

COMU Journal of Marine Sciences and Fisheries

Journal Home-Page: <http://jmsf.dergi.comu.edu.tr> Online Submission: <http://dergipark.org.tr/jmsf>



REVIEW

Application of Models to Eutrophication in Lakes

Serap Pulatsü

Ankara University Faculty of Agriculture, 06110 Dışkapı, Ankara, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0001-5277-417X>

Received: 28.09.2022 / Accepted: 14.11.2022 / Published online: 29.12.2022

Key words:

Lakes
Modelling
Eutrophication
Prediction
Simulation

Abstract: One of the phenomena that causes ecological concerns is lake eutrophication. Lakes are under the threat of water quality degradation and ecological imbalance due to increased anthropogenic activity, particularly in developing countries. In this context, limnologists and environmental scientists have been using numerical modeling in their studies of aquatic ecosystems over the last few decades. Ecological models use ecosystem-process interactions to simulate future management scenarios and evaluate the system's response to eutrophication. Utilizing ecological models has made it simpler than ever to estimate and manage lake eutrophication. However, due to lake-specific issues, the models are becoming increasingly detailed. In this review; a) The model types used in eutrophication-focused modelling studies were summarized b) Model utilizations based on different eutrophication elements and events were highlighted via several recent national and international studies.

Anahtar kelimeler:

Göller
Modelleme
Ötrofikasyon
Tahmin
Simulasyon

Göllerde Ötrofikasyona İlişkin Model Uygulamaları

Öz: Göllerin ötrofikasyonu, günümüzde ekolojik endişe yaratan olgulardan biridir. Göller özellikle gelişmekte olan ülkelerde artan antropojenik faaliyetler nedeniyle su kalitesinde bozulma ve ekolojik dengesizlik sorunuyla karşı karşıyadır. Bu bağlamda, son birkaç on yıldır limnologlar ve çevre bilimcileri, sucul ekosistemlerin bu sorununa yönelik çalışmalarında, sayısal modellemeyi bir araç olarak kullanmaktadır. Ekolojik modeller, ekosistem proses-etkileşimlerini, geleceğe yönelik yönetim senaryolarını simüle etmek ve ötrofikasyona karşı sistemin tepkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ekolojik modellerin kullanımı ile göllerde ötrofikasyonun tahmini ve kontrolü eskiye göre daha kolay hale gelmiştir. Ancak göllere özgü sorunlar nedeniyle modeller giderek daha ayrıntılı bir formata bürünmeye devam etmektedir. Bu derleme çalışmasında; a) Ötrofikasyon odaklı modelleme çalışmalarında kullanılan model tipleri özetlenmiş b) Farklı ötrofikasyon unsurlarını ve olaylarını esas alan çeşitli model kullanımlarına, güncel bazı yabancı ve yerli çalışmalarla dikkat çekilmiştir.

Giriş

Ötrofikasyon, günümüzde sucul ekosistemlerin karşı karşıya kaldığı en zorlu çevresel sorunlardan biridir. Bu sorun aslında, bir su kütlesinin temel besin elementleriyle giderek daha fazla zenginleştiği, yaşlanmaya benzer ekolojik bir süreçtir. Ötrofikasyonun belirtileri arasında primer prodüktivitedeki artış, alg patlamaları, yüksek turbidite ve anoksik koşullar, su kütlesinin dip tabakalarındaki detritus çürümelerinden kaynaklanan balık ölümleri sayılabilir. Ötrofikasyon çeşitli yollarla insan ve hayvanlarda sağlık sorunlarına yol açabilir; özellikle ötrofikasyona uğramış su kütlesinden içme suyu temini, sağlığı tehdit etmektedir. Ayrıca estetik ve ekonomik açıdan da olumsuzluk boyutu söz konusudur. Ötrofikasyonu değerlendirmek için anahtar faktörlerden genellikle toplam fosfor (TP), toplam azot (TN), Secchi Diski derinliği, klorofil-a ve çözünmüş oksijen değerleri dikkate alınmaktadır (Bhagowati ve Ahamad, 2019).

Ötrofikasyon doğal ve yapay kaynaklı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Doğal ötrofikasyon süreci jeolojik zamanda çok yavaş gerçekleşirken, insan kaynaklı (yapay) ötrofikasyon, antropojenik faaliyetlerle büyük ölçüde hızlandırılmaktadır. İnsan kaynaklı ötrofikasyonun hızlanmasında, şehirleşme, tarımsal gübre ve deterjanlardaki artışa paralel olarak sucul ekosistemlere besin elementi girişinin artışı önemli rol oynamaktadır.

Ötrofikasyon sorununa daha iyi bir bakış açısı kazandırarak tahmin gücü yüksek ekolojik modellerin kullanımı, ötrofikasyonla mücadelede yeni bir pencere açmıştır. Bu bağlamda, 1970'lerin ve 1980'lerde istatistiksel model kullanımı ile başlayan girişimler, son yirmi yılda önemli ölçüde "veri güdümlü" modellere doğru evrilmiştir. Bu tür modeller, geçmişte mevcut olmayan ancak göl izleme sistemlerinin günümüzde toplayabildiği

*Corresponding author: spulatsu@agri.ankara.edu.tr

büyük veri kümelerine ihtiyaç duymaktadır. Zaman içerisinde göl modelleri, hidrodinamik ve ekolojik süreçleri birleştirerek disiplin alanını genişletmiş, daha önce uygulanmayan belirli besin elementi ağları modelleri geliştirilmiştir. Adaptasyon ve tür kompozisyonundaki değişimleri dikkate alan yapısal olarak dinamik modeller, göl modelleme çalışmalarında uygulanmıştır. Yapay sinir ağları (YSA'lar) da doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri tahmin edebildikleri için göl ötrofikasyonunu incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu derleme çalışmasının amacı, ötrofikasyonun modellendiği araştırmaların giderek daha geniş bir karmaşıklık yelpazesine doğru evrildiği günümüze kadar olan süreçte dair derli toplu bir bilgi aktarımıdır. Bu amaçla; a) Ötrofikasyon odaklı modelleme çalışmalarında kullanılan model tipleri özetlenmiş b) Farklı ötrofikasyon unsurlarını ve olaylarını esas alan çeşitli model kullanımları, güncel bazı yabancı ve yerli çalışmalar ışığında ele alınmıştır.

Model Tipleri

Modelleme çalışmaları, ağırlıklı olarak geliştirilen modelleme yaklaşımının avantajlarına ve diğer sistemlere aktarılabilirliğine odaklanmaktadır. Ekosistemin matematiksel olarak nasıl temsil edildiğine bağlı olarak, modeller öncelikle ampirik ve mekanik modeller olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Fornarelli vd., 2013).

