprakların üst yüzeyindeki mumsu yapı) likenlerde bulunmadığından, likenler havadaki kirliticileri tümüyle emebilmekte ve bunları kendi gereksinimlerinden fazla da olsa biriktirebilmektedir.
- Likenlerin damarlı bitkilerden 100 kat daha fazla kürt dioksit emebildiği belirtilmektedir [3].
- Hava kirliliği göstergesi açısından çiçekli bitkilerle karşılaştırıldığında, liken ve karayosunu gibi talli bitkiler



**Fotoğraf 1.** Yapısal Çeşitlilikte, Değişik Liken Türü Örnekleri

daha uzun süreli ve güvenilir sonuçlar verdiği için, öne çıkmaktadır.

- Uzun yaşayan organizmalar olarak yıl boyunca kirleticilerle karşılaşan likenler, birlikte yaşam dengesini korumak zorundadır.
- Likenlerin hepsi kirliliğe aynı derecede duyarlılık göstermez. Liken türlerinin dayanıklılık düzeyleri de farklılık gösterir. Belirli liken türleri bir düzeye kadar kirlilik sınırına dayanabildiklerinden, hava niteliğinin izlenmesinde önem kazanmışlardır.

Araştırılacak bölgedeki likenlerin çeşitliliğinin belirlenmesi ve izlenecek türlerin yayılış haritalarının oluşturulması, biyoizlemenin başında yapılacak ilk çalışmadır. İkinci çalışma, liken türlerinde kirlilik nedeniyle oluşan morfolojik ve anatomik değişikliklerin incelenmesidir. Üçüncü çalışma ise kirliliğe karşı verilen yaşamsal yanıtın (membran bütünlüğü, CO<sub>2</sub> gaz alışverişi, klorofil, pigment yıkımı, N<sub>2</sub> sabitlemesi ve enzim aktivitesi gibi) incelenmesidir.

Kirlilikten etkilenen likenlerde görülen bazı değişiklikler; yapısal ve anatomik belirtiler, ince-yapı, "elektron mikroskopunda inceleme ile görülebilecek değişimler" membran sistemi bozuklukları, klorofil floresan bozukluğu, yaşamsal bozukluklar, üreme-gelişme ve büyüme hızı bozuklukları gibi sıralanabilir [4]. Bu değişikliklerin yapısal ve yaşamsal olanları sahada gözlenebilirken, bir kısım değişiklikler ise transplantasyon (yer değiştirme) uygulaması veya laboratuvarlarda yapılacak denetimli çalışmalarıyla saptanabilir.

## 2.2 Biyolojik Terim ve Tanımlamalar

Çevre kirliliğinde organizmalar için kullanılan birçok terim birbirinden farklı anlamlar taşıyabilmektedir. "Biyoin-dikatör" ya da biyolojik gösterge terimi, organizmaların farklı düzeylerdeki kirleticilere verdikleri yanıtı göre havadaki kirleticilerin varlığını ve oranını gösterme yeteneklerini anlatır.

Hava kirliliği düzeyinde nicel bilgi sağlayan biyolojik göstergeler "biyoindikatör" olarak belirtilirken, zamana göre değişikliklerin belirlenmesini nitel verilerle sağlayan göstergeler ise biyolojik izleyiciler "biyomonitörler" olarak tanımlanmaktadır. Biyomonitörlerin kullanıldığı uygulamaya ise "biyolojik izleme" veya kısaca "biyoizleme" diyoruz. Bir organizmanın "biyomonitör" olabilmesi için gerekli özellikler Garty tarafından şöyle sıralanmıştır [5]:

1. Organizmanın ölçülebilir oranda metal biriktirme yeteneğinin olması,
2. Organizmanın niteliği ile yeryüzündeki dağılımının uygun olması ve örnek toplanabilir olması,
3. Çalışmanın tekrarlanabilir olması,
4. Toplama ve irdelemelerin gerektirdiği harcamaların kabul edilebilir olması.

"Biyokümülatör" terimi havadaki metalleri içinde tutan biyolojik biriktiriciler için kullanılmaktadır.

"Biyoremediatörler" ise biyolojik iyileştiricilerdir. Bunlar, kirleticileri çevreden uzaklaştırma, eleme veya kirleticilerden koruma özelliği taşıyan, yüksek oranda toksik biriktiren, kısa ömürlü ve büyük biyokütlesi olan canlılardır.

Likenler, iyi birer biyoindikatör, biyomonitör ve biyokümülatör olmalarına karşın havayı iyileştirici ve çevreyi koruyucu biyoremediatörler (fitoremediatörler) arasında sayılmamaktadır. Bunun nedeni, çok yavaş büyümelerinden dolayı büyük liken biyokütlesinde biriken metallerin asıl kaynağının aydınlatılmasının güçlüğüdür [5].

"Hava kirliliği" terimi "hava kalitesi/niteliği" ile eş anlamlı değildir. "Hava kirliliği", kirleticiler ile; "hava kalitesi" ise kirleticilerin etkileri ile tanımlanır ve bunlar; insanları, hayvanları, bitkileri ve inorganik maddeleri etkiler. Hava kalitesinin biyoizleme yoluyla değerlendirilmesinde, likenler sıklıkla tercih edilmektedir [6].

"Hava kirliliği" terimi atmosferik duman, mineralce zengin toz, Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), Nitrojen oksitler (NO<sub>x</sub>), Kükürt (S), Azotlu (N) bileşikler, Flor (F), foto-oksidanlar (Ozon ve PAN peroksi asetil nitrat gibi) ve havadaki toksik maddeleri belirtir. Seaward, belirli kirleticilerin canlı varlıkla izlenmesinde biyoindikatörlerin önemine değinerek biyosferde bu teknolojinin değerlendirilmesine güncel bir yaklaşım getirmiştir [7]. Fakat bu yaklaşım, yine de fiziksel ve kimyasal olarak kirleticilerin ölçülmesinin yerine geçememiştir. Bu nedenle biyolojik izleme, birçok aygıt kullanımı gerektiren, pahalı ve zor yapılabilen, kapsamlı araştırmalarda tamamlayıcı olarak kullanılacak bir yöntem seçeneği olarak önerilmektedir. Böylece, fiziksel ve kimyasal verilerin yanında, canlılığı gösteren fizyolojik veriler de sağlanmaktadır.

## 2.3 Atmosferik Kirlilik Değerlendirmesinde Likenlerin İşlevi

Atmosferik kirleticiler, Hutchinson vd. tarafından şöyle sınıflandırılmıştır [8]:

- 1- Birincil kirleticiler;  $SO_2$ ,  $NO_2$  ve F bileşikleri olup atmosferde aynı kimyasal formda kalırlar,
- 2- İkincil kirleticiler; birincil kirleticilerin uğradıkları kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ( $O_3$ ) ozon, peroksi asetil nitrat (PAN), asit yağmurlarından kaynaklanan sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve nitrik asit ( $HNO_3$ ) gibi asitlerdir,
- 3- Üçüncü grup kirleticiler; havadaki toksikleri içine alan endüstriyel organik bileşikler, tarımsal ilaçlar, iz elementler ve yarı metalleri kapsar. Genellikle kükürt ve azot bileşikleri atmosferde gaz formunda bulunurken, ağır metaller ise özel parçacıklara bağlı olarak bulunurlar [9].

Ayrıca havada asılı duran partikül madde (PM) ve plastiklerin parçalanmasıyla havaya karışan mikroplastikler (MP) de günümüzde önemli atmosferik kirlilik parametreleri arasındadır.

Bazı parçacıklar; volkanlar, toz ve kum fırtınaları, orman ve otlak yangınları ile bitkilerin ve denizin etkisi gibi doğal nedenlerle oluşurlar. Ayrıca elektrik santralleri, endüstriyel tesisler, baca gazları, fosil yakıtlı motorlu taşıtlar ve benzerleri, önemli ölçüde parçacık üretir. Bunlar da kanser, kalp, solunum yolu hastalıkları ve bebek ölüm oranlarında artışa neden olmaktadır.

1960'lı yıllarda likenlerin,  $SO_2$  (kükürt dioksit) gibi kirleticilere karşı duyarlılıkları ve havadaki düşük yoğunluklu elementleri bile içinde biriktirebilme yetenekleri fark edildikten sonra, şehir kirliliği ve kirlilik kaynaklarında gösterge olarak kullanılmasına başlanmıştır.

Bir bölgedeki liken türlerinin dağılımı, hava kirliliğinin, özellikle kükürt dioksit düzeyinin yaklaşık değerlerini gösterebilmektedir. Bu amaçla ilk kez Hawksworth ve Rose tarafından oluşturulan zonlama ölçeği ile İngiltere'de kükürt dioksit kirliliği için 10 bölge tanımlanmıştır [10]. Bölge 1, ortalama kış  $SO_2$  düzeyinin  $170 \mu g m^{-3}$  ü aştığında epifitik (ağaç üzerinde) likenlerin bulunmaması ile tanımlanırken, bölge 10 ise  $SO_2$  düzeyinin  $10 \mu g m^{-3}$  den az olduğunda, en fazla sayıda likenin bulunduğu bölgeyi tanımlar.

Liken dağılımında iklimsel ve coğrafi şartların etkili olması nedeniyle farklı bölgeler farklı liken türlerini barındırabilir. Dolayısıyla İngiltere'de yapılan bu bölgelendirme,

bir başka ülkenin hava kirliliği düzey kestirimi için birebir uygulanamaz.

Likenler hava kirleticilerine duyarlı olmaları yanında, aynı zamanda iyi metal biriktiricilerdir.

Yağmurlar, tozlar gibi doğal olanlar ve insanlar tarafından oluşturulan kabuk, toprak, kaya gibi yüzeylerde mineraller, metal ve ağır metaller bulunur. Kurşun (Pb), Nikel (Ni), Cıva (Hg), Krom (Cr), Çinko (Zn), Titanyum (Ti) ve Vanadyum (V) önemli metal kirleticiler arasındadır [8].

Biyolojik çalışmalarda sıklıkla kullanılan "ağır metal" terimi; fiziksel olarak metal, geçiş metali veya yarı metal bile olsa, havada yüksek oranlarda bulunduğu zaman, canlılar üzerinde zehirlenme etkisi gösteren elementleri tanımlamak için kullanılır.

Likenlerin dağılımı ve analizi yoluyla asbest ile ilişkili bazı çalışmalar da yapılmıştır. Asbest ve asbestli minerallerin oluşumu genellikle serpantin kayalarda ve toprakta biyolojik bozunma gibi doğal bir oluşumla veya tarım ve yapılaşma gibi insan çalışmalarıyla gerçekleşebilir ve insan sağlığını tehdit edebilir. Ticari asbest lifleri genellikle serpentin kayaların damarlarındaki yüzeysel oluşumlardır.

#### 2.4. Likenlerin Duyarlılık Gösterdiği Çevresel Etkenler

Likenlerin duyarlılık gösterdiği en önemli etkenlerin başında insan kaynaklı (antropolojik) hava kirliliği gelir. Bu duyarlılık, canlı organizmalara (biyotik) veya cansız maddelere (abiyotik) etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu yüzden, biyolojik izleme çalışmalarında, fiziksel çevre koşullarının yanında, insan kaynaklı etmenler de göz önüne alınmalıdır.

Likenler, hemerobik (ekosistemlerde insan kaynaklı etkilenme ve bunun derecesi) etkilenmelerin değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır [11].

Gösterge amaçlı kullanılan liken türleri, buldukları ortama bağlı olarak değişkenlik gösterir. Örneğin, iyi korunmamış ormanlarda bir gösterge tür liken yer alırken, hemerobik etkiden uzak ormanlarda ise başka liken türleri bu görevi yerine getirebilir. Toprak, kaya ve ağaç üzerinde bulunan yol kenarı likenlerinde yapılan çeşitli çalışmalarda, topraktaki ve karayolu üzerindeki likenlerin metal içeriğini, rüzgârla dağılan tozun ve trafik yoğunluğunun etkilediği görülmüştür.

Petrol türevlerini kullanan içten yanmalı motorlu taşıtlar



atmosfere; azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit ( $\text{SO}_2$ ), hidrokarbonlar, uçucu organik maddeler, havada asılı parçacıklar ve çeşitli metaller salmaktadır. Örneğin kurşun (Pb), endüstrileşmiş ülkelerdeki hava kirliliği birikiminde insan kaynaklı etkinin yaygın bir göstergesidir.

Likenler ve karayosunları, motorlu araçlardan kaynaklanan kurşun (Pb) kirliliğindeki değişimin izlenmesinde de kullanılabilir.

Havadaki tozda, metal-içeren parçacıkların maddesel özelliklerine bağlı olarak solunum yolu kanser vakalarının incelendiği çeşitli çalışmalar yapılmış ve insanlardaki solunum yolu hastalıkları ile liken çeşitliliği arasında çok sıkı bağlantı olduğu görülmüştür [12]. İtalya'da liken çeşitliliğinin fazla olduğu bölgelerde akciğer kanser oranlarının düşük olduğu gösterilmiştir.

Nüfus yoğunluğunun yanı sıra, endüstri ve ticaret merkezi olan yerleşim alanlarında kükürt dioksitin ( $\text{SO}_2$ ) ortalama değerlerinin özellikle kışın ısınma amaçlı kullanımdan dolayı daha da arttığı bilinmektedir. Likenlerin  $\text{SO}_2$ 'ye karşı dumana göre daha duyarlı oldukları rapor edilmiştir [13].

Hauck vd'ne göre, Batı ve Orta Avrupa'da çok düşük pH (yaklaşık 3) ve yüksek  $\text{SO}_2$  değerlerine uyum sağlamış çok yaygın epifitik kabuksu likenlerden biri olan *L. conizaeoides*, son 20 yılda ciddi derecede azalmıştır. Son yıllardaki kükürt dioksit değerlerindeki düşüşle birlikte asitlikteki hafif artışın (0,4 pH birimi) buna neden olduğu rapor edilmiştir [14].

Likenlerin de diğer bitkiler gibi pH'a duyarlılığı vardır. Ağaç kabuğu pH'ı ve toksik maddelere duyarlılık, epifitik liken yapısını ilk etkileyen etmenlerdir [15].

Azot (N) seven nitrofit denilen türlerin çoğu kabuk pH'ının yüksek olmasına gereksinim duyar. Kabuk pH'ının artışı, İsviçre'de, nitrofit türlerde büyük artış olmasına ve son on yılda asidofit türlerin kaybolmasına neden olmuştur. Havadaki amonyak ( $\text{NH}_3$ ) yoğunluğu ile nitrofitlerin çokluğu arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür [16].

Buradan yola çıkarak,  $\text{SO}_2$  üzerinden hava kirliliğini izlemek veya kestirmek için likenlerdeki tür çeşitliliğini kullanan günümüzde uygulanan yöntemlerin bazı

değişimlere gereksinim duyduğu, bu yapılmazsa, yüksek  $\text{NH}_3$  düzeyi bulunan bölgelerde, hava kalitesinin doğru değerlendirilemeyeceği savunulmuştur.  $\text{SO}_2$ 'nin liken türlerine zararı, düşük pH değerlerinde yani asitlik arttıkça daha da ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Buna karşın düşük  $\text{SO}_2$  olan bölgelerde iyi gelişen liken toplulukları görülmektedir [17].

Kalkerli substratlar liken kolonizasyonu için daha elverişlidir, kireçli harç ve çimentoda olduğu gibi, substratın yüksek pH'ı asitliğin toksik etkisini azaltarak likenin kirlilikle yaşamını sürdürebilmesini sağlar. Asit yağmurları, likenleri, substratın asitliğini artırarak olumsuz etkilemektedir.

Asit yağmurundan etkilenmemiş *Picea abies* ormanında, kabuk pH'ının dikey değişiminin gösterilmesi amaçlanan bir çalışmada, yer düzeyinden üst dallara doğru azalan kabuk pH'ın uç dallarda yeniden yükseldiği ve ağaçta buna bağlı bir liken tür kompozisyonu geliştiği ortaya çıkarılmıştır [18].

Kirlilik kaynağına olan uzaklık, yükselti, rüzgâr yönü, hava sıcaklığı ve nem, kirliliği belirleyen ana etkenlerdir. Likenlerin gelişiminin ve kükürdün daha az toksik bir forma dönüşümünün suya bağlı olduğu belirlenmiştir. Öyle ki, kirlilik olan yerdeki likenlerin, eğer nem fazla ise, kirleticileri daha az toksik forma dönüştüreceği için olumsuz etkilenmediği ve kurumalarının yavaşladığı görülmüştür [13].

Liken gelişiminde ve yayılışında etkili "habitat" (bitkinin doğal olarak yetiştiği yer) özellikleri, "makrohabitat etkenler" (güneş ışığı, rüzgâr, sıcaklık, nem, havanın kimyası gibi) ve "mikrohabitat etkenler" (substrat tipi- ağaç, kaya, insan yapımı malzeme gibi, toprak yapısı ve kimyası, orman örtüsü ve havadaki gazların yoğunluk değişimleri) şeklinde sıralanmıştır. Kirleticiler içeriği ve düzeyinde dalgalanmalar olan ortamlarda, likenlerin kirliliğe yanıtı ve hatta yaşamını sürdürebilmesinde, mikroiklim ve mikrohabitat koşullarının (gölge-ışık, nem durumu gibi) önemi belirgin olarak fark edilmektedir [19].

Yükselti (rakım) likenlerin yayılışında önemli bir diğer etkenidir. Şehirlerde  $\text{SO}_2$  havada yayıldığı ve yükseldiği için, yerden yükseklik arttıkça likenler kirlilikten daha fazla etkilenmektedir. Kirlilik kaynağı çevresindeki likenlerle yapılan bir çalışmada, likenlerin kirlilikten etkilenmesinde birinci etken kaynağa olan uzaklığı olarak belirtilmiş, yüksekliğin ise liken yayılış sıklığını olumlu etkilediği gösterilmiştir [20].

Liken yapısında biriken metallerin topografyaya bağlı olduğu bazı çalışmalarda rapor edilmiştir. Buna örnek olarak, yüksek ormanlarda belirgin olarak biriken Hidrojen (H<sup>+</sup>), Amonyum (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Sodyum (Na<sup>+</sup>), Potasyum (K<sup>+</sup>), Sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) gibi kimyasallar ve buna bağlı asitlik düzeyi, yükseklerdeki sis ve bulutlar altında kalan likenlerin metal bileşimini etkilemektedir. Likenlerde Sesium içeriği yükseklikle birlikte artış göstermekte, Kurşun (Pb) ise en fazla orta yükseltilerde (200–400 m) yüksek oranda görülmüştür. Cıva (Hg) içeriği, 400 m altındaki tundralarda, yüksek orman içindekinin hemen hemen iki katı kadardır. Cıva düzeyinin ise deniz kenarından uzaklaştıkça düştüğü belirtilmiştir.

Antarktika, coğrafi olarak dünyadaki “en temiz” alan olarak gözükmektedir. Ancak bu bölgede son yıllarda yapılan araştırmalar, küresel kirlenme sonucunda, oradaki insan çalışmalarının etkileriyle veya kirli bölgelerden taşınma yoluyla havadaki kirleticilerin bölgeye ulaştığını ve arttığını göstermektedir. Burada doğal ve yapay radyoaktivite, toprak üzerinde kalın liken-karayosunu örtüsü bulunması nedeniyle en düşük düzeydedir [5].

Yavaş büyüyen ve uzun ömürlü olan likenler, nükleer silah denemelerinin ve nükleer kazaların neden olduğu radyonüklid kirliliğinin de biyolojik izleyicileridir.

## 2.5 Likenlerin Metal Alışverişinin Bağlı Olduğu Etkenler

Likenlerin metal içeriğinin büyük bir kısmı atmosferik kaynaklıdır [5], ancak aynı zamanda substrattan da parçacık yakaladıkları birçok çalışmada belgelenmiştir [21]. Bu parçacıklar, liken yüzeyinde veya hücreler arası boşluklarda tutularak uzun süre değişmeden depolanabilir. Likenler böylece gereksinimlerini aşan miktarlarda ağır metal biriktirirler. Tutulan ve depo edilen parçacıklar içindeki metallerin zehirliliği, metallerin miktarı, kimyasal formu, farklı su, pH ve sıcaklıktaki çözünürlükleri gibi kimyasal ve fiziksel değişkenlere göre belirlenir. Havadaki metaller, liken yapısına çözünerek veya parçacık halinde yakalanarak alınırlar. Çözünen metaller hücre-dışı veya hücre-içine yerleşme eğilimindedir.

Likende metal birikimi dinamik bir süreç olup, araştırmalarda metal çözeltilerine batırıldığı zaman hızla -birkaç saat içinde- yapıya alındığı görülmüştür. Birçok elementin liken yapısında kalma süresi 2–5 yıldır [21]. Likenlerin içinde bulunan önemli sayıda hücrelerarası boşluklar; toz, toprak ve metal parçacıklarını tutar [5]. EDX (Energy Dis-

persive X-ray / Enerji Dağılımlı X Işını) analizi yöntemiyle, kesitlerde ve yüzeyde SEM (Scanning Electron Microscope - Taramalı Elektron Mikroskobu) ile görüntülenen parçacıkların içeriği hakkında bilgiler elde edilmiştir.

Alüminyum (Al), Demir (Fe), Magnezyum (Mg) ve Manganez (Mn) gibi elementler yer kabuğunda boldur. Yıkanmamış liken yapısında toz ve topraktan dolayı metal oranı yüksektir. Rossbach vd. tarafından uygulanan bir yöntemle şehir merkezindeki otel havalandırma tesisatlarına yerleştirilen aygıtlarla toplanan yüksek oranda kirlenmiş toz örnekleri, uzak alanlardaki liken örnekleri ile karşılaştırılmıştır [22].

Likenlerin metal içeriği, likenin türüne ve onun yapısal özelliklerine bağlıdır.

Farklı türlerin aynı kısımlarında da metal oranı çeşitlilik gösterir. Yapraksı likenlerdeki metal yükü dalsı likenlerden daha çok bulunmuştur. Likenlerdeki yapı yüzeyinin karakteri de (müsilaj, siller, tüyler, delikler ve pürüzler gibi) parçacık tutulmasını etkilemektedir [5].

Likenlerden alınan kesitler, genel olarak merkezi bölgelerin kenarlara göre daha fazla metal içerdiğini göstermiştir. Yine çeşitli Parmelia türlerinde, iç kısımların dış kısımlara göre Fe, Pb, Zn, Mn, Cr ve Al ortalama içeriği daha yüksek bulunmuştur. Likenin yaşı metallerin tutulmasında etkilidir [5]. Örneğin, kayacıl yapraksı likenlerde, iç kısımlar daha yaşlı, kenarları ise gençtir. Diğer taraftan liken yapısının metal içeriğine, çevrenin katkısı da önemlidir. Likenlerin üzerinde geliştiği substrat, metalik kayalar ve metal içerikli topraklar, likenin metal içeriğinin belirlenmesinde göz önüne alınmalıdır. Kulikova vd. tarafından 2003–2007 döneminde yapılan çalışmada, Baykal Gölü'nün kayalık kıyı bölgesinden, 1,5 m derinlikteki kayaları yoğun olarak kaplayan liken türleri toplanmış ve kimyasal içerikleri incelenmiştir [23].

Birçok likenolog, sucul ve karasal ekosistemlerde havadaki cıva (Hg) toksik metalini izlemek üzere likenlerde Hg alımının belirlenmesi için volkanik ve jeotermal alanlarda ve madenlerde çalışmıştır. Şehirleşmiş ve endüstriyel bölgelerde havadaki Hg izlenmesinde yine likenler yol gösterirler [5].

Likenler, yağmur sularından metal iyonlarını “hücre-dışı” emme yoluyla alırken H<sup>+</sup> iyonlarını veya zayıf bağlanmış metal iyonlarını bırakarak iyon değişimini gerçekleştirirler.

Ölü biyokütle, bakteriler, ipliksi mantarlar, algler ve daha yüksek bitkiler gibi çeşitli tipte organik materyaller karboksil, aldehit, hidroksil, sülfidril, fosforil veya amin gruplarına bağlı metaller içerirler.

Metal bağlamada pH etkisinin de olduğu görülmüştür. Örneğin bir çalışmada [24], kuru liken örnekleri farklı yoğunluklardaki metallerle karıştırılarak nitrik asit ve amonyum hidroksit ile pH, 2–10 arasında ayarlanmıştır. Sulu asit çözeltilerinde metal iyonları hücre duvarlarına bağlanmak için H<sup>+</sup> iyonları ile yarışa girmiştir. Metal bağlamanın en yüksek düzeye pH 4 değerinde ulaştığı belirtilmiştir.

“Hücre-içi” metal alımın ise hücre-dışı metal alımının tersine çok daha yavaş ve az olduğu Ramalina’da Bakır (Cu) için [25] ve Peltigera’da Kadmiyum (Cd) için [26] yapılan deneylerde gösterilmiştir. Hücre-içi metal alımının ışıkta uyarıldığı ve metabolizmayla yakın ilişkili olduğu görülmüştür. Likenlerde karanlıkta hücre-içi Cd alımının çok hızlı şekilde azaldığı belirtilmiştir. Hücre-içi alım aynı zamanda liken türüne bağlıdır.

Elementlerin liken içindeki yerleri SEM (Scanning Electron Microscope) ile EDX (Energy-Dispersive X-ray) analizi ile görüntülenmekte ve nicel bilgi sağlanmaktadır. Farklı türlere ait likenler TEM (Transmission Electron Microscope), SEM ve EDX ile incelenmiş ve Cu ve Zn gibi metallerin farklı kısımlardaki hücrelerinde buldukları görülmüştür.

X-ışını mikroanaliz uygulamaları Fe birikmesinin bazı likenlerde üst korteksi (kabuğu) kaplayan bir dış kabuk oluşturduğunu ve birikmenin üst kabuktan alg tabakasına, merkeze ve alt kabuğa doğru gitgide azaldığını göstermiştir [27].

### 3. BİYOİZLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Dünyada hızla artan nüfus, sanayi, endüstri, tarım ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte, kaçınılmaz olarak çevresel kirlilik artmaktadır. Atmosferik kirlenmenin fark edildiği yerleşim alanlarında, kirlenme tiplerine ve düzeylerine bağlı olmak üzere, bölgesel olarak uygulanan çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve bazıları daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır.

Biyolojik yöntemler yoluyla ölçülebilir, uzun vadeli, ucuz ve güvenilir sonuçlar alınabileceği düşüncesinin ortaya çıkmasından sonra çevre kalitesinin izlenmesi üzerine

yapılan çalışmalar giderek çoğalmıştır. Büyük şehirlerde ve endüstriyel bölgelerde sınırlı olan hava kirliliği ölçüm istasyonları günlük olarak parçacık maddeleri ve SO<sub>2</sub> yoğunluğunu kaydetmektedir ancak orta derecede kirlilik olan yerlerde genellikle bu ölçümler yapılmamaktadır.

Çok yavaş büyüyen, çok uzun yaşayan ve çevreleriyle az çok denge kurabilen likenlerin, hava kirliliği düzeyi ölçümünde, belli bir zaman diliminde yapılan nicel kimyasal ölçümlerden çok daha iyi bir gösterge olabilecekleri görüldüğünden, hava kirliliğinin ölçüm ve değerlendirilmesinde kirlenmelerin bitkilere olan etkilerinin düzeyini belirleme yaklaşımı, önemli bir seçenek konumuna gelmiştir. Niteliksel yöntemler likenlerin bölgedeki tür sayısı, yayılış haritaları ile hava kirliliği hakkında bilgi verirken, türlerin varlığı ve sıklığının derecesinin rakamsal anlatımıyla sayısal yöntemlere de dönüştürülebilir. Ortamdaki kirlenmeler likenler üzerinde kalıcı yapısal ve fiziksel zararlar oluşturur.

Bazı zararlar ise uzun dönemde veya tekrarlanan kirlilikle karşılaşmalarından sonra gelişir ki bunlar dokulardaki hasarlardan daha çok, türlerin büyümesinde yavaşlama ve strese bağlı bozukluklar şeklinde olur.

Likenle biyoizleme yöntemleri, uygulamanın amaç ve içeriğine göre sınıflandırılabilir. Huckaby’e göre [28] nicel olarak havadaki kirlenmelere likenin vereceği yanıtın belirlenmesi ve duyarlılığının değerlendirilmesi için iki yönteme başvurulabilir: Gradient (derecesel) inceleme çalışması ve dumanlama çalışması. Derecesel incelemede, genellikle bir kirlilik kaynağı üzerinde çalışılır ve kirliliğe bulaşmış likenlerdeki kirlilik derecesine bağlı olarak görülen zararlar ile ölçülebilir çevresel etkiler ve bunların derecelerine bakılır. Likenler en doğru olarak kendi çevre koşullarında incelenebilir çünkü sadece hava kirliliği değil iklim ve substrat gibi diğer koşullar da onları etkiler.

Dumanlama çalışması ile ise, likenlere, laboratuvarında, denetlenen şartlar altındaki kapalı bir sistemde kirlenmeler uygulanarak likenlerin fiziksel ve kimyasal ölçülebilir tepkilerine bakılır.

Bugüne kadar likenlerin kullanıldığı hava kalitesi izleme çalışmalarının kapsamındaki çeşitli yöntemler, esas olarak şu başlıklar altında sınıflandırılabilir:

#### A. Pasif biyoizleme

1. Tüm liken florasını esas alan yöntem (Genel liken çalışması ve Haritalama yöntemi),

2. Biyoindikatör türlerini esas alan yöntem ve IAP yöntemi (Atmosferik Safılık İndeksi/ Index of Atmospheric Purity),
3. Nicel laboratuvar analizleri (Çoklu-element ve Radyonüklid analizleri).

#### B. Aktif biyoizleme

1. Liken nakli (transplantasyon)
2. Denetlemeli dumanlama (fumigasyon),
3. Kültürleme.

Hava niteliğini belirlerken, "aktif yöntemler" denetlenen şartlar altında kirleticilerin doğrudan liken üzerindeki etkilerini izleyerek, "pasif yöntemler" ise liken içinde biriken kirletici oranlarını belirleyerek veya kirleticilerin etkisiyle değişen doğal liken florasını izleyerek sonuca varır [29].

### 3.1 Pasif Biyoizleme Yöntemleri

Pasif yöntemlerden ilk ikisi genel liken florasını oluşturan veya biyoindikatör olarak seçilen türlerin dağılımına dayalı niteliksel bir değerlendirmedir.

Diğeri ise doğrudan düzeyi ölçülmek istenen hava kirleticilerinin liken içindeki oranlarını ve etkilerini saptayabilen niteliksel analizlere dayandırılabilir. Esas olarak bir bölgedeki kirliliğin değerlendirilmesi için ilk iki yöntem tek başına uygulanabileceği gibi bir basamak olarak kullanılıp, sonrasında ya da aynı zamanda niceliksel yöntemlerle birlikte de uygulanabilir. Ancak daha özel alan ve kirletici tiplerinin düzeyleri hakkında sonuç almak için mutlaka içerik analizlerine başvurulmuş pasif biyoizleme yönteminin kullanılması gerekmektedir. Çoklu-element analizleri bunun başında gelmektedir [28].

#### 3.1.1. Tüm liken florasını esas alan yöntem (Genel liken çalışması ve haritalama yöntemi)

Genel liken çalışmasında tekrarlanan çalışmalarla aynı bölgedeki tür dağılımındaki değişim izlenir. Diğerlerine göre daha kolay bir izleme yöntemi olup geniş alanlarda hava niteliğinin zamanla değişimini gösterir. Kareleme yapılarak tür dağılımı haritaları çıkarılır. Klasik tür haritaları yöntemine benzer. Genellikle kabukçul-ağaç kabuklarında yaşayan likenler, eğer yoksa kayacıl-kaya üzerinde yaşayan ve toprakçıl-toprak üzerinde yaşayan türlerle çalışılır. Tüm floraya dayalı olduğu için uzman bir likenolog gerektirir.

Bu yöntem, daha çok geniş bir bölgede hava kalitesinin izlenmesi amacıyla, bir kirlilik kaynağı çevresi için, karmaşık yapıları alanlar ve ekolojik açıdan değişken yerler için uygundur.

"Haritalama yöntemi" veya "yayıllık haritası", birçok araştırmacıya göre, orta ve yüksek derece hava kirliliği olan alanlar için en iyi biyoizleme yöntemidir ve günümüzde de geçerliliğini korur.

İngiltere, Münih ve Paris'te birbirinden bağımsız olarak yapılan gözlemler sonucu 1800'lü yıllarda şehirleşmiş bölgelerde likenlerin ortadan kaybolduğu kaydedilmiştir. Ev ve işyerlerinde ısınmak için kömür yakılması şehirler üzerinde duman bulutları oluşturmuş ve bu hava kirliliği, likenlerin kaybolmasına yol açmıştır. Hemen hemen hiç liken bulunmayan şehir merkezi "liken çölü" olarak adlandırılmıştır.

"Çabalama zonu" bazı türlerin çok az, bazılarının iyi yaşadığı bölgelerdir.

"Normal zon" ise türlerin kirlilikten etkilenmeden yaşadığı bölgelerdir. Bu tür bölge çalışmaları şehirlerin çevresinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Haritalama çalışmaları ve niceliksel teknikler uygulanarak türlerin saptanması ile hava kirliliği ile ilgili toplulukların belirlenmesi çalışmaları hızlanmıştır. Renksiz gaz "kükürt dioksit" ( $SO_2$ ), 1930'larda zehirli bir gaz olarak iyice fark edilmiştir. 1970'lerin ortalarında deneysel çalışmalarla, birçok likenin  $SO_2$ 'ye duyarlılığı görülmüş, bazı liken türleri birçok alanda kaybolurken, kirliliğe göğüs gerebilen türler ise geniş bir alana yayılmıştır [30].

Gilbert, haritalama için tek tek türler yerine gruplamalar kullanmanın daha doğru bir resim ortaya çıkaracağını düşünmüş [13] ve liken türlerinin dağılımı, kirlilik zonlarına göre gruplar şeklinde değişik renkler ile gösterilerek haritalanmıştır.

Wirth ise likenlerin hava kirliliğine duyarlılığının ölçümünde uygulanan yöntemlerin, yalnız bitki türlerindeki değişimlerin izlenmesi yoluyla değil, aynı zamanda likenlerin de gözlemleneceği fitososyolojik bir yaklaşımla ele alınmasını önermektedir [31].

#### 3.1.2. Biyoindikatör türleri esas alan yöntem ve IAP (Atmosferik Safılık İndeksi)

Bu çalışma, hava kirliliğine duyarlılığı bilinen bir veya bir-



kaç liken türünün gelişimi ve diğer değişkenlerin niceliksel yöntemle incelenmesidir.

Bu yöntem; pahalı olmayan, az personelle ve kısa zamanda yapılabilen ve genelden daha güvenilir sonuçlar veren, yalnız belirlenen türde birkaç gösterge likeninin (özellikle dalsı ve yapraksılar) sahada, zamana bağlı gelişimini izler. İleri teknoloji ve karmaşık irdeleme gerektirmez. Ancak, o bölgede hangi türlerin duyarlı gösterge türleri olabileceğinin iyi belirlenmesi gerekir. Bu amaçla kirliliğe duyarlı türlerin doğru seçilmesi için gradient analiz çalışmaları ve dumanlama uygulamaları yapılmaktadır. Liken topluluklarında zamana göre kirliliğe bağlı değişimi kesin ve hassas olarak saptamak amacıyla, ölçümlere dayalı bir yöntem de uygulanabilir. Böylece niceliksel analizlerle türlerin kirliliğe karşı tavırları izlenebilir. Niceliksel analiz çalışmalarında türlere sıklık derecelerine göre değerler verilerek tablo oluşturulur. Bu değerler daha sonra % oranlara çevrilebilir. Ancak bu çalışmaların yorucu olması, yıl içinde sürekli olarak mevsimsel veri toplanması için uzman çalışanlara gereksinim duyulması ve sonuçları etkileyebilecek diğer birçok etken olma olasılığı, bu yöntemin zayıf yönüdür [28].

LeBlanc ve De Sloover tarafından kurulan Atmosferik Safılık İndeksi (IAP=Index of Atmospheric Purity), örnek alandaki liken oluşumuna ve sıklığına dayalı olup ekolojik temelli bir göstergedir [32]. IAP çalışmalarının güvenilirliği, sahada kaydedilen kirliliğe duyarlı türlerin oranı ile arttığından, olabildiğince fazla ağaç incelenmelidir. Ancak, sahadaki toplam tür sayısı düşük ise, daha fazla sayıda ağaç incelenerek bu oran arttırılmaz. Çalışma sonucunda bulunan IAP değerleri bir taslak harita üzerine çizilerek gösterilir [33]. Değerler genellikle IAP aralığına göre gruplandırılır. Tamamlanmış IAP haritası, varsa o bölgenin emisyon noktaları ve hava kalitesi verileri ile karşılaştırılabilir.

Kirlilik düzeylerine göre ayrılan her bir zondaki liken türleri biyoindikatör rol taşır ve doğal olarak bölgeden bölgeye farklılıklar gösterebilir ama bazı genellemeler de yapılabilir. Örneğin, daha duyarlı olmalarından dolayı, özellikle ve çoğunlukla epifitik (bitki üzerinde yaşayan) likenler gösterge olarak kullanılır. "Epifit çölü" olarak nitelendirilen endüstriyel bir alanda ise saksikol diğer adıyla kayacıl (kaya üzerinde yaşayan) türlerin de gösterge olarak göz önüne alınıp alınamayacağı sorgulanmıştır [34]. Buna göre, saksikol gelişen türlerin kortikol (kabukçul) türlerden daha az duyarlı olduğu saptanmıştır.

IAP liken indeksi (türün örnek alandaki sıklığı) ile kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) kirlenmesi ilişkisine dayanarak, özellikle liken florası tamamlanmış veya bölgedeki likenlerin türüne yakın tür listeleri ile yayılışları belirlenmiş olan bazı ülkelerde gösterge amaçlı kullanılacak türlerin duyarlılık-sıralamalı cetvelleri oluşturulabilmektedir.

### 3.1.3 Niceliksel laboratuvar analizleri (çoklu-element ve radyonüklid analizleri)

Bir bölgede yayılmış likenlerden biyomonitör olarak seçilen türlerde yapılan analizler, belirli bir zaman aralığında oluşan element birikimini ölçmek ve izlemek için kullanılır. Liken örneklerinde biriken yoğunlukların, havadaki kirlenme oranlarını gösterdiği varsayılır.

Örnekler, yıkanıp üzerindeki tozdan ve diğer maddelerden arındırıldıktan sonra kirlilikten korunarak "öğütme" ve asitte "çözündürme" işlemlerinden geçirilir ve Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi (Atomik Emiş Spektrometresi - Atomic Absorption Spectrometer - AAS) veya Kütle Spektrometresi (ışığın dalga boyu, emilme oranı ve kırılımlarını ölçerek malzemenin incelenmesini sağlayan aygıt - Mass Spectrometer) gibi aygıtlarda analitik ölçüm yapılır.

Radyonüklidlerle (U, Ra, Sr, Pb gibi radyoaktif elementler) ilgili çalışmalar genellikle sezyum ve uranyum konsantrasyonlarının Gama Işını Spektrometresiyle (Gamma Ray Spectrometer - GRS) ölçülmesiyle yapılmaktadır.

Çernobil nükleer kazasının ardından oluşan radyoaktivitenin etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan birçok çalışmadan, likenlerin radyoaktif kirlenmenin kalıcı etkilerini gösteren önemli biyoindikatör işlevleri olabileceği sonucuna varılmıştır. Türkiye'de ilk yapılan radyoaktif izleme çalışmasında [35], kazadan önce ve sonra çeşitli liken örneklerinde yapılan ölçümlerde, özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde daha yüksek düzeyde olmak üzere tüm örneklerde büyük ölçüde radyoaktif kirlenmenin olduğu görülmüştür.

### 3.2 Aktif Biyoizleme Yöntemleri

Aktif biyoizleme; doğal ortamından alınıp kirliliğinden şüphelenilen bölgeye taşınan likenlerle, orada var olan likenlerin karşılaştırılma incelemeleri yapılarak, havanın niteliğinin gözlemlenmesi işlemidir.

Bazı durumlarda aktif izleme doğada uygulanabilir ya da dumanlama uygulanarak kirlilik kaynağı oluşturulabilir.

### 3.2.1 Transplantasyon (Liken nakli)

Transplantasyon, doğadaki yerinden likeni alıp hava kirliliği izlenecek bölgeye taşımaktır. Transplant örneklerinin kirliliği bölgedeki belirlenen yerlere, yerden yaklaşık 4 m. yukarıya naylon file çanta içinde asılması, "çanta tekniği" olarak adlandırılır.

Rusya'da bir bakır madeni etrafındaki Hypogymnia physodes likeni üzerinde transplantasyon metodolojisi ve kaynağa olan uzaklık etkisi incelenmiştir [36]. Parçacık kaynakları; maden eritme ocağı ve dönüştürücü, yüzdürme atıkları, metal cürufur, yol tozları, toprak üstü ve çevredeki havada asılı parçacıklar olarak belirlenmiş ve hangisinin daha etkin olduğu araştırılmıştır.

### 3.2.2 Denetimli dumanlama

Dumanlama (fumigasyon) çalışması, içinde hava sirkülasyonu olan ama denetimli şartlar altındaki kapalı bir sisteme gönderilen kirleticilerle karşılaştırılan likenlerin ölçülebilir tepkisine bakar. Bu ortamı oluşturmak için, sürekli karıştırılan tank reaktörler, üstü açık kabin, bölmeli kabinler, minyatür küvet kabinler gibi kapalı ve denetlenebilen sistemler kullanılır.

### 3.2.3 Kültürleme

Bu yöntem, kültürü yapılan türlerin daha hızlı çoğaltılarak denetlenen şartlarda izlenen kirliliğin etkilerinin daha kısa zamanda gözlenmesi için tasarlanmıştır. Ancak, likenlerden uzaklaştırılan mantar ve alg ortaklarının, laboratuvar ortamındaki kültür çalışmalarında istenen başarı elde edilemediğinden (belirli bir aşamadan sonra fazla büyüme ve gelişme göstermedikleri için) kirliliğin izlenmesinde henüz etkin olarak uygulanamamaktadır.

Kültür basamakları, önce alg ve mantar ortağının ayrı ayrı kültürleri, daha sonra bunların buluşturulması ile yeni liken biriminin sentezi ve gelişimi şeklindedir. Liken yapısının ve yalıtılan algler ve mantarların kültür yöntemleri, günümüz bilimsel çalışmaları sonucunda geliştirilip daha ileri düzeye taşınabilirse ve bunda başarı sağlanabilirse, likenlerden ilaç etken maddesi de elde edilebilecektir.

## 4. TÜRKİYE'DE YAPILAN, LİKENLE İZLEME ÇALIŞMALARI

Türk araştırmacıların likenle ilgili ilk çalışmaları 1971'de [37] başlayıp 90'lı yıllarda artarak 2000'li yıllarda oldukça hızlanan taksonomik (sınıflandırma) ve floristik (likensis-

tesis) çalışmalarıdır. Yine 2000'den sonra, bazı bölgelerdeki hava kirliliği ( $SO_2$ ) düzeyi ile liken türleri arasındaki ilişkinin değerlendirildiği ve devamında havadan kaynaklı elementlerin (ağır metaller, radyoaktif maddeler gibi) likenlerdeki birikimi ile ilgili biyoizleme yöntemiyle yapılan çalışmalar ve tezler de ortaya çıkmaya başlamıştır. Günümüze kadar artarak gelen hava kalitesini değerlendirmek amacıyla yapılan bazı çalışmalar şöyle sıralanabilir: Yenisoy-Karakaş doktora tezinde Batı Anadolu bölgesinde [38], Uğur vd. Yatağan çevresinde [39], Çiçek ve Koparal Eskişehir bölgesinde [40], Aslan vd. Erzurum'da [41], Mendil ve Tüzen [42] ile Demirbaş [43] Trabzon çevresinde, Aslan vd. Giresun ve Ordu illerinde [44], Çayır vd. Çanakkale ve Balıkesir illerinde [45], Yıldız vd. Ankara'da [46], Duman-Cansaran Karabük'de [47], Kınalıoğlu vd. Samsun'da [48].

Türkiye'de radyoaktif kirleticileri izleme üzerine ilk çalışma, 1992'de Çernobil kazasının etkilerini belirlemek amacıyla Topçuoğlu ve arkadaşları tarafından yapılmış ve liken örneklerinde radyosezyum düzeyi ölçülmüştür [49]. Kazadan 20 yıl sonra ise Doğu Karadeniz bölgesinde Trabzon ve Rize illerinden toplanan liken örneklerinde radyoaktiflik düzeyini tekrar ölçerek önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır [50].

Likenlerle biyoizleme üzerine son 10 yılda yapılan güncel çalışmalardan örnekler verecek olursak; Muğla Yatağan termik santrali çevresinde [51], Düzce ilinde [52], Trakya bölgesinde ve Tekirdağ çevresinde [53], yine benim de içinde olduğum proje kapsamında endüstriyel kentlerimizden olan Kocaeli'de [54] çoklu-element analizleriyle gerçekleştirilmiştir. İstanbul'da ise tez öğrencilerimle birlikte Avrupa ve Asya Yakasında yaptığımız biyoizleme çalışmaları bulunmaktadır [55, 56, 57].

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Liken türlerinin hava kirliliğine ( $SO_2$ ) karşı duyarlılık derecelerinin farklı olduğunun anlaşılmasından sonra, hava kirliliğinin biyolojik olarak ölçülmesi konusunda yapılan çalışmalar ve uygulama alanları giderek artmıştır. Likens yapısında biriken kirleticilerin izlenmesi üzerine geliştirilen çeşitli yöntemler kullanılarak ölçüme dayalı sonuçlar alınabilmektedir. Diğer yandan kirleticilerden olumsuz etkilenen likenlerin yapısında gözlemlenen morfolojik ve fizyolojik bozulmalar da incelenmiştir.

Bu biyolojik izleme yöntemlerinin uygulanmasında tam bir standart olmamasına karşın, doğru seçim yapıldığında, şu anda genellikle büyük şehirler ve endüstriyel bölgeler ile sınırlı olan hava kirliliği ölçüm istasyonlarına ek olarak değişik ortamlarda aynı amaçlarla kullanılacakları görülmüştür. Biyomonitör likenler üzerinde yapılan ölçüm ve incelemeler yoluyla, yalnız kükürt dioksit değil, çeşitli kirleticilerin (iz elementler, ağır metaller, radyonüklidler ve organikler gibi) havadaki yoğunlukları, belirlenmekte ve havanın niteliği dönemsel ve bulunduğu yöreye bağlı olarak izlenebilmektedir.

Hava niteliğinin likenlerle izlenmesi üzerine yapılan çalışmalardan şu önemli sonuçlar çıkarılabilir:

1. Likenin biyolojik yapısal özellikleri havadaki elementleri tutma yeteneği taşımaktadır.
2. Doğru sonuçlara ulaşmak için çalışılan bölgeye en uygun biyoizleme yöntem(ler)inin seçilip uygulanması gerekir.
3. Bir bölgede analiz için seçilen likenlerin, kirletici yoğunluğunu birebir yansıtması beklenirken, aslında, türün etkilendiği çeşitli mikrohabitat, substrat veya iklimsel etkenler ve anlık antropolojik etmenler göz ardı edileceğinden, çok sayıdaki örnekten elde edilen elementlerin ortalama oranlarını almak daha güvenilirdir sonuçlar verebilir.
4. Niceliksel örneklerin toplandığı alanlardaki değişkenlerin değişikliğe uğramadan korunmasında zorluk çekilebileceği için, niteliksel gözlemler de gereklidir. Örneğin bir alandaki liken tür çeşitliliğinin tanımlanması ve liken florasındaki değişikliklerin uzun yıllar boyu izlenmesi, kirlilik düzeyini belirlemede destekleyici veriler sağlayacaktır.
5. Biyoyararlanım, birikim, zehirlilik ve ağır metal arınması için likenlerdeki düzenleyici işleyiş biçimleri üzerinde özenle çalışılması gereklidir.
6. Hava kirliliğinden zarar gören likenlerin tür sayısındaki azalma, önce ondan beslenen veya yuva olarak yararlanan hayvanları, sonra da bununla beslenen diğer hayvanları ve sonunda insanları da olumsuz etkiler. Dolayısıyla, ekolojik besin zincirindeki halkalarda dengenin bozulmasına neden olacaktır.

Sonuçta, çevre ve hava kirliliği ya doğrudan ya da doğal dengenin bozulması sonucunda dolaylı olarak yine in-

sanlara zarar verecektir. Bu bakımdan, kirliliğin bitkilere ve likenlere olan etkilerinin düzeyini niceliksel ve niteliksel olarak belirleme yöntemleri, kirliliğe karşı erken uyarı sistemi olarak kullanılabilir. Biyolojik yöntemler, şehirlerde uygulanan anlık hava kalitesi izleme yöntemlerine ek olarak (örneğin ölçüm yapılmayan/yapılmayan bölgelerde) veya destekleyici olarak önemli katkılar sağlayabilecektir.

Batı Avrupa'da küresel ısınma nedeniyle, özellikle kirliliğin etkisindeki bölgelerde bazı likenlerde artış gözlenirken, bazılarında ise azalma kaydedilmiştir. Liken florasındaki uzun dönemdeki değişikliklerin izlenmesi, gelecek yıllarda iklimsel verilerin birleştirildiği yöntemler uygulandığında, yalnız bölgenin hava kalitesi için değil, küresel ısınmaya karşı da doğanın kirliliğe karşı verdiği yanıtın da izlenebildiği, çok değerli kanıtlar ortaya koyacaktır.

Biyolojik izleme, doğa-çevre-insan ilişkilerinde stratejik bir önem taşır. Pahalı ve anlık ölçümlere seçenек veya destekleyici olarak biyolojik izleyicilerin daha yaygın kullanımı, şehirselleşen ve endüstriyel alan planlamalarında ve hızla gelişen teknolojinin olumsuz etkilerine karşı, özellikle canlı sağlığına zarar verebilecek konularda önlemler alınmasında önemli katkılar sunacaktır.

Türkiye, çiçekli bitkiler ve diğer bitki ve mantar gruplarında olduğu gibi liken çeşitliliği bakımından da zenginlik göstermektedir. Türkiye'de günümüze kadar yaklaşık 1800 kadar liken türü yayınlanmıştır. Henüz liken florası tümüyle tamamlanmamış olsa da oldukça hızlı ilerleyen liken flora çalışmalarının yanında, hava kirliliği veya kalitesinin likenlerle izlenmesi konusunda yapılan çalışmalar da devam etmektedir. Liken türleri belirlenen bölgelerde likenle biyoizleme yöntemleri daha etkin olarak uygulanabilir. Özellikle şehirlerin hava kalitesi hakkında element ve ağır metal, radyonüklid ve kükürt dioksit düzeyleri bakımından likenlerden yararlanılarak yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmakta olduğundan, bu çalışmalar tekrarlandıkça zaman içindeki değişimler de saptanabilecektir.

Bu yazı, 1970'li yıllarda başlayan ilk çalışmalardan günümüze kadar uzanan yaklaşık 50 yıllık bir zamanda biyoizleme konusunda, likenlerin önemini ele alan kapsamlı bir derleme olup, iklimlendirme ve tesisat üzerine çalışan mühendislerin de yararlanabileceği bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

## KAYNAKÇA

1. **Çobanoğlu G.** "The Use Of Lichens For Biomonitoring Of Atmospheric Pollution-Atmosferik Kirliliğin Biyolojik İzlenmesinde Likenlerin Kullanımı", *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(4), 591-613, 2015.
2. **Ahmadjian V.**, "Algal/Fungal Symbiosis, Progress in Phyco-logical Research", *Elsevier Biomedical Press*, Vol. 1, 1982, 79-233.
3. **Winner W.E., Atkinson C.J., Nash T.H.** "Comparisons of SO<sub>2</sub> Absorption Capacities of Mosses, Lichens, and Vascular Plants in Diverse Habitats. Lichens, Bryophytes and Air Quality", *Bibliotheca Lichenologica*, 30, 217-230, 1988.
4. **Nash III T.H.**, "*Lichen Biology*", Cambridge University Press, Cambridge, London, 2008.
5. **Garty J.**, "Biomonitoring Atmospheric Heavy Metals with Lichens: Theory and Application", *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20(4), 309-371, 2001.
6. **Shukla V., Upreti D.K., Bajpai R.**, "*Lichens to Biomonitor the Environment*", ISBN 978-81-322-1502-8 ISBN 978-81-322-1503-5, DOI 10.1007/978-81-322-1503-5, Springer, New Delhi, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2014.
7. **Seaward M.R.D.**, "Use and Abuse of Heavy Metal Bioassays in Environmental Monitoring", *Science of the Total Environment*, 176, 129-134, 1995.
8. **Hutchinson J., Maynard D., Geiser L.**, "Air Quality and Lichens- A Literature Review Emphasizing The Pacific Northwest, USA", USDA Forest Service, <http://gis.nacse.org/lichenair/index.php?page=literature>, 1996.
9. **Poikolainen J.**, "Mosses Epiphytic Lichens and Tree Bark as Biomonitors for Air Pollutants – Specifically for Heavy Metals in Regional Surveys", Academic Dissertation, University of Oulu, Faculty of Science, Department of Biology, Finland, 2004.
10. **Hawksworth D.L., Rose F.**, "Qualitative Scale for Estimating Sulphur Dioxide Air Pollution in England and Wales Using Epiphytic Lichens", *Nature*, 227, 145-148, 1970.
11. **Öztürk Ş.**, "Hemerobik Elemanlar Olarak Likenler", *Türk Liken Topluğ u Bülteni*, 3, 4-6, 2006.
12. **Cislaghi C., Nimis P.L.**, "Lichens, Air Pollution and Lung Cancer", *Nature*, 387, 463-464, 1997.
13. **Gilbert O.L.**, "Further Studies on The Effect of Sulphur Dioxide on Lichens and Bryophytes", *New Phytologist*, 69(3), 605-34, 1970.
14. **Hauck M., Otto P.I., Dittrich S., Jacob M., Bade C., Dörfler I., Leuschner C.**, "Small Increase in Substratum pH Causes the Dieback of One of Europe's Most Common Lichens, *Lecanora conizaeoides*", *Annals of Botany*, 108, 359-366, 2011.
15. **Van Herk C.M.**, "Bark pH and Susceptibility To Toxic Air Pollutants As Independent Causes of Changes in Epiphytic Lichen Composition in Space and Time", *Lichenologist*, 33(5), 419-441, 2001.
16. **Van Herk C.M., Mathijssen-Spiekman E.A.M., de Zwart D.**, "Long Distance Nitrogen Air Pollution Effects on Lichens in Europe", *Lichenologist*, 35(4), 347-359, 2003.
17. **Gauslaa Y.**, "The Ecology of Lobarion pulmonariae and Parmelion caperatae in Quercus Dominated Forests in South-West Norway", *Lichenologist*, 17, 117-140, 1985.
18. **Kermit T., Gauslaa Y.**, "The Vertical Gradient of Bark pH of Twigs and Macrolichens in A Picea abies Canopy Not Affected by Acid Rain", *Lichenologist*, 33(4), 353-359, 2001.
19. **Huckaby L.S.**, "Lichens As Bioindicators of Air Quality", Huckaby L.S. (Ed.), USDA Forest Service General Technical, RM-224, U.S.A. 1993.
20. **Oksanen J., Laara E., Zobel K.**, "Statistical Analysis of Bioindicator Value of Epiphytic Lichens", *Lichenologist*, 23(2), 167-180, 1991.
21. **Backor M., Loppi S.**, "Interactions of Lichens with Heavy Metals", *Biologia Plantarum*, 53(2), 214-222, 2009.
22. **Rosbach M., Jayasekera R., Kniewald G., Thang N.H.**, "Large Scale Air Monitoring: Lichen vs. Air Particulate Matter Analysis", *The Science of the Total Environment*, 232, 59-66, 1999.
23. **Kulikova N.N., Suturin A.N., Saibatlova E.V., Boiko S.M., Vodneva E.N., Timoshkin O.A., Lishtva A.V.**, "Geologic and Biogeochemical Role of Crustose Aquatic Lichens in Lake Baikal", *Geochemistry International*, 4(1), 66-75, 2011.
24. **Akçin G., Saltabaş O., Yeşilçimen F.**, "Biosorption of Heavy Metal From Aqueous Solution by Dried Lichens", *International Journal of Chemistry*, 11(3), 141-146, 2001.
25. **Branquinho C., Catarino F., Brown D.H., Pereira M.J., Soares A.**, "Improving The Use of Lichens As Biomonitors of Atmospheric Metal Pollution", *The Science of the Total Environment*, 232, 67-77, 1999.
26. **Brown D.H., Beckett R.P.**, "Uptake and Effect of Cations on Lichen Metabolism", *Lichenologist*, 16, 173- 188, 1984.
27. **Farkas E., Pátkai T.**, "Lichens As Indicators of Air Pollution in The Budapest Agglomeration II. Energy dispersive X-ray Microanalysis of Hypogymnia physodes (L.) Nyl. Thalli", *Acta Botanica Hungarica*, 35, 55-71, 1989.
28. **Huckaby L.S.**, "Lichens As Bioindicators of Air Quality", Huckaby L.S. (Ed.), USDA Forest Service General Technical, RM-224, U.S.A. 1993.
29. **Hoodaji M., Ataabadi M., Najafi P.**, "Biomonitoring of Airborne Heavy Metal Contamination, Air Pollution - Monitoring, Modelling, Health and Control", Dr. Mukesh Khare (Ed.), ISBN: 978-953-51-0381-3, 2012.
30. **Nash III T.H., Gries C.**, "*Lichens As Indicators of Air Pollution*. In: Hutzinger, O. (ed.) The Handbook of Environmental Chemistry, Vol.4, Part C, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1-29, 1991.



31. **Wirth V.**, "Phytosociological Approaches to Air Pollution Monitoring with Lichens. In: Nash T.H. III (ed.) Lichens, Bryophytes and Air Quality", Bibliotheca Lichenologica, 30, 91-107, J. Cramer, Berlin-Stuttgart, 1988.
32. **LeBlanc F.S.C., De Sloover J.**, "Relation Between Industrialization and the Distribution and Growth of Epiphytic Lichens and Mosses in Montreal", *Canadian Journal of Botany*, 48, 1485-1496, 1970.
33. **Showman R.E.**, "Mapping Air Quality with Lichens, the North American Experience. Lichens, Bryophytes and Air Quality", *Bibliotheca Lichenologica*, 30, 91-107, 1988.
34. **Van der Gucht K., Hoffmann M.**, "The Impact of Air Pollution on The Occurrence of Corticolous and Saxicolous Lichens in The Industrial Area North of Ghent (Belgium)", *Bryology and Lichenology in Belgium*, 12, 111-126, 1990.
35. **Topçuoğlu S., Zeybek U., Küçükcezzar R., Güngör N., Bayülgen N., Cevher E., Güvener B., John V., [35] Güven K.C.**, "The Influence of Chernobyl on The Radiocesium Contamination in Lichens in Turkey", *Toxicol Environ Chem*, 35, 161-165, 1992.
36. **Rinino S., Bombardi V., Giordani P., Tretiach M., Crisafulli P., Monaci F., Modenesi P.**, "New Histochemical Techniques For The Localization of Metal Ions in The Lichen Thallus", *The Lichenologist*, 37(5), 463-466, 2005.
37. **Karamanoğlu K.**, "Türkiye'nin Önemli Liken Türleri", Ankara Eczacılık Fak. Mec. 1, 53-57, 1971.
38. **Yenisoy-Karakaş S.**, "Biomonitoring of Atmospheric Pollutants at Western Anatolia", Doctor of Philosophy, The Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2000.
39. **Uğur A., Özden B., Saç M.M., Yener G.**, "Biomonitoring of Po and Pb Using Lichens and Mosses Around a Uraniferous Coal-Fired Power Plant in Western Turkey", *Atmospheric Environment*, 37, 2237-2245, 2003.
40. **Çiçek A., Koparal S.**, "The Assessment of Air Quality and Identification of Pollutant Sources in the Eskisehir Region Turkey Using Xanthoria parietina (L.) Th.Fr. (1860)", *Fresenius Environmental Bulletin*, 12(1), 24-28, 2003.
41. **Aslan A., Budak G., Karabulut A.**, "The Amounts Fe, Ba, Sr, K, Ca and Ti in Some Lichens Growing in Erzurum Province (Turkey)", *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 88, 423-431, 2004.
42. **Mendil D., Tuzen M., Yazıcı K., Soylak M.**, "Heavy Metals in Lichens From Roadsides and An Industrial Zone in Trabzon, Turkey", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74, 190-
43. **Demirbaş A.**, "Trace Element Concentrations in Ashes from Various Types of Lichen Biomass Species", *Energy Sources*, 26, 499-506, 2004.
44. **Aslan A., Budak G., Tıraşoğlu E., Karabulut A.**, "Determination of Elements in Some Lichens Growing in Giresun and Ordu Province (Turkey) Using Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry", *Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 97, 10-19, 2006.
45. **Çayır A., Coşkun M., Coşkun M.**, "Determination of Atmospheric Heavy Metal Pollution in Canakkale and Balıkesir Provinces Using Lichen (*Cladonia rangiformis*) As A Bioindicator", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 79, 367-370, 2007.
46. **Yıldız A., Aksoy A., Tuğ G.N., İşlek C., Demirezen D.**, "Biomonitoring of Heavy Metals by *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf in Ankara (Turkey)", *J Atmos Chem*, 60, 71-81, 2008.
47. **Duman-Cansaran D., Atakol O., Atasoy İ., Kahya D., Aras S., Beyaztaş T.**, "Heavy Metal Accumulation in *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf from the Karabük Iron-Steel Factory in Karabük, Turkey", *Z. Naturforsch.* 9/10, 64c, 717-723, 2009.
48. **Kınalıoğlu K., Bayrak Özbucak T., Kutbay G.H., Hüseyinova R., Bilgin A., Demirayak A.**, "Biomonitoring of Trace Elements with Lichens in Samsun City, Turkey", *Ekoloji*, 19, 75: 64-70, 2010.
49. **Topçuoğlu S., Zeybek U., Küçükcezzar R., Güngör N., Bayülgen N., Cevher E., Güvener B., John V., Güven K.C.**, "The Influence of Chernobyl on The Radiocesium Contamination in Lichens in Turkey", *Toxicological and Environmental Chemistry*, 35, 161-165, 1992.
50. **Yazıcı K., Ertugrul B., Damla N., Apaydın G.**, "Radioactive Contamination in Lichens Collected from Trabzon and Rize in the Eastern Black Sea Region, Turkey, and a Comparison with that of 1995", *Bull Environ Contam Toxicol.*, 80, 475-479, 2008.
51. **Ölgen, M. K., & Gür, F.** (2012). "Yatağan Termik Santrali Çevresinden Toplanan Likenlerde (*Xanthoria parietina*) Saptanan Ağır Metal Kirliliğinin Coğrafi Dağılışı". *Türk Coğrafya Dergisi*, 57, 43-54.
52. **Bozkurt, Z.** (2017). "Determination of airborne trace elements in an urban area using lichens as biomonitors". *Environ Monit Assess*, 189, 573. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6275-x>
53. **Coşkun, M., Steinnes, E., Coşkun, M., & Çayır, A.** (2009). "Comparison of epigeic moss (*Hypnum cupressiforme*) and lichen (*Cladonia rangiformis*) as biomonitors species of atmospheric metal deposition". *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 82, 1-5. <https://doi.org/10.1007/s00128-008-9491-9>
54. **Yolcubal, I., Akyol, N. H., & Çobanoğlu, G.** (2012). "Biomonitoring of airborne metals using the lichen *Xanthoria parietina* in Kocaeli Province, Turkey". *Ecological Indicators*, 18, 632-643. <https://doi.org/10.1016/j.ecoli.2012.01.024>
55. **İçel, Y., & Çobanoğlu, G.** (2009). "Biomonitoring of atmospheric heavy metal pollution using lichens and mosses in the City of Istanbul, Turkey". *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(11), 2066-2071.
56. **Kurnaz, K., & Çobanoğlu, G.** (2017). "Biomonitoring of air quality in Istanbul Metropolitan Territory with epiphytic lichen *Physcia adscendens* (Fr.) H. Olivier". *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(12), 7296-7308.
57. **Özkök, E.A., Çobanoğlu, G.** "Spatial evaluation of air quality by biomonitoring of toxic element accumulation in lichens in urban green areas and nature parks on the Anatolian side of Istanbul". *Environ Monit Assess* 195, 908 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11496-z>