

Göl ve Göletlerin Restorasyonunda Sedimentteki Fosfor İnaktivasyonunun Rolü

The Role of Sediment Phosphorus Inactivation of Lakes and Ponds Restoration

Akasya TOPÇU

Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, Ankara

Özet: Sucul sistemlere olan aşırı miktarda fosfor girdisi ötrofikasyon sorununu beraberinde getirmektedir. Sedimentler akvatik sistemlerde fosfor kaynağı veya fosfor tuzağı olarak rol almaktadır. Göl ve göletlerin fosfor içeriğini azaltmak için su sütunundan fosforun çökeltilmesi ile uzaklaştırılması ve göl sedimentinden su sütununa olan iç fosfor yüklemesinin indirgenmesi adına fosfor inaktivasyon yöntemleri bir göl restorasyon tekniği olarak uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, akvatik sistemde fosfor içeriğini kontrol amaçlı uygulanan fosfor inaktivasyon yöntemlerinin farklı özellikteki sucul sistemlerde uygulanış şekilleri ve sonuçları özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fosfor inaktivasyonu, Göl ve göletler, Ötrofikasyon, Restorasyon.

Abstract: The input of excessive amounts of phosphorus in aquatic systems brings with it the problem of eutrophication. Sediments play a critical role as a phosphorus trap or phosphorus source in many aquatic systems. Lake sediment phosphorus inactivation method as a lake restoration technique is used to reduce the phosphorus content of phosphorus in the water column and to remove excessive phosphorus from sediment by precipitation on behalf of the reduction of internal phosphorus loading. In this study, the use of application methods and the probable consequences of phosphorus inactivation methods for controlling the content of phosphorus in aquatic systems with different characteristics are precised.

Key words: Phosphorus inactivation, Lakes and ponds, Eutrophication, Restoration.

1. Giriş

Limnolojik, ekotoksikolojik ve akvatik kirlilik programlarının ana unsurlarından biri olan sedimentler; göl tipi ve göl çevresi hakkında geniş bilgi verir. Sedimentler göllerdeki fosfor dolaşımında fosfor tuzağı veya fosfor kaynağı olarak rol oynarlar. Su gövdesine giren fosfor inorganik ve organik formda sedimentte birikmekte ve burada geçici olarak etkisiz kalmaktadır. Sistemde bulunan fosfat çıkış suyu ile veya insan müdahalesi ile uzaklaştırılmadığı takdirde sistemde kalacaktır.

Fosfor sedimentten aerobik veya anaerobik koşullarda serbest bırakılabilir; bu mekanizma özellikle sığ ve tabakalaşmayan göller için önem taşır. Sedimentin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sediment ve sedimentin hemen üst bölümündeki su arasında fosfatın değişimi için önemlidir. Pekçok gölde yıllık fosfor yüklemesinin önemli bir bölümü sedimentte birikir yani depolanır.

Sucul sisteme olan bu şekildeki iç fosfor yüklemesi ile gölün besin seviyesince zenginleşmesi ve muhtemel alg patlamaları ortaya çıkmaktadır. Sistemdeki iç veya dış yüklemenin azaltılması ile besin konsantrasyon miktarı büyümeyi sınırlayıcı seviyeye düşmekte ve bu şekilde alg patlamaları önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Besin elementince dış yüklemenin yüksek olduğu durumda, göl

suyu hızlı bir şekilde yenilediğinde ve sedimentten göl suyuna besin elementi geçişi sınırlandığında gölün besin seviyesinde hızlı bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Fosfor inaktivasyonu sedimentten akvatik sisteme olan iç fosfor yüklemesini azaltabilme amaçlı bir göl restorasyon tekniğidir. Bu tekniğin amacı, gölün fosfor içeriğini azaltmak için su sütunundan fosforun çökeltme ile uzaklaştırılması ve göl sedimentinden su sütununa olan iç fosfor yüklemesinin fosfor inaktivasyonu yöntemi ile azaltılmasıdır. İnaktivasyon işlemi için genellikle alüminyum tuzları, alüminyum sülfat (alum), sodyum alüminat ya da her ikisi birden, fosfat iyonunu bağlayarak alüminyum fosfatı oluşturmak için su sütununa ilave edilmektedir.

Fosfor inaktivasyonu, yararlı besin elementleri ihtiyacını önemli ölçüde azaltarak alg biyomasının uzun süreli kontrolünü sağlamaktadır. Algisitler sucul sisteme doğrudan toksik etki yaratmaktadır ve etkinlik süresi yalnızca su sütunu için ancak uygulandığı kısa dönem ile sınırlı kalmaktadır. Fosfor inaktivasyon amaçlı kullanılan algisitler akvatik sistem üzerine yalnızca birkaç gün için etkili iken, alüminyum tuzlarının kullanımı ile, etki süresi ayları bulabilmektedir (Cooke et al., 1993a).

Bu çalışma ile sucul sistemlerde iç fosfor yükünden kaynaklanan kirlilik sürecinde restorasyon tekniği olarak kullanılan fosfor inaktivasyon uygulamalarının uygulama miktarı, düzeyi ve uygulanış şekilleri yanı sıra konuya ilişkin araştırmalar özetlenmiştir.

2. Fosfor İnaktivasyonunda Kullanılan Kimyasal Maddeler

Alüminyum, demir ve kalsiyum bileşikleri içme sularının arıtımı amacıyla uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bugün ise atıksu ve içme suyu arıtımında kullanılan en temel element alüminyumdur. Alg patlamalarının kontrolü için nehirlerle ve göllere alüminyum sülfat ilavesi (alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) ilk olarak Lund (1955) tarafından önerilmiştir. Alüminyumun yanısıra, demir ve kalsiyum da göllerdeki fosfor döngüsünün kontrolü adına önemli elementlerdir (Cooke et al., 1993a).

Sedimentteki fosfor miktarını azaltmak ya da elimine etmek için fosfor inaktivasyon işlemi yapılmaktadır. Sedimentteki fosfor $Al(OH)_3$ 'e sıkıca bağlıdır ve bu bileşik redoks değişimlerine karşı oldukça duyarsızdır, bu nedenle restorasyon işlemleri büyük bir dikkat ve titizlikle yapılmalıdır.

Sucul sistemde fosfor inaktivasyonu için en çok kullanılan alüminyum bileşiği alüminyum hidroksittir. Bu bileşiğin tercih edilmesindeki neden göl restorasyonu açısından biyotaya hemen hemen hiç toksik etki yaratmamasıdır. Bu bileşik inorganik fosforun oldukça fazla miktarını bünyesinde tutmakta ve fosforun göl suyuna salınımını engellemektedir. Göl sedimentindeki düşük oksijen miktarları bir yandan iyonların eriyebilirliğini olumsuz yönde etkilerken, bir yandan da fosfor salınımını teşvik etmektedir. Alüminyum iyonları demir ile karşılaştırıldığında, göl ortamında pH'daki artışı takiben aşırı miktarda fosfor salınımının gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu bağlamda sucul sisteme alüminyum uygulaması ile sediment üzerinde $Al(OH)_3$ oluşturarak fosforun su içerisine geçişini önlemesi ve böylece iç yüklemenin azalması gerçekleşmiştir. $Al(OH)_3$ oluşumu su sütunundan fosforla birlikte partiküler organik ve inorganik maddenin de uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. $Al(OH)_3$ oluşumu ancak pH 6-8 arasında gerçekleşmektedir (Cooke et al., 1993 a).

Fosfor demir ve kalsiyum bileşiklerine bağlanarak da göl suyundan uzaklaştırılabilmektedir. Bu bileşiklerin çözünürlüğü ve fosforun bu bileşiklere bağlanması da pH ve redoks değişimlerinden etkilenmektedir. Besin seviyesince verimli göllerde olduğu gibi sığ göl sedimentlerinde de anoksik (oksijensizlik) durum çok çabuk oluşmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, demir ve kalsiyum bileşiklerinin fosfor inaktivasyonu için kullanıldığı durumlarda sucul sistemde havalandırma ve karışım yapılması gerektiği belirlenmiştir (Cooke et al., 1993 a).

Sedimentte fosfor inaktivasyonu amaçlı alüminyum tuzlarının sucul sisteme ilavesi hidrojen iyonlarının oluşumuna ve pH'nın düşmesine neden olmaktadır. Bu duruma koşut olarak alkalinite de azalmaktadır. Sonuç olarak yüksek konsantrasyonda eriyebilir ve toksik özellik taşıyan alüminyum türleri oluşmaktadır (Cooke et al., 1993 a).

3. Fosfor İnaktivasyonu İçin Kullanılacak Madde Miktarının Saptanması ve Uygulama Teknikleri

3.1. Alüminyum

Göllerde fosfor konsantrasyonu kontrolü için metal tuzlarının kullanımına ilişkin iki farklı teknik bulunmaktadır: ilki su sütunundaki fosforun çöktürülmesi ikincisi ise fosfor inaktivasyonu ile sedimentten fosfor salınımının kontrolüdür (Cooke et al., 1993 a).

Fosforun uzaklaştırılması ya da çöktürülmesi için göl suyuna yeterli miktarda alüminyum ilavesi yapılmaktadır. Sucul sistemden fosfor uzaklaştırılması için düşük miktarda alüminyum yeterli iken, sedimentten fosfor salınımının uzun dönem kontrolü için bu miktar yeterli olmamaktadır. Fosfor fraksiyonlarından çözünmüş organik fosfor fraksiyonu akvatik sistemden tamamen uzaklaştırılmamaktadır. Çünkü alg asimilasyonu ve büyümesi için gölde çözünmüş organik fosfor fraksiyonunun bulunması gerekmektedir (Cooke et al., 1993 a).

Kennedy (1978) adlı araştırmacı fosfor salınımını en iyi şekilde kontrol altına almanın fosfor inaktivasyon tekniği olduğunu bildirmiştir. Araştırmacıya göre, uygulama süresi göl sedimentindeki alüminyum hidroksit konsantrasyonu ile ilişkilidir ve ilave edilen fosfor uzaklaştırıcı miktarı hesaplanırken biyotaya verilen zarar da göz önünde bulundurulmalıdır (Cooke et al., 1993 a).

Burrows (1977) adlı araştırmacı, sudaki alüminyum formunun pH'dan önemli ölçüde etkilendiğini belirtmiştir. pH 6-8 arasında olduğunda alüminyumun çoğu alüminyum hidroksit olarak katı formda bulunmakta, pH 6'nın altına düştüğünde ise, $Al(OH)_2^+$ ve Al^{+3} gibi diğer türler oluşmaktadır. Bu formların değişken özellikte toksitesi bulunmaktadır (Cooke et al., 1993 a).

Kennedy ve Cooke (1982)'a göre sucul sistemlerdeki fosfor inaktivasyonunda uygulanacak gerekli inaktivant miktarının hesaplanmasında esas alınacak basamaklar (Cooke et al., 1993 a):

- 1) Göl suyu alkaliniteleri yüzeyden dibe doğru bir seri örnekleme yapılarak, pH'nın en son 4,5 olduğu alkalinite seviyesi belirlenmeli,
- 2) Her bir tabaka için miktar belirlenmiştir, burada 50 $\mu gAl/L$ sınır seviyesinden çok pH seviyesi baz alınmıştır. Sistemin pH'sı 6-8 arasında ise, göle ilave edilecek alüminyum miktarı 50 $\mu gAl/L$ 'lik üst sınır seviyesinin üzerinde olmaktadır,
- 3) İnaktivant olarak katı alüminyum yerine sıvı alüminyum kullanılacaksa $alum/m^3$ cinsinden alüminyumun miktarı belirlenmeli,
- 4) Restorasyon amaçlı uygulama gölün tamamına yapılacaksa, göl alanlara bölünmeli ve her bir alandaki hacim ve alkalinite hesaplanmalıdır.

3.2. Alüminyum Tuzları İlavesi

Göl restorasyonu amaçlı alüminyum tuzlarının kullanılması ilk olarak İsviçre'de Langsjön Gölü'nde gerçekleştirilmiştir. Kuru alüminyum sülfat göl yüzeyine tatbik edilmiş ancak daha sonraki çalışmalarda sıvı alüminyum sülfatın daha etkili olduğu saptanmıştır (Cooke et al., 1993 a).

Termal tabakalaşmaya uğramış göllerde uygulama derinliği uygulama için kullanılacak materyale, masrafa, uygulamanın kolaylığına ve muhtemel toksite hakkındaki verilere bağlı olarak

değişebilmektedir. Göl yüzeyine yapılan uygulama daha kolay, daha hızlı, daha az masraflıdır ve fosfor salınımı için litoral bölge sedimentine yapılan uygulama ile birlikte yürütüldüğünde, tüm göl suyunun fosfor presipitasyonuna imkan sağlamaktadır. Ancak yüzey uygulamasının da litoral ve pelajik biyotanın toksiteye maruz kalması ve düşük pH'dan kaynaklanan problemler gibi olumsuzlukları bulunmaktadır. Alüminyum tuzlarına ilişkin yüzey uygulamaları restorasyon adına uzun dönem etkili değildir. Yüzey sularının alkalinitesi hipolimniyon sularından daha düşüktür, bu duruma koşut olarak yüzey sularına yapılan restorasyon uygulaması için daha az alüminyum yeterli olmaktadır (Cooke et al., 1993 a).

Yaz aylarında litoral bölgenin restore edilmesi makrofitler tarafından olumsuz yönde etkilenmektedir ve makrofit büyümesinin sedimente alüminyum ilavesi ile kontrol altına alınacağına dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır (Mesner and Norf, 1997).

Kennedy (1978) ve Cooke et al. (1978) restorasyon amaçlı ilk hipolimniyon uygulamasını Dollar Gölü'nde yapmışlardır. Bu uygulamanın avantajı verilen maksimum inaktivant miktarının fosfor salınımının primer kaynağına doğrudan ulaşabilmesi ve hareketsiz hipolimniyon sularının alüminyum tuzlarını direkt sedimentin içerisine ulaştırmasıdır. Hipolimniyondaki sular epilimniyona göre daha fazla alkaliniteye sahip olduğundan, bu katmana daha fazla alüminyum ilavesi gerekmektedir (Cooke et al., 1993 a).

Sığ ve oksijenli sedimentler iç fosfor yüklemesinin en önemli kaynağını oluşturmaktadır. Ancak bu tür göllerin alüminyum ile muamelesi toksite ve pH'ya yönelik problemlere yol açmaktadır (Shaw and Prepas, 1990; Wetzel, 1990).

Sedimentten fosfor salınımını kontrol altına almak için alüminyumla yapılan her türlü uygulama başarılı olmuştur ve sistemin besin seviyesinde bir iyileşme meydana gelmiştir (Cooke et al., 1993 a).

Başarılı bir sediment fosfor inaktivasyonu için şu sorular cevaplanmalıdır:

- 1) Yapılan uygulama sonucunda sedimentten fosfor salınımı en az birkaç yıl için azaltılabilmiş midir?
- 2) Yapılan uygulama gölün fotik zonundaki fosfor konsantrasyonunu düşürmüştür müdür?
- 3) Yapılan uygulama sonucu biyotadaki canlılar zarar görmüş müdür?

Laboratuvar koşullarında sedimentten fosfor salınımı çalışmaları ancak ilk soruyu yanıtlamak için kullanılır. İkinci soru gölün fosforca zengin hipolimniyonunun ışığın geçtiği katman için önemli bir fosfor kaynağı olduğunu yanıtlamaktadır. Sonuç olarak karışıma uğrayan göllerde ikinci sorunun cevabı alınmamaktadır ((Cooke et al., 1993 a).

3.3. Demir ve Kalsiyum

Göl ve göletlerde fosfor inaktivasyonu ya da fosfor presipitasyonu için kullanılan demir ve kalsiyum alüminyum kadar temel değildir ve uygulama miktarına ilişkin fazla bilgi bulunmamaktadır (Cooke et al., 1993 a).

4. Konuya İlişkin Farklı Göllerde Yapılan Çalışmalar

Anoksik hipolimniyonu olan sedimentlerden iç fosfor yüklemesi de önemli bir besin kaynağıdır. Sert sulu olan Mirror ve Shadow göllerine olan drenajın yön değiştirmesinin ardından iki yıl sonra göllere restorasyon amaçlı alüminyum uygulaması yapılmıştır. Göllere uygulanan inaktivasyon işleminden sonra suyun berraklığı artmış ve klorofil miktarında bir düşüş tespit edilmiştir (Cooke et al., 1993 b).

Göl ve Göletlerin Restorasyonunda Sedimentteki Fosfor İnaktivasyonunun Rolü

Dimiktik göllerden West Twin Gölü'nde hipolimnetik fosfor inaktivasyonuna yönelik bir araştırma yürütülmüş ve bu göle 200 m mesafedeki East Twin Gölü de kontrol olarak seçilmiştir. Her iki göl de oldukça küçük, sığ, dimiktik ve yaz rüzgarlarından kıyı bölgesindeki ağaçlar sayesinde korunaklıdır. Göllerin her ikisi de oldukça yoğun mavi-yeşil alg patlamalarına ve yüksek seviyede koliform bakteri seviyelerine sahiptir. West Twin Gölü'nün hipolimniyonuna alüminyum uygulaması yapılmış ve sonrasında iç fosfor yüklemesinin azalacağı tahmin edilmiştir. Alüminyum uygulaması hipolimniyonun fosfor konsantrasyonunu azaltması açısından oldukça etkili olmuştur. Hipolimniyon fosfor konsantrasyonu 14 yıl kadar düşük seviyede kalmıştır. Makrofit bolluğu ve dağılımı hızlı bir biçimde artmıştır bu durum ise suyun berraklaşmasına bir cevap olarak gelişmiştir. Yoğun makrofit topluluğunun üstesinden gelmek için ise hasat metodları uygulanmıştır (Cooke et al., 1993 b).

Yumuşak sulu göllerde fosfor inaktivasyonu için alüminyum tuzlarının kullanımı pH düzeyinde bir düşüşe ya da biyotaya olan toksik etkilere neden olabilmektedir. Kezar Gölü sığ, 4mg CaCO₃/L düzeyinde alkaliniteye sahip yumuşak sulu ötrofik bir göldür ve mavi-yeşil alg patlamaları zengindir. Göle gelen atık su deşarjı dış yüklemenin %71'ini elimine etmek için uzaklaştırılmıştır. Göle olan iç fosfor yüklemesi atık su deşarjının yön değiştirmesinden sonra artarak alg patlamalarını arttıracak düzeyde yüksek bulunmuştur. Göle restorasyon amaçlı yapılan alüminyum uygulamasından sonra hipolimniyondaki fosfor konsantrasyonu hızlı bir biçimde düşmüştür. Epilimniyondaki klorofil konsantrasyonu düşmüş ve seki derinliği artış göstermiştir. Ancak 5 yıl içerisinde her iki değer de tekrar yükselerek ötrofik göllerdeki düzeye çıkmıştır (Cooke et al., 1993 a).

Morey Gölü dağlık ve ormanlık bir alanda bulunan geniş, derin ve orta düzeyde alkaliniteye sahip bir göldür (TP=40 µg/L). Besince zenginleşerek ötrofik özellik kazanması dış yüklemekten çok hipolimniyondan olan iç yüklemekten kaynaklanmıştır. Hipolimniyona alüminyum ilavesi yapılarak fosforun sistemden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Göl bu restorasyon işleminin ardından durumunu yaklaşık 5 yıl daha korumuştur; hipolimniyon fosfor konsantrasyonunda bir düşüş gözlenmiş ve seki derinliği artmıştır. Ancak, yapılan restorasyon amaçlı inaktivasyon uygulamasının levreğillerden sarıkuyruk balığının kondüsyon faktörü ve bentik omurgasızların tür bolluğunun azalması üzerine birtakım olumsuzluklar oluşturduğu bildirilmiştir (Smeltzer, 1990).

Karışıma uğrayan göllerde fosfor inaktivasyonunun etkili olmasının nedeni uygulamanın gölün tamamını etkilemesidir. Washington'da altı gölde yapılan fosfor inaktivasyonu sonucunda beş gölde başarı sağlanırken, bir gölden sonuç alınamamıştır. Wapato Gölü dışında tüm göllerde uygulama etkili ve yedi yıla kadar uzun süreli olmuştur. Ayrıca bu göllerde klorofil konsantrasyonunda düşüş, seki derinliğinde artış gözlenmiştir. Göllerin tamamında alüminyumun çevre üzerine her hangi bir olumsuz etkisine rastlanmamıştır (Cooke et al., 1993 b).

Yaklaşık 3,7 m derinliği olan sığ, ötrofik ve yumuşak sulu olan Long Gölü *Elodea densa* ile kaplanmış, gölde yüksek düzeyde iç fosfor yüklemesi saptanmıştır. Bu göle 1980 yılında restorasyon amaçlı alüminyum ilavesi uygulanmıştır. Beş yılın sonunda fosfor konsantrasyonu uygulama öncesi seviyesine dönmüş ve iki yıl daha fosfor konsantrasyonu düşmeye devam etmiştir. Göldeki düşük fosfor konsantrasyonu alg biyomasını hızlı bir şekilde düşürürken, seki derinliğini de aynı oranda arttırmıştır. Bu uzun dönemli gelişim sığ göllerdeki fosfor inaktivasyonu için yöntemin geçerli ve önemli bir restorasyon uygulaması olduğunu göstermektedir (Cooke et al., 1993 a).

Rezervuarlar için fosfor inaktivasyonu çok yaygın değildir, çünkü rezervuarlarda yüksek su sütunu konsantrasyonuna neden olan sedimentten kaynaklanan aşırı miktarda besin elementi yüklemesi mevcuttur (Cooke et al., 1993 a).

İç fosfor yüklemesine maruz kalan birçok rezervuarda iç fosfor kaynağının temelini taban suyu ya da litoral zon oluşturmaktadır. Bu tür problemler kontrolü mümkün olmayan yüksek dış yüklemeyle birlikte artış göstermiştir ve birçok rezervuarın bu nedenlerden dolayı fosfor inaktivasyonu için uygun olmadığı belirtilmiştir (Barko et al., 1990).

Birçok gölet ve yüzme amaçlı küçük gölde alg patlamaları meydana gelmektedir. Bu problemin çözümü için en geçerli uygulama sisteme algisit ilavesidir. Bu kabaca etkili olurken May(1974) ve May ve Baker (1978) adlı araştırmacılar alum ya da ferrik alum ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$) ilavesinin alternatif bir çözüm olduğunu önermişlerdir. Bu araştırmacılar fosfor konsantrasyon miktarını 50 $\mu g/L$ 'nin altına düşürmeyi hedeflemişlerdir. Bunun için 50 g/m^3 ferrik alum miktarının yeterli olacağını bildirmişlerdir. Avustralya'da birçok toksik mavi-yeşil alg (*Anacystiscyanea* ve *Anabaena circinalis*) patlaması alum ilavesi ile önlenmiştir (Cooke et al., 1993 a).

Göletlerde alum uygulamaları kilden kaynaklanan bulanıklığın uzaklaştırılması için de kullanılmaktadır. Göletlerde fosfor uzaklaştırılması, inaktivasyonu ya da bulanıklığın giderilmesi için kalsiyum bileşikleri ($CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, $CaSO_4$) başarıyla kullanılmaktadır. Wu ve Boyd (1990) adlı araştırmacılar gölette toplam ortofosfat miktarındaki azalmayı ve sonucunda da fitoplankton bolluğundaki düşüşü $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Uygulamalar ayrıca bulanıklık yaratan kil parçalarının da uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Kanada'daki sert sulu Alberta Gölleri'nde 250 mg/L sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) uygulamasının fosfor konsantrasyonu ve alg biyomasında başarılı bir düşüşe neden olduğu ve uygulamanın etkilerinin iki yaz boyunca sürdüğü bildirilmiştir (Murphy et al., 1989).

Alg patlamaları olan göllere yapılan sönmüş kireç uygulamaları, alum uygulaması ile karşılaştırıldığında daha az toksite problemleri oluşturan ve ucuz bir yöntemdir. Muamele sonrası durumu muhafaza süreci daha kısadır ancak maliyet düşüktür. En önemli tehlike göl pH seviyesinin $Ca(OH)_2$ ilavesinden dolayı önemli düzeydeki artışıdır. Çalışmalar sert sulu göletlere olan kireç ilavelerinin (alg patlamalarının olduğu) bakır sülfat kullanımına nazaran daha etkili, ucuz ve daha az toksik olduğunu göstermektedir (Cooke et al., 1993 a).

Küçük, derin ve dimiktik özellikteki White Lough Gölü'ne ferrik alüminyum sülfat ilave etmiştir. Sıvı ferrik alüminyum sülfat kış boyunca yeterli miktarda fosfor presipitasyonuna olanak sağlayacak seviyede göl yüzeyine uygulanmıştır. Yazın hipolimniyonda gözlenen fosfor salınımı %92 oranında azalmış ancak iki yıl sonra tekrar eski seviyesine dönmüştür. Kullanılan düşük düzeydeki demir ve alüminyum anoksik durumla birleşmiş ve devam eden dış fosfor yüklemesi ise bu uygulamanın etkinliğini sınırlamıştır (Foy, 1985).

Hollanda'daki sığ bir göl olan Groot-Vogelenzang Gölü'nün sedimentine (15-20cm) 100 gFe/m^2 uygulaması yapılmıştır. Laboratuvar çalışmalarına göre, 100 gFe/m^2 oksijenli koşullarda fosfor salınımını kontrol altında tutarken 50 gFe/m^2 uygulaması bu işlem için yeterli düzeyde olmamıştır. Uygulama yaklaşık üç ay etkinliğini korumuş, daha sonra ise rüzgar, fırtına ve dış yükleme ile su sütununun fosfor konsantrasyonu uygulama öncesi durumunu almıştır. Bu sürede sedimentten fosfor salınımının demir tuzları ile uzun süreli kontrolünde başarı sağlanamamıştır. Alum ile fosfor salınımının kontrolünde ise epilimniyondaki fosfor konsantrasyonunda önemli düzeyde azalma gerçekleşmemiştir (Boers, 1991).

Ötrofik ve sert sulu göllerin restorasyonunda karbonat presipitasyonu uygulaması yeni bir göl amenajman tekniğidir. Dimiktik, ötrofik bir göl olan Frisken Gölü'ne sönmüş kireç ilavesi yapılmış, bu şekilde epilimniyondan fosfor presipitasyonu oldukça fazla düzeyde tespit edilmiştir. Uygulama sonrasında seki derinliğinin arttığı, ancak uygulamanın uzun dönemde etkinliğini koruyamadığı

Göl ve Göletlerin Restorasyonunda Sedimentteki Fosfor İnaktivasyonunun Rolü

saptanmıştır. Toksik etkisi olmayan kireç uygulamasının pH seviyesini 10'un üzerine çıkarmadıkça oldukça ucuz, basit ve uygulanışı kolay bir teknik olduğu bildirilmiştir (Murphy et al., 1989).

Sucul sistemlerde fosfor inaktivasyonunda sönmüş kirecin sönmemiş kirece göre fosforu bağlama kapasitesinin fazla olması nedeniyle daha etkili biçimde kullanıldığı saptanmıştır (Babin et al., 1989).

Sert sulu göllerde fosfor presipitasyonu ve inaktivasyonu için bu çalışmalar kirecin alüminyum tuzlarına göre daha etkili bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Alüminyum uygulamalarında uygulanacak miktar, uygulama teknikleri, uygulamanın yapılacağı en iyi mevsimin saptanması, kimyasal mekanizmaları ve uygulama süresi üzerine araştırmaların yapılması gerekmektedir (Cooke et al., 1993 a).

Amerika' da Bay Gölü sediment özellikleri ve forfor inaktivasyonunun araştırılması için 2006 yılında sediment örnekleri kor tüplerle 0-10 cm'lik katmandan toplanmıştır. Gölde fosforun sınırlayıcı element olma olgusundan yola çıkıldığında sedimentten olan fosfor salımındaki azalmanın göl suyunda iyileşme ile karakterize edileceği ortaya konmuştur. Bu araştırma ile sedimentten olan iç fosfor yükünün en aza indirgenmesi için göle yüzey alum uygulaması yapılmıştır. Sedimentten fosfor inaktivasyon uygulamasında su sütununa 8,4 mg Al/L'lik dozun ilavesinin su kalitesindeki iyileşmeye neden olduğu bildirilmiştir (Anonymous, 2006).

Michigan'ın batısında bulunan Spring Gölü'nde sedimentten olan fosfor salınım oranları ve sedimentten olan fosfor salınımını azaltacak alum dozlarının miktarı 2003 yılının yaz mevsimi boyunca araştırılmıştır. Araştırma laboratuvar koşullarında oksijenli su sütunu/alum ilaveli, oksijenli su sütunu/alum ilavesiz, oksijensiz su sütunu/alum ilaveli ve oksijensiz su sütunu/alum ilavesiz koşullarda yürütülmüştür. Sedimentten olan en yüksek fosfor salınımı oksijensiz/alum ilavesiz şartlarda gerçekleşmiştir. Bu araştırma ile alum ilavesinin sedimentten olan fosfor salınımını azaltma yönündeki etkisi ortaya konmuş, alum ile muamele süresinin ne kadar uygulanması gerektiği açıklığa kavuşturulamamıştır (Streinman et al., 2004).

Almanya'da sert sulu tabakalaşmanın olduğu ötrofik Tiefwareensee Gölü'nde iç ve dış kaynaklı fosfor yükünün farklı tekniklerle azaltılması yönünde yürütülen bir araştırmada, sedimentten olan fosfor girdisinin azaltılması kapsamında göle alüminyum ve kalsiyum uygulamaları ile birlikte balıkçılık yönetimi uygulanmıştır. Söz konusu süreç sonunda göl suyu fosfor konsantrasyonunda %80'lik bir azalma gözlenmiş; berraklık, zooplankton biyoması gibi parametrelerde de olumlu yönde bir yanıt meydana gelmiştir. Dış fosfor yükünün azaltılması ile gölün iyileşmesindeki yavaş gelişen yanıt sedimentten olan fosfor yükünün azaltılması yönünde yapılan kimyasal uygulamalara çok daha hızlı cevap vermiştir (Mehner et al., 2008).

Sığ hiperötrofik bir göl olan Sonderby Gölü'nde (Danimarka) restorasyon tekniği olarak göl suyuna alüminyum ilavesi uygulanmıştır. Sonbaharda göl suyuna 11 mg/L alüminyum (31 g Al/m²) uygulama sonrası göl suyu fosfor düzeyinde önemli ölçüde bir azalma ile birlikte uygulamayı takiben sedimentte alüminyuma bağlı fosfor düzeyinde de bir artış meydana gelmiştir. Bu yöntemle iki yıllık uygulama süresi sonrasında iç fosfor yükü %93 oranında başarılı bir biçimde azaltılmıştır (Reitzekl et al., 2005).

5. Sucul Sistemde Fosfor İnaktivasyonunun Etkisine Yönelik Sonuç ve Öneriler

Bazı göllerin restorasyonunda fosfor inaktivasyon yöntemini seçmek oldukça doğrudur. Restorasyon kategorileri şu şekilde önerilmiştir (Cooke et al., 1993 a):

A.Topçu

1) Fosfor inaktivasyonu fosfor yüklemesini önemli ölçüde azalttığından, 75 mg/LCaCO₃'ün üzerinde alkalinite ve yüksek seviyede Si, Ca, SO₄, TOC içeren göllerde biyotaya önemli ölçüde akut ve kronik etki içermeyen etkili ve uzun süreli bir restorasyon yöntemidir.

2) Uzun süreli karışıma uğrayan ya da polimiktik göller alüminyum tuzlarının canlı ortama verilmesinden kaynaklanan önemli problemlerle karşılaşmaktadır. Bu tür problemler uygulamanın litoral bölgeye yapıldığı dimiktik göllerde de ortaya çıkmaktadır. Su tamponlanmış ya da bileşik ajanlar içeriyor ise, alüminyum toksitesi olabildiğince az olmaktadır. Bu esnada dış yükleme miktarı düşük seviyede ise restorasyon uygulaması oldukça başarılı olmaktadır. Sığ ya da derin olan tamponlanmış göllere uygulama yapıldığında da her hangi olumsuz bir etki gözlenmemiştir. Eğer sistemde oksijenli koşullar mevcutsa demir ve kalsiyum tuzlarının kullanımı alüminyum kullanımına alternatif olabilmektedir.

3) Çok yumuşak göllere (<30 mg CaCO₃/L) restorasyon amaçlı alüminyum uygulaması yapılacaksa oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Uygulanacak ilk basamak pH değerini 6-8 arasında tutmak için alümü sodyum alüminat ile tamponlamak olacaktır. Tamponlamanın yanısıra uygulama esnasındaki sızıntılar yumuşak sulu göllerin pH seviyesini 6'nın altına düşürmektedir, bu durum sonucunda ise çözülmüş toksik alüminyum bileşikleri oluşmaktadır. Bu tür sucul sistemlerde sönmüş kireç (Ca(OH)₂) tampon ajan olarak düşünülmektedir. Ayrıca eğer yumuşak sulu göllerde silisyum seviyesi düşükse alüminyum ile muamele önerilmemektedir.

4) Alum ile fosfor inaktivasyonunun uygun olmadığı bazı göller bulunmaktadır. bu tür göllerde şiddetli bir dış fosfor yüklemesi mevcuttur. Çok yumuşak düşük alkalinitesi olan (<20 mg/LCaCO₃) ve asidik özellikteki göllere bu tür fosfor inaktivasyon uygulamaları yapılmamaktadır. Asit yağmurları sistemdeki çözülmüş alüminyum düzeyindeki artışa neden olmaktadır. Yüksek pH (>9-10) seviyesi olan göllerin çözülmüş ve toksik alüminat iyonlarında bir artışa rastlanmıştır.

Fosfor inaktivasyonu sistemde birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir. Uygulama sonrası göllerin seki derinliği dramatik bir biçimde artış göstermekte ve dış yükleme kontrol altında tutulduğu sürece bu özellik uzun yıllar boyunca seviyesini koruyabilmektedir. Cooke et al. (1993 a) tarafından Cooke ve ark. (1978) ve Young ve ark. (1988)'nin araştırmalarını içeren birçok çalışma yapıldığı bildirilmiştir. Söz konusu çalışmalarda restorasyon amaçlı uygulamayı takip eden yıllar içerisinde artan ışık geçirgenliği ile makrofit popülasyonunda bir yükselme tespit edilmiştir. Bu durum ise arzu edilmeyen yoğun alg patlamalarından yoğun makrofit artışına geçilmesine neden olmuştur.

Sediment uzaklaştırılması iç fosfor yüklemesinin azaltılması için kullanılacak bir yöntemdir ancak, iç yüklemenin azaltılması adına sedimentin uzaklaştırılması fosfor inaktivasyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında sediment uzaklaştırılmasında daha uzun dönem iyileşme olmasına rağmen, fosfor inaktivasyonunun bu yönleme göre daha ekonomik ve etkili olduğu tespit edilmiştir (Cooke et al., 1993 a). Sonuç olarak göl ve göletlerin restorasyon amaçlı fosfor inaktivasyon uygulaması öncesi ve sonrasında uzun dönem izlenmesi gerekmektedir. Buna koşut olarak alüminyum tuzlarının biyota üzerine etkisi mutlaka araştırılması gereken bir konudur.

Kaynaklar

Anonymous 2006. Bay Lake Sediment Characterization and Phosphorus Inactivation Study. Environmental Research and Design Inc. Florida.

Babin, J., Prepas, E.F., Murphy, T.P. and Hamilton, H.R., 1989. A Test of the Effects of Lime on Algal Biomass and Total Phosphorus Concentrations in Edmonton Stormwater Retention Lakes. *Lake Reservoir Management*, 5: 129-135.

Barko, J.W., James, W.F., Taylor, W.D. and McFarland, D.G. 1990. Effects of Alum Treatment on Phosphorus and Phytoplankton Dynamics in Eau Galle Reservoir: A Synopsis. *Lake Reservoir Management*, 6:1-8.

Göl ve Göletlerin Restorasyonunda Sedimentteki Fosfor İnaktivasyonunun Rolü

- Boers, P.C.M. 1991. The Influence of Phosphorus on Phosphate Release from Lake Sediments. *Water Resources*, 25: 309-311.
- Cooke, G.D., Heath, R.T., Kennedy, R.H. and McComas, M.R. 1993 b. Change in Lake Trophic State and Internal Phosphorus Release After Aluminium Sulfate Application. *Water Resources Bulletin*, 18: 699-705.
- Cooke, G.D., Welch, E.B., Peterson, S.A. and Newroth, P.R. 1993 a. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. Second edition. 161-209, Florida.
- Foy, R.H. 1985. Phosphorus Inactivation in a Eutrophic Lake by the Direct Addition of Ferric Aluminium Sulphate: Impact on Iron and Phosphorus. *Freshwater Biology*, 15: 613-629.
- Mehner, T., Diekmann, M., Gonsiorczyk, T., Kasprzak, P., Koshel, R., Krienitz, L. Rumpf, M., Schulz, M. And Wauer, G. 2008. Rapid Recovery from Eutrophication of a Stratified Lake by Disruption of Internal Nutrient Load. *Ecosystems*, 11: 1142-1156.
- Mesner, N. and Narf, R. 1987. Alum Injection into Sediments for Phosphorus Inactivation and Macrophyte Control. *Lake Reserv. Manage.*, 3:256-265.
- Murphy, T.P., Prepas, E.E., Lim, J.T., Crosby, J.M. and Walty, D.T. 1989. Evaluation of Calcium Carbonate and Calcium Hydroxide Treatments of Prairie Water Dugouts. *Lake Reserv. Manage.*, 6:101-108.
- Reitzel, K., Hansen, J., Andersen, F., Hansen, K.S. and Jensen, H.S. 2005. Lake Restoration by Dosing Aluminium Relative to Mobile Phosphorus in the Sediment. *Environmental Science and Technology*, 39 (11): 4134-4140.
- Shaw, J.F.H. and Prepas, E.E. 1990. Exchange of Phosphorus from Shallow Sediments at Nine Alberta Lakes. *J. Environ. Qual.*, 19: 249-256.
- Smeltzer, E. 1990. A Successful Alum/Aluminate Treatment of Lake Morey, Vermont. *Lake Reserv. Manage.*, 6: 9-19.
- Steinman, A., Rediske, R. And Reddy, K.R. 2004. The Reduction of Internal Phosphorus Loading Using Alum in Spring Lake, Michigan. *Journal of Environmental Quality*, 33: 2040-2048.
- Wetzel, R.G. 1990. Land-Water Interfaces: Metabolic and Limnological Regulators. *Limnol.*, 24: 6-24.