Ampirik modeller

Veri-odaklı modeller olarak da adlandırılan ampirik modeller, mevcut veri kümelerinden türetilmiştir (Elshorbagy ve Ormsbee, 2006). Esas olarak, tahmin değişkenleri ve ele alınan değişkenler arasındaki istatistiksel ilişkilerden oluşurlar. Ampirik modellerin; ekosistem süreçleri ile verilerin kendileri hakkında çok az ön bilgiye ihtiyaç duyması, az veri ve basit matematik gerektirmesi gibi avantajları söz konusudur. Vanhuet (1992) tarafından bu modellerin; bir grup göl için iyi tahminler verdiği, tek bir göle uygulandığında ise genellikle büyük belirsizliklere yol açtığı belirtilmiştir. Ancak yerinde sensörlere dayalı yüksek frekanslı ölçüm sistemlerinin artan kullanımı nedeniyle, ampirik modellere olan ilgi devam etmektedir.

Bhagowati ve Ahamad (2019)'ın bildirdiği üzere, ilk ötrofikasyon modeli, 1968'de Vollenweider tarafından geliştirilmiştir. Sonraki dönemde ekolojik modellemenin gelişimi, bu çalışmanın bilimsel anlayışına dayanmıştır. Bu konudaki diğer ilk çalışmalar arasında, besin elementleri ve klorofil-a arasındaki ilişkinin bazı Japon göllerinde uygulandığı bir çalışma ile Dillon ve Rigler (1974a) tarafından Kuzey Amerika göllerinde yapılan TP (toplam fosfor) ve klorofil-a arasındaki istatistiksel model yer almaktadır. Ötrofikasyon kontrolünde popülerlik kazanan bir diğer model, Vollenweider modelinin ampirik bir modifikasyonu olan OECD modelidir. Bu model, değişen TP konsantrasyonu ve suyun alıkonma süresi değerlerine sahip 87 göl için test edilmiş ve sonuçlara yönelik korelasyon katsayısı 0,86 olarak bulunmuştur. Daha sonra buna benzer birçok statik yük modeli Chapra ve Reckhow

(1979), Nürnberg (1984), Ahlgren vd. (1988) tarafından kullanılmıştır. Genellikle benzer olan tüm bu statik modeller, gölün tamamen karışık bir kararlı hal reaktörü olduğu ve besin elementlerinin özellikle fosforun, çıkış suyuyla uzaklaştırılan ve sedimentte tutulan miktarını hesaplamak için bir veya birkaç basit denklemin kullanıldığı modellerdir. Bu modellerde dikkate alınan girdi değişkenleri, göle ulaşan besin elementleri (TP konsantrasyonu), suyun alıkonma süresi ve suyun ortalama derinliğidir. Genel çıktı değişkenleri ise, göl suyundaki toplam fosfor ve toplam fosfor tutulumudur.

Fitoplankton konusundaki bazı modeller – çoğunlukla ampirik ve statik olanlar – sadece toplam fosforu (Dillon ve Rigler, 1974a, 1974b; Nürnberg ve LaZerte, 2004) ve/veya toplam azot konsantrasyonlarını (Brown vd., 2000; Reckhow, 1993) dikkate almışlardır. Ayrıca fosfor ve azotun çözülmüş-partiküler fraksiyonları ile azotun farklı fraksiyonları ve nitrifikasyon- denitrifikasyon süreçlerini de dikkate alan modeller geliştirilmiştir (Lindim vd., 2015; Wu vd., 2017). Sedimentten kaynaklanan iç kaynaklı besin elementi yüklemesi, modellerde dikkate alınan bir diğer unsurdur (Wu vd., 2017). Bu tip modellerin etkinliğini artırmak için yeni istatistiksel yaklaşımlar da önerilmektedir. Örneğin, Xu vd. (2015)'de sıradan en küçük kareler regresyonu yerine quantile regresyonun uygulandığı modellerden söz edilmiştir. Freeman vd. (2009)'un çalışmasında, besin elementi ve klorofil konsantrasyonlarını ilişkilendirmek içinse Bayes modeli kullanılmıştır.

Mekanik modeller

Mekanik modeller, süreç-odaklı (Arhonditsis ve Brett, 2005a) veya teorik modeller (Vanhuet, 1992) olarak da adlandırılırlar. Bu modellerin çoğu, biyojeokimyasal süreçleri ayrıntılı olarak tanımlayan ve çözümleri sayısal yöntemlerle elde edilen bir dizi diferansiyel veya fark denkleminde oluşur. Mekanik modeller birçok göle uygulanmış olup, bunların ekosistemlerin yersel-zamansal dinamiklerinin araştırılmasına olan katkıları yaygın olarak kabul edilmektedir. Örneğin, oksijene yönelik modellerin çoğu mekaniktir (Antonopoulos ve Gianniu, 2003).

Dinamik modeller

Çoğu mekanik model dinamiktir. Ötrofikasyonu incelemek için göllerde yaygın olarak kullanılan altı karmaşık dinamik modelin avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de sunulmuştur (Anagnostou vd., 2017).

Malmaeus ve Hakanson (2003), göl suyundaki askıda katı madde (AKM) tahmini için dinamik bir model önermişlerdir. Modelde girdi suyu, iç kaynaklı üretim, sedimentasyon, taşınım, erozyon, tekrar süspansiyon olma, karışma vb. kriterler dikkate alınmıştır. Model, birkaç Avrupa Gölü'ne ilişkin ampirik veri setine karşı test edilmiş ve modelin ampirik veri seti ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Modelin belirsizlik ve duyarlılık analizine göre, alloktan ve otokton AKM oluşumunun nicelleştirilmesi, sedimentasyon ve mineralizasyon gibi dahili süreçlere kıyasla oldukça belirsizdir.

Tablo 1. Farklı dinamik modellerin karşılaştırılması (Anagnostou vd. (2017)'den alıntılanmıştır)

Model uygulamaları	AQUATOX	CAEDYM	CE-QUAL-ICM	EFDC	MIKE3FM-ECOLAB	WASP
Avantajları	Esnek yapısı duyarlık analizleri kapsar. Mevsimsel makrofit büyüme- ölümlerini dikkate alır ve dekompozisyon süreci, besin elementleri döngüsü, detritus ve oksijen konsantrasyonlarını etkileyebilir. Bazı trofik düzeyleri ve tekrar mineralizasyon için sediment diagenesini dikkate alır.	Esnek bir modeldir. Zooplanktonun fitoplankton üzerindeki otlama baskısını simüle eder.	Bentik-sediment diagenesisi kapsar.	Sediment diagenesis modülünü içerir.	Nispeten büyük alanları tanımlamaya uygundur.	Çoğu su tipi için kullanılabilir. Modüller bir yapıya dayanır. Tekrar mineralizasyon için sediment diagenesis modelini kapsar.
Dezavantajları	İnorganik kirleticileri dikkate almamaktadır. Metal veya organometallere uyarlanamayabilir.	Sediment diagenesisi, metaller veya toksik metalleri dikkate almaz.	Bakteri sayısı modülünü dikkate almaz.	Zooplankton ve detritusu kapsamaz. Fazla arazi verisine gerek vardır.	-	Bahar ve yaz aşırı alg üremeleri için tahmin edilemez bir biyolojik unsur içerebilir. Model denitrifikasyonu kapsamamakta ve sedimentle ilgili modifikasyona ihtiyaç bulunmaktadır.

Bir-üç boyutlu (1B-3B) modeller

Birleştirilmiş modellerin yersel boyutu sıfırdan (kutu modeller) üçe kadar değişmektedir. Bir göl veya bir göl içindeki her bir kutunun su kütlesi, tamamen karışık karıştırılmalı bir tank reaktörü olarak temsil edilmektedir. Bir kutu modeli tek başına gölün yersel heterojenliğini açıklayamadığından, üç boyutlu modellerin (birbirine bağlı bir dizi kutu modeli) dikkate alındığı ifade edilmiştir (Muraoka ve Fukushima, 1986).

Dikey boyutlu bazı modeller termal tabakalaşmayı; epilimniyonu bir kutu ve hipolimniyonu bir kutu kabul eden 2 kutu modelleri kullanarak simüle etmişlerdir (Imboden, 1974; Imboden ve Gächter, 1978). Vertikal bir boyutlu (1B) modellerde, tabakalaşma ve tabaklaşmanın fitoplankton, besin elementleri ve oksijen dinamikleri üzerine etkisi ele alınmıştır. Daha az kullanılan iki boyutlu (2B) modeller ise tabakalaşmanın ihmal edilebileceği büyük fakat sığ sistemler için geliştirilmiştir. Üç boyutlu (3B) modeller de 2000'lerin başında ortaya çıkmış ancak 2010'larda, bilgisayar kullanımının ve yerinde ölçümlerin artması nedeniyle, giderek daha fazla göle uygulanmıştır (Deus vd., 2013; Leon vd., 2011). Ayrıca sediment de besin elementi döngülerinde kilit rol oynayan önemli bir unsurdur. Özellikle 0B modeller-kutu modelleri (Chapra ve Canale, 1991) veya 1B dikey modeller (Chung vd., 2009) sedimente odaklanmıştır. Bu tip modellerde sediment diyajenezi, sedimentin yeniden süspanse olması, sediment- su sütunu arasındaki besin elementleri ve/veya oksijen alışverişi dikkate alınan ana başlıklar olmuştur.

Ötrofikasyonla ilgili farklı ekolojik model uygulamaları

Bu bölüm; birinci maddede belirtilen modellerin yıllar içerisinde geliştirilerek günün ihtiyaçlarına göre ele alınan konuların değişkenlik gösterdiği ötrofikasyon odaklı bazı çalışmaları kapsamaktadır.

Fitoplankton dinamikleri

Fitoplankton dinamiklerini daha iyi anlamayı amaçlayan süreç-odaklı modeller, mevsimsel veya çok yıllık zaman ölçeklerinde dikkate almaktadır. Bu modellerde ele alınan unsurlar; ana fitoplankton gruplarının ve/veya toplam fitoplankton biyokütlesi, toplam klorofil konsantrasyonu, epilimniyonda farklı derinliklerdeki değerler veya ortalama değerler ile fitoplankton patlamalarının fenolojisidir. Bu tür verileri elde etmek için gereken uzun zaman nedeniyle, ölçümler sıklıkla öfotik katmandan veya belirli bir derinlikten toplanan örneklerde yapılmaktadır (Bruce vd., 2006).

Siyanobakteri dinamikleri

Ötrofikasyon ve iklim değişikliğinin alg çoğalmalarını, daha da spesifik olarak siyanobakteriyel çoğalmalarını teşvik ettiğinden 1990'lardan bu yana, siyanobakteriler ötrofikasyon ile ilgili modelleme çalışmalarına konu olmuştur. Hense ve Beckmann (2006) adlı araştırmacılar, siyanobakterilerin dört yaşam evresini dikkate alarak bir model geliştirmişlerdir. Model çalışması, ötrofikasyonun azaltılması ve kontrolü açısından önem taşıyan zararlı siyanobakteri çoğalmasının anlaşılmasına ve tahminine yöneliktir. Araştırma, siyanobakteriyel çoğalmalarının

daha iyi tahmin edilmesi için yaşam döngüsünün tüm aşamalarının bilinmesi gerektiğini ve yalnızca sıcaklık ile P/N oranını dikkate almanın yeterli olmadığını göstermiştir. Siyanobakteri modelleri, yıllar bazında basit regresyon modellerinden (Onderka, 2007) üç boyutlu eşleştirilmiş hidrodinamik ekolojik modellere (Carraro vd., 2012) kadar çeşitlilik kazanmıştır.

Sucul bitkilere ve su kalitesine histerezis tepkisi

Mulderij vd. (2007), su altı makrofitleri ve fitoplankton arasındaki rekabet üzerine odaklanan bir model kullanmışlardır. Modelde gölgeleme etkisi, sedimentin tekrar süspanse olması, besin elementleri için rekabet ve allelopati gibi değişkenler ele alınmıştır. Çalışmada, su üstü bitkisi *S. aloides*'in suda önemli gölgeleme etkisi ve yüksek allelopatik potansiyeli gösterdiği, charofitler içinse allelopatinin oransal katkısı ve gölgeleme etkisinin düşük veya ihmal edilebilir seviyede olduğu bildirilmiştir. Yüzen makrofitlere sahip sığ bir göl için su altı bitkileri ve fitoplankton arasındaki rekabete dair eşitlikler de çalışma kapsamında sunulmuştur.

Çoklu besin elementi döngüleri

Arhonditsis ve Brett (2005a, 2005b) Washington Gölü (ABD)'nün restorasyonu için kompleks çok elementli bir model önermiştir. Model, çoklu besin elementi döngülerini (C, N, P, Si, O) ve farklı fitoplankton-zooplankton çeşitliliklerini kapsamaktadır. Modelde, temel su kalite parametre (TP, TN, DO) ve fitoplankton sonuçları %20'nin altında nispi hata ile simule edilmiş ve belirlenmiş aylık değerlerle uyum sağlamıştır. Yine ötrofik bir su kütlesindeki ekosistem dinamikleri için değişkenler olarak besin elementi konsantrasyonu, alg, zooplankton popülasyonları, detritus miktarı ve çözünmüş oksijen konsantrasyonunun dikkate alındığı bir model önerilmiştir (Misra, 2007). Model sonuçları, besin elementleri temini arttıkça alglerin, diğer sucul türler ile detritus yoğunluğunun arttığına ve çözünmüş oksijen konsantrasyonunda bir azalma gözlemlendiğine işaret etmektedir. Shukla vd. (2008) ise, organik kirleticilerden etkilenen ötrofik su kütlesi için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Organik kirleticilerin kümülatif konsantrasyonu, bakteri, besin elementleri, alg, detritus yoğunlukları ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu modelde dikkate alınan değişkenlerdir. Model analizi hem su kirliliğinin hem de ötrofikasyonun eşzamanlı etkisinin, bu parametrelerin tek başına etkisinden daha çok seviyede çözünmüş oksijeni azalttığını ortaya koymuştur.

Ötrofikasyon modellerinin iyileştirilmesi için çok çeşitli değişkenlerin dikkate alınmasına dair bir başka çalışma Zhao vd. (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Modelde, çoklu besin elementi döngüleri (P, N, Si, C ve O), fonksiyonel fitoplankton grupları (diatomlar, yeşil algler ve siyanobakteriler) ve iki zooplankton grubu (Copepod ve Caladoseralar) yer almıştır. Araştırmacılar tarafından, bu tip modellerde stokiyometrik besin elementleri döngüsüne ait teorik son bilgilerin kullanımının, modelin etkinliği açısından faydalı olacağı vurgulanmıştır.

Mieleitner ve Reichert (2006), farklı trofik durumdaki üç gölde fonksiyonel fitoplankton gruplarını modellemiştir. Araştırmacılar fonksiyonel grup modellemesini, göl ekosistemleri ile özelliklerini anlamada ve ekosistemin farklı besin elementi etkilerine karşı tepkisine karar verme açısından yararlı bulmuşlardır.

Dış kaynaklı besin elementi yüküne tepkiler ve besin elementi ağı etkileşimleri

Danimarka'daki 16 sığ ötrofik gölde, 7-8 yıllık kütle dengesi verilerine dayanarak dış yüklemeye karşı TP konsantrasyonunun mevsimsel değişimlerinin tahminine yönelik ampirik bir model geliştirilmiştir (Jensen vd., 2006). Model, iç yüklemeye nazaran düşük dış kaynaklı yüklemenin söz konusu olduğu erken geri dönüşüm aşamasını tanımlamayı amaçlamıştır. Model sonuçları; tahmini ortalama TP konsantrasyonunun, gözlemlenen değerlere kıyasla ortalama %12 düzeyinde saptığını ve tahmin sonuçlarının dış kaynaklı yüklemeye azalmasını takiben mevsimsel dinamiklerle çok benzeştiğini ortaya koymuştur. Ancak model, bulanık sudan berrak su durumuna geçiş sırasındaki mevsimsel değişimleri tanımlamaya uygun bulunmamıştır. Hakanson ve Bryhn (2008) tarafından "Lake Foodweb" adlı bir model her tür göle uygulanabilen TP için modifiye edilmiştir. Bu model, diferansiyel eşitliklere ve girdi-çıkıtları ile iç kaynaklı salınımların kütle dengesine dayanmaktadır. Model, 41 farklı göl için test edilmiş ve bu modelin sudaki TP konsantrasyonlarını başarılı bir şekilde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Ayrıca model sedimentteki TP, sedimentasyon, zamansal değişimler, yüzey ve dip – sulardaki TP hakkında ek bilgi sunmaktadır.

Zhang vd. (2008), Erie Gölü için iki boyutlu hidrodinamik ve ekolojik prosesleri içeren bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca, çalışmaya zooplankton alt-modelleri ile zebra ve quagga midyelerinin etkisinin nasıl dahil edileceği araştırılmıştır. Model 18 durum değişkenine sahiptir ve kabul edilebilir şekilde doğrulanmıştır. Sonuçlar, dreissenid midyelerinin alg biyokütlesi üzerinde doğrudan otlama etkilerinin zayıf olduğunu göstermiştir. Çin'de şehir içinde bulunan göller için geliştirilen 2-boyutlu ötrofikasyon modeli ise; besin elementleri, fitoplankton ve zooplankton arasındaki etkileşimler ile mevsimsel ve bölgesel su kalitesi değişikliklerini tanımlamaktadır (Li-kun vd., 2017). Model simülasyonu ve saha verileri arasındaki karşılaştırma, modelin hidrodinamik verileri ve ötrofikasyon dinamiklerini makul bir şekilde %11'den daha az bağıl hata ile hesaplayabilmiştir. Sonuçlar, gölün litoralindeki nitrat, fosfat, amonyak ve klorofil-a konsantrasyonunun gölün orta bölümüne göre daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Yağmur sularının yüzey akışları ile göle ulaşmasının da bu duruma önemli katkısı olduğu belirtilmiştir.

Farklı yönetim stratejilerine göl ekosisteminin yanıtı

Evsel ve endüstriyel atık suların su kaynaklarına karışmasının önlenmesi, bazı göllerde 1960'lı yıllarda göl restorasyonu için başarıyla kullanılmıştır. 1972'de ABD ve

Kanada'nın ortak çabasıyla, Erie Gölü'ne ulaşan evsel ve endüstriyel girdinin azaltılması amaçlanmıştır. Yerel yönetim deşarjlarından kaynaklanan fosfor yüklerinin 1985'te %84 oranında azaltıldığı bildirilmiştir (Makarewicz ve Bertram, 1991).

Etki-yük (ELS) duyarlılığı modelleri, çevre bilimlerinde ve göl yönetiminde anahtar rol oynamaktadır. Bu modellerin amacı, işlevselliği tanımlanmış ekolojik etki değişkenlerini, yük ve çevresel duyarlılık değişkenleriyle nicelleştiren tahminler yapmaktır. Doğrulanmış bu modeller, pratik olarak uygulanabilir iyileştirme önlemlerini simüle etmek için bir araç olmakta ve kritik yük, doğal yük ve kılavuz limitler/değerler gibi önemli kavramları tanımlamada kullanılabilir. Bu modeller, göllerde doğrulanmış yüksek tahmin gücüne sahiptir. Göllerdeki civa, radyosezyum ve fosfor için ampirik (statik) ve dinamik (zamana bağlı) ELS modelleri mevcuttur (Hakanson, 2002).

İsveç'te bir gölün ötrofikasyonunu azaltmak için farklı eylemlerin etkileri (besin elementi girdilerinin azaltılması, biyomanipülasyon, herbisit uygulaması) dikey bir boyutlu biyojeokimyasal modelle analiz edilmiştir (Pers, 2005). Simülasyon sonuçlarına göre, gölün iyileştirilmesine yönelik en iyi önlemin, besin elementleri azaltımı ile birlikte biyomanipülasyon uygulaması olacağına işaret edilmiştir. Gürkan vd. (2006), Fure Gölü'nde (Danimarka) restorasyonun etkilerini tahmin etmek amacıyla yapısal dinamik model geliştirmişlerdir. Model, iki yıllık veriler baz alınarak doğrulanmış ve sedimentin havalandırılması ve biyomanipülasyonun kombine etkisinin, bu yönetsel uygulamaların tek başına uygulamasına göre, göldeki fitoplankton ve toplam fosforun azaltılmasında daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Kuzey İtalya'daki 35 alt Alpin gölü üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada (Salerno vd., 2014), toplam referans fosfor girdilerini tahmin etmek için deterministik havza modellerinin gerekliliği vurgulanmıştır. Ancak besin elementi girdilerindeki bir azalmaya karşı ekosistemin kısa vadeli tepkisi için modellerin çok büyük bir belirsizlik düzeyi de söz konusu olmuştur. Ofir vd. (2017) tarafından, Kinneret Gölü'nde (İsrail), 1996'dan 2012'ye kadar gölde uygulanan uzun vadeli biyomanipülasyon programının etkisini görmek amaçlı bir çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar, gölün besin elementleri ağını incelemek için Ecopath modeline dayalı bir zamanlı dinamik model (Ecosim) uygulamışlardır. Model, göl besin elementleri ağının önemli bileşenlerini temsil eden farklı fitoplankton, zooplankton ve balık türlerini dikkate alan toplam 26 gruba kapsamaktadır. Simülasyon sonuçları, gölde uygulanan biyomanipülasyon programının su kalitesini iyileştirmediğini, aksine fitoplankton büyümesinin artmasıyla su kalitesinin bozulduğunu ortaya koymuştur.

Bhagowati ve Ahamad (2019) tarafından yapılan çalışmada, belirli bir süre boyunca besin elementi yüklemesi de belirli miktarda azaltıldığında, gölün trofik durumunun nasıl değişeceği sorusuna yanıt almak mümkün olmuştur. Ayrıca bu modelle sedimantasyon

hızının, sedimentin uzaklaştırılmasının, sistemin orijinal-doğal haline dönebilmesi için gereken zamanın anlaşılmasında faydalı olabileceğine işaret edilmiştir.

İklim değişikliğine ekosistemin tepkisi

Modellerin yaygın bir uygulaması da küresel değişikliklerin, özellikle iklim değişikliğinin olası etkilerinin incelenmesidir. Bilindiği üzere, iklim değişikliği; yağış modellerini, rüzgar hızlarını, güneş radyasyonunu ve hava sıcaklığını etkileyecektir.

Malmaeus vd. (2006), üç farklı gölde uygulanmak üzere mekanik fosfor modeli geliştirmişlerdir. Model sonuçları, göllerin iklim değişikliğine karşı farklı duyarlılıkta olduğu ve bu durumun suyun farklı alıkonma süreleri ile açıklanabileceğini ortaya koymaktadır. Bergamino vd. (2007) ise, Tanganyika Gölü'nün yersel-mevsimsel dinamiklerini göz önünde bulunduran bir modelleme yaklaşımıyla yoğun uzaktan algılamaya-dayalı ölçümleri birleştirmişlerdir. Araştırmacılar, ampirik ortogonal fonksiyon analizini fitoplankton biyomasının benzer mevsimsel ortak-değişim gösteren bölgelerini belirlemek için kullanmışlardır. Çalışma fitoplankton dinamiklerinin iklimsel değişikliklerle olası ilişkisini belirlemek için de gerçekleştirilmiştir. Bulgular ışığında, iklim değişikliklerine karşı gölün yüksek hassasiyette olduğu tespit edilmiş ve değişen iklimsel koşullara karşı büyük göllere yönelik yeni yaklaşımlar da sunmuştur.

Antarktika'daki Crooked Gölü için geliştirilen termodinamik bir modele göre, tatlı su gölü buzu hava sıcaklığından diğer tüm değişkenlerden daha fazla etkilenmektedir. Modelin iklim değişikliklerini takip etmek, farklı iklim değişikliği senaryolarını karşılaştırmak için kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Reid ve Crout, 2008). Yamashiki vd. (2010) tarafından, Japonya'daki Biwa Gölü için MRI-GCM ve BIWA-3B modeli entegre edilerek küresel ısınmanın göl suyu sıcaklığı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, göl suyu sıcaklığına ilişkin iklim değişikliği senaryosu için duyarlılık analizi yapılmıştır. MRI-GCM çıktısından 2099 yılı için, 2002 yılındaki sıcaklığa göre yaz aylarında yüzey sularında önemli bir sıcaklık artışı öngörülmüştür. Ayrıca model bulgularına bakarak, epilimniyonun kalınlığının da yüksek atmosferik sıcaklıklarda artış gösterdiği ve hipolimniyonda biriken ısının göl ekosisteminin ciddi şekilde bozulmasına neden olabileceği belirtilmiştir.

İklim değişikliğinin ekosistemler üzerindeki etkisi özellikle siyanobakterilere odaklanmıştır. Elliott ve Defew (2012) tarafından, iklim değişikliğinin siyanobakteriler üzerindeki etkisine ilişkin on modelleme çalışmasının ana unsurları; su sıcaklığındaki artış, suyun alıkonma süresi ve havzadan olan besin elementleri yüklemesi olarak belirlenmiştir. Araştırmacılara göre, iklim değişikliğinin doğrudan etkileri, temel olarak fitoplankton dinamiklerinin fenolojisi ile ilgili olup yıllık toplam biyokütle miktarı ile çok az ilgilidir. Fitoplankton dizilimindeki bu değişiklikler bazı göllerde azot sınırlaması ile sonuçlanarak azot sabitleyen siyanobakterilerin baskınlığı desteklenmiştir.

Hidrodinamik ve ekolojik süreçlerin entegrasyonu

Elliott vd. (2007) tarafından, Erken Gölü (İsveç) için hidrofiziksel model ve ekolojik modelin birleştirildiği bir model geliştirilmiştir. Araştırma sonucunda, ekolojik süreçlere odaklanan bir modelle hidroloji üzerine olan modelin bir arada olduğu model kullanımının, başarılı sonuçlar verdiği ve önerilebileceği belirtilmiştir. Almanya'da sığ bir gölde azot ve fosfor gibi besin elementleri azaltımının, göl restorasyonuna etkisini incelemek için, hidrodinamik bir model ile su kalitesi modeli bir arada kullanılmıştır (Lindim vd., 2015). Simülasyon sonuçları, başarılı bir su kalite kontrolü için hem iç hem de dış kaynaklı fosfor yükünün azaltılması gerektiğine işaret etmektedir. Rucinski vd. (2016), Erie Gölü'ne ulaşan değişen miktarlardaki fosfat yüklemesine karşı ekosistem tepkisinin tahmini için bir model geliştirmişlerdir. Bir boyutlu bu model, bağlantılı bir hidrodinamik ve ötrofikasyon modeli olup, merkezi havzadaki gölün 19 yıllık gözlemleriyle kalibre edilmiştir. Sonuçlar, besin elementleri yüklemesinin kontrol edilmesiyle hipoksianın azaltılabileceğini, ancak iklimsel ve meteorolojik koşullara bağlı olarak değişimlerin gözlemleneceğini göstermektedir. Model, Great Göllerinin su kalitesi standartlarını karşılamak için fosfor yükleme hedeflerinin belirlenmesinde oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Etiyopya'da Awassa Gölü için kullanılan Ecopath modelinde ise nispeten az veri seti ile çoğu parametrenin doğru tahmin edilebildiği bildirilmiştir (Fetahi ve Mengistou, 2007). Thapanand vd. (2007), Tayland'da yapay bir sulak alanda çoklu-tür balık avcılığına yönelik bir model geliştirmek için de Ecopath'ı kullanmışlardır. Modelin özellikle avcılıkta kıyısız zonların korunmasının potansiyel önemini optimizasyonu açısından yararlı olduğu belirtilmiştir. Villanueva vd. (2008), tarafından da Kivu Gölü'nde istilacı balık türlerinin etkisini belirlemek için de Ecopath modeli tercih edilmiştir. Araştırmacılar bu modelin; göle aşıl原因 balıkların, fitoplankton, zooplankton ve diğer balık türleri ile avcılık üzerindeki etkisini belirlemede kullanılabileceğine işaret etmişlerdir.

Türkiye'de konuya ilişkin bazı çalışmalar

Türkiye'de ötrofikasyon odaklı model kullanımlarına ilişkin çalışmaların yabancı çalışmalara göre nispeten az ve yeni olduğu görülmektedir. Doksanlı yıllarda rastlanan bu çalışmalardan biri de fosfor bütçe modeli kullanarak Mogan Gölü'nde (Ankara), göle ilişkin toplam fosfor konsantrasyonunun tahminine yöneliktir (Pulatsü ve Aydın, 1997).

Muhammetoğlu ve Soyupak (2000) ise sığ göller için su kalitesi-makrofit interaksyonunu ele alan üç boyutlu bir su kalitesi modeli sunmuş ve test etmişlerdir. Bu model sığ göllerde makrofitler ve makrofitlerin çözünmüş oksijen, organik azot, nitrat, organik fosfor, ortofosfat, biyolojik oksijen ihtiyacı, fitoplankton ile sediment katmanı gibi su kalite bileşenleri arasındaki interaksyonları simüle etmeye yöneliktir. İki boyutlu hidrodinamik modelde, su seviyesi ve seyrelme hızı gibi unsurlar su kalite modeli ile

birleştirilerek kullanılmıştır. Ayrıca yapay sinir ağları Mogan ve Eymir Gölü'nde ötrofikasyon modellemesinde (Karul vd., 2000) kullanılmıştır.

Zhang vd. (2003), bitki örtüsü ve su kalitesindeki artışlarla histerezis tepkisini göstermek için Mogan Gölü'ne (Ankara) yönelik yapısal dinamik bir model geliştirmişlerdir. Modelde fosfor temelli toplam dokuz değişken baz almıştır. Modele göre; gölde toplam fosfor konsantrasyonu 0,16-0,25 mg/L aralığında olduğunda, berrak fazdan su altı bitkilerindeki önemli azalmadan dolayı, bulanık su durumuna geçiş söz konusudur. Zira 0,25 mg/L eşik konsantrasyon üzerindeki fosfor konsantrasyonu durumunda, fitoplankton dominant hale gelirken, su altı bitkileri aniden kaybolmuştur. Model sonuçları, sığ göllerin restorasyonunun ötrofikasyon hızından çok daha yavaş bir şekilde olacağı yönündedir.

Erdoğan (2009) gerçekleştirdiği çalışma ile coğrafik bilgi sistemine (CBS) dayalı yöntemi kullanarak Özel Çevre Koruma Alanı da olan Tuz Gölü'nde, özellikle karar verici konumda olan yöneticilere arazi kullanım planları oluşturma planı hakkında bilgi vermeyi amaçlamıştır.

Mogan Gölü'ne (Ankara) ekosistem simülasyon modellerinden, Aquatox ve Wasp Modelleri ile Pamolare Modelinin alt modelleri uygulanmıştır (Karaaslan vd., 2010). Mogan Gölü'ne ilişkin birçok fiziksel, kimyasal, biyolojik ve hidrolojik data giriş parametresi olarak belirlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon (benzeşim) sonuçlarına göre, Aquatox Modeli ile özellikle sıcaklık, askıda katı madde ve pH parametreleri için oldukça iyi tahminler, toplam azot ve çözünmüş oksijen parametreleri içinse gerçek ölçüm değerlerine yakın veriler saptanmıştır.

Türkiye'de uygulanan farklı ekolojik modeller daha çok iklim değişikliği ve bazı antropojenik kaynaklı faktörlerin, göllerin özellikle su seviyesinde yol açtığı değişikliklere odaklanmıştır (Anonim, 2013; Altunkaynak ve Şen, 2007; Bahadır ve Özdemir, 2011; Karafistan, 2013; Ghorbani vd., 2018; Doğan vd., 2016; Kişi, 2009; Şen vd., 2000; Coppens vd., 2020).

Göllerde ötrofikasyonu karakterize eden su kalite parametreleri arasındaki ilişkilere dayanan istatistiksel yöntemlerle tahmin çalışmaları da bulunmaktadır (Katip vd., 2015). Şanal vd. (2015) ise, Mogan Gölü'nde ekolojik kalitenin tahmininde sucül makrofitleri baz alarak ekolojik kaliteyi modellemeyi hedeflemişlerdir.

Bucak vd. (2018) tarafından, süreç-tabanlı model çıktıları iki farklı göl ekosistem modeli (PCLake ve GLM-AED) ile bağlantılı olarak, Türkiye'nin en büyük tatlı su gölü olan Beyşehir Gölü için kullanılmıştır. Çalışmada gölde iklim değişikliğinin ve arazi kullanımının etkileri tahmin edilmiştir. Artan sıcaklık ve azalan besin elementi yükleme değişimlerinin, siyanobakterilerin gelişimini destekleyeceği, bu durumun gölün içme ve sulama suyu işlevlerini olumsuz etkileyeceği bildirilmiştir.

Tartışma

1970'lerdeki ilk göl ötrofikasyon modelleri, göl içi fosfor- klorofil konsantrasyonu modelleri ile havza kaynaklı besin elementi yüklemesi-göl içi klorofil konsantrasyonu modellerini birbirine bağlayan ampirik modellerdir. Uygulanması çok kolay olan bu modeller, göl ötrofikasyonunu azaltmak veya kontrol etmek için arzu edilen besin elementleri ve klorofil konsantrasyon düzeylerini sağlamak açısından önem taşımaktadır (Vinçon-Leite ve Casenave, 2019). Bu anlamda, ekosistem hakkındaki çok az bilgiyle yalnızca ampirik modeller kullanılmıştır. Sürece-dayalı modeller ise yalnız ekosistemin süreçleri hakkında yeterli bilgi mevcutsa dikkate alınabilecektir. Bu tip modeller için, özellikle model parametrelerinin kalibrasyonuna ilişkin veriler gerekli olacaktır. Ancak süreç-temelli modellerin sonuçları nitel araştırmalar için kullanılıyorsa, model çıktılarının, güncel edinilmiş bilgilerle karşılaştırılarak doğrulanması gerekmektedir (Vanhuët, 1992; Pulatsü ve Aydın, 1997).

Göl ekosistemlerinin birçok ötrofikasyon modeli, izleme verilerinin mevcut olduğu çalışma sahalarına uygulanmıştır. Daha sonraları, birinci maddede değinildiği üzere, yersel (mekânsal) boyut (iyi karıştırılmış sistem, 1B dikeyden 3B modellere), su sütunu ile sediment değişimi, ekolojik işleyişin karmaşıklığı ve hidrodinamik açısından özellikleri çok çeşitli olan dinamik deterministik modeller geliştirilmiştir (Bhagowati ve Ahamad, 2019).

Modelleme çalışmalarının amaçları arasında yıllar içerisinde büyük sorun haline dönüşen iklim değişikliklerinin etkisi altında göl ötrofikasyonunun beklenen orta ve uzun vadeli evriminin değerlendirilmesi konusu da önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca uzaktan algılama ve çok boyutlu bulut modeli vb. gibi gelişmiş araçlar da ekolojik modellemede uygulanmıştır (Bergamino vd., 2007). Son on yılda konunun uzmanları, fitoplankton biyokütlesinin uzaysal dağılımının uydu görüntüleriyle 3B modellerin uygulamasına yoğunlaşmıştır. Yine son modelleme çalışmalarında, çoklu besin elementi döngülerinin (P, N, C, Si, O) modellere dahil edilmesi, ötrofikasyon mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır (Arhonditsis ve Brett, 2005a, 2005b; Zhao vd., 2008). Genellikle göl ekosistemi için büyük bir tehdit olarak kabul edilen siyanobakterilerin aşırı üremesine ekosistem modellerinde özel bir önem verilmiştir (Hense ve Beckmann, 2006).

Hidrodinamik modeller ile havza modellerini ve göl modellerini birleştiren 3 boyutlu modellerin kullanımı, daha iyi tahmin kapasitesi ve derinlemesine mekanizmanın anlaşılması açısından son zamanlarda popülerlik kazanmıştır (Lindim vd., 2015). Farklı ötrofikasyon kontrol yöntemlerinin (besin elementi yükünün azaltılması, biyomanipülasyon gibi) etkinliğinin modellerle öngörülerek ötrofikasyonun kontrolüne dikkat çekilmiştir (Gürkan vd., 2006; Jensen vd., 2006; Reid ve Crout, 2008; Yamashiki vd., 2010).

Sonuç

Sonuç olarak, göl ötrofikasyonunun modellenmesi için kullanılan çok sayıda farklı model tipleri söz konusudur. Model tipi ve yapısının seçimi öncelikle, mevcut bilgi ve veriler ile modelleme amacına bağlıdır. Modeldeki değişkenin seçimi ve farklı göl koşullarında doğrulanması, göl ötrofikasyon dinamiklerinin başarılı bir şekilde tahmin edilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ancak konu ile ilgili uzmanların da belirttiği üzere, her bir göle özgü sorunlar nedeniyle modellerin iyileştirilmesi süreci devam etmektedir.

Sucul ekosistemlerde besin elementlerinden esas olarak azot ve fosfor ötrofikasyonu tetiklemekte, besin elementleri farklı noktasal ve noktasal olmayan kaynaklardan gelebileceğinden ötrofikasyonu azaltmak için kapsamlı stratejiler gerekmektedir. Bu bağlamda ötrofikasyon modelleri, olası senaryoları incelemek ve yerel yönetim stratejilerinin etkisini karşılaştırmak açısından büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde göl modelleme çalışmalarının ivme kazanmasıyla, göllerde tahmini-olası ötrofikasyon kontrolü eskisinden daha kolay hale gelerek ilgili devlet birimlerinin uygun restorasyon programları yapmalarına katkı sağlamıştır. Ülkemizde de ötrofikasyon odaklı modelleme sonuçlarına, göl ekosistemlerine yönelik politika belirleyici konumdaki kişi ve kurumlarca dikkate alınmalıdır.

Çıkar Çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay

Bu çalışma için etik kurul belgesine gerek yoktur.

Kaynaklar

- Ahlgren, I., Frisk, T., & Kamp-Nielsen, K. (1988). Empirical and theoretical models of phosphorus loading, retention and concentration vs. lake trophic state. *Hydrobiologia*, 170, 285-303. doi: 10.1007/BF00024910
- Altunkaynak, D., & Şen, Z. (2007). Fuzzy logic model of lake water level fluctuations in Lake Van, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 227-233. doi:10.1007/s00704-006-0267-z
- Anagnostou, E., Gianni, A., & Zacharias, I. (2017). Ecological modeling and eutrophication-a review. *Natural Resource Modeling*, 30, 2130. doi.org/10.1111/nrm.12130
- Anonim (2013). Yedi Renkli Göle Yedi Renkli Hayat Projesi – 2013 ©WWF-Türkiye (Doğal Hayatı Koruma Vakfı), İstanbul, Türkiye. 36 s.
- Antonopoulos, V., & Gianniou, S. K. (2003). Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modelling*, 160, 39-53. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00286-7

- Arhonditsis, G.B., & Brett, M.T. (2005a). Eutrophication model for Lake Washington (USA). Part I. Model description and sensitivity analysis. *Ecological Modelling*, 187, 140–178. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.01.040
- Arhonditsis, G.B., & Brett, M.T. (2005b). Eutrophication model for Lake Washington (USA) Part II—Model calibration and system dynamics analysis. *Ecological Modelling*, 187, 179–200. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.01.039
- Bahadır, M., & Özdemir, M.A. (2011). Climate trend analysis of the level changes of Iznik Lake in Turkey. *Biological Life Science*, 2(3), 4–13. doi: 7827/TurkishStudies.2465
- Bergamino, N., A. Loiselle, S., Cózar, A., M. Dattilo, A., Bracchini, L., & Rossi, C. (2007). Examining the dynamics of phytoplankton biomass in Lake Tanganyika using Empirical Orthogonal Functions. *Ecological Modelling*, 204, 156–162. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.031
- Bhagowati, B., & Ahamad, K.U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19, 155–166. doi: 10.1016/j.ecohyd.2018.03.002
- Brown, C., Hoyer, M., Bachmann, R., & Canfield, D. (2000). Nutrient-chlorophyll relationships: an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57, 1574–1583. doi: 10.1139/f00-090
- Bruce, L.C., Hamilton, D., Imberger, J., Gal, G., Gophen, M., Zohary, T., & Hambright, K.D. (2006). A numerical simulation of the role of zooplankton in C, N and P cycling in Lake Kinneret, Israel. *Ecological Modelling*, 193, 412–436. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.09.008
- Bucak, T., Trolle, D., Tavşanoğlu, Ü. N., Çakıroğlu, A.İ., Özen, A., Jeppesen, E., & Beklioglu, M. (2018). Modeling the effects of climatic and land use changes on phytoplankton and water quality of the largest Turkish freshwater lake: Lake Beyşehir. *Science of the Total Environment*, 621, 802–816. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.258
- Carraro, E., Guyennon, N., Hamilton, D., Valsecchi, L., Manfredi, E.C., Viviano, G., Salerno, F., Tartari, G., & Copetti, D. (2012). Coupling high-resolution measurements to a threedimensional lake model to assess the spatial and temporal dynamics of the cyanobacterium *Planktothrix rubescens* in a medium-sized lake. *Hydrobiologia* 698, 77–95. doi: 10.1007/s10750-012-1096-y
- Chapra, S.C., & Reckhow, K. (1979). Expressing the phosphorus loading concept in probabilistic terms. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 36, 225–229. doi: 10.1139/f79-034
- Chapra, S.C., & Canale, R.P. (1991). Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen for stratified lakes. *Water Resources*, 25, 707–715. doi:10.1016/0043-1354(91)90046-S
- Chung, E.G., Bombardelli, F.A., & Schladow, S.G. (2009). Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. *Ecological Modelling*, 220, 1251–1265. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.01.038
- Coppens, J., Trolle, D., Jeppesen, E., & Beklioglu, M. (2020). The impact of climate change on a Mediterranean shallow lake: insights based on catchment and lake modelling. *Regional Environmental Change*, 20, 62. doi: 10.1007/s10113-020-01641-6
- Deus, R., Brito, D., Kenov, I.A., Lima, M., Costa, V., Medeiros, A., Neves, R., & Alves, C.N. (2013). Three-dimensional model for analysis of spatial and temporal patterns of phytoplankton in Tucuruí reservoir, Pará, Brazil. *Ecological Modelling*, 253, 28–43. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.10.013
- Dillon, P.J., & Rigler, F.H. (1974a). The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes: phosphorus-chlorophyll relationship. *Limnology and Oceanography*, 19, 767–773. doi:10.4319/lo.1974.19.5.0767
- Dillon, P.J., & Rigler, F.H. (1974b). A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 31, 1771–1778. doi:10.1139/f74-225
- Doğan, E., Kocamaz, U. E., Utkucu, M., & Yıldırım, E. (2016). Modelling daily water level fluctuations of Lake Van (Eastern Turkey) using Artificial Neural Networks. *Fundamental Applied Limnology*, 187 (3), 177–189. doi: 10.1127/fal/2015/0736
- Elliott, J.A., Perrson, I., Thackeray, S.J., & Blencker, T. (2007). Phytoplankton modelling of Lake Erken Sweden by linking the models PORBE and PROTECH. *Ecological Modelling*, 202, 421–426. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.11.004
- Elliott, J.A., & Defew, L. (2012). Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature. *Hydrobiologia*, 681, 105–116. doi: 10.1007/s10750-011-0930-y
- Elshorbagy, A., & Ormsbee, L. (2006). Object-oriented modeling approach to surface water quality management. *Environmental modeling & Software*, 21, 689–698. doi:10.1016/j.envsoft.2005.02.001
- Erdoğan, A. (2009). Modelling of expert knowledge in geographic information systems-based planning of the Tuz Lake Special Environmental Protection Area, Turkey. *Planning, Practice & Research*, 24 (4), 435–454. doi: 10.1080/02697450903327071

- Fetahi, T., & Mengistou, S. (2007). Trophic analysis of Lake Awassa (Ethiopia) using mass-balance Ecopath model. *Ecological Modelling*, 201(3-4), 398-408. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.010
- Fornarelli, R., Galelli, S., Castelletti, A., Antenucci, J.P., & Marti, C.L. (2013). An empirical modeling approach to predict and understand phytoplankton dynamics in a reservoir affected by interbasin water transfers. *Water Resources Research*, 49, 3626–3641. doi:10.1002/wrcr.20268
- Freeman, A.M., Lamon, E.C., & Stow, C.A. (2009). Nutrient criteria for lakes, ponds, and reservoirs: a bayesian TREED model approach. *Ecological Modelling*, 220, 630–639. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.12.009
- Ghorbani, M.A., Ravinesh, C. Deo., Karimi, V., Yaseen, Z. M., & Terzi, Ö. (2018). Implementation of a hybrid MLP-FFA model for water level prediction of Lake Egirdir, Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 1683–1697. doi: 10.1007/s00477-017-1474-0
- Gürkan, Z., Zhang, J., & Jørgensen, S.E. (2006). Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark. *Ecological Modelling*, 197, 89–102. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.03.006
- Hakanson, L. (2002). Modelling Radiocesium in Lakes and Coastal Areas— New Approaches for Ecosystem Modellers. 215 p. A Textbook with Internet Support. Kluwer, Academic Publishers.
- Hakanson, L., & Bryhn, A.C. (2008). A dynamic mass-balance model for phosphorus in lakes with a focus on criteria for applicability and boundary conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 187, 119–147. doi: 10.1007/s11270-007-9502-1
- Hense, I., & Beckmann, A. (2006). Towards a model of cyanobacteria life cycle—effects of growing and resting stages on bloom formation of N₂-fixing species. *Ecological Modelling*, 195, 205–218. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.11.018
- Imboden, D.M. (1974). Phosphorus model of lake eutrophication: P model of lake eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 19, 297–304. doi:10.4319/lo.1974.19.2.0297
- Imboden, D.M., & Gächter, R. (1978). A dynamic lake model for trophic state prediction. *Ecological Modelling*, 4, 77–98. doi:10.1016/0304-3800(78)90001-7
- Jensen, J.P., Pedersen, A.R., Jeppesen, E., & Søndergaard, M. (2006). An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external loading reduction. *Limnology and Oceanography*, 51, 791–800. doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0791
- Karaaslan, Y., Ertürk, F., & Akkoyunlu, A. (2010). Implementation of Aquatox, Pamolare and Wasp Models to Mogan Lake. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma* 28, 110-123
- Karafistan, A. (2013). Conceptual modelling of Lake Manyas, Turkey. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 37, 306 – 317. doi: 10.3906/muh-1212-10
- Karul, C., Soyupak, S., Çilesiz, A.F., Akbay, N., & Germen, E. (2000). Case studies on the use of neural networks in eutrophication modeling. *Ecological Modelling*, 134, (2-3), 145-152. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00360-4
- Katip, A., İleri, S., Karaer, F., & Onur, S. (2015). Determination of the trophic state of Lake Ulubat (Bursa-Turkey). *Ekoloji* 24, 95, 1-9. doi: 10.5053/ekoloji.2015.06
- Kişi, Ö. (2009). Neural network and wavelet conjunction model for modelling monthly level fluctuations in Turkey. *Hydrological Processes*, 23, 2081–2092. doi:10.1002/hyp.7340
- Leon, L.F., Smith, R.E.H., Hipsey, M.R., Bocaniov, S.A., Higgins, S.N., Hecky, R.E., Antenucci, J.P., Imberger, J.A., & Guildford, S.J. (2011). Application of a 3D hydrodynamic-biological model for seasonal and spatial dynamics of water quality and phytoplankton in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 37, 41–53. doi:10.1016/j.jglr.2010.12.007
- Li-kun, Y., Sen, P., Xin-hua, Z., & Xia, L. (2017). Development of a two dimensional eutrophication model in an urban lake (China) and the application of uncertainty analysis. *Ecological Modelling*, 345, 63–74. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.11.014
- Lindim, C., Becker, A., Grüneberg, B., & Fischer, H. (2015). Modelling the effects of nutrient loads reduction and testing the N and P control paradigm in a German shallow lake. *Ecological Engineering*, 82, 415–427. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.05.009
- Makarewicz, J.C., & Bertram, P. (1991). Evidence for the restoration of the Lake Erie ecosystem. *Bioscience* 41 (4), 216–223. doi: 10.2307/1311411
- Malmaeus, J.M., & Hakanson, L. (2003). A dynamic model to predict suspended particulate matter in lakes. *Ecological Modelling*, 167, 247–262. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00166-2
- Malmaeus, J.M., Blenckner, T., Markensten, H., & Persson, I. (2006). Lake phosphorus dynamics and climate warming: A mechanistic model approach. *Ecological Modelling*, 190, 1-1-14. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00297-7
- Mieleitner, J., & Reichert, P. (2006). Analysis of the transferability of a biogeochemical lake model to lakes of different trophic state. *Ecological Modelling*, 194, 49–61. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.10.039

- Misra, A.K. (2007). Mathematical modeling and analysis of eutrophication of water bodies caused by nutrients. *Nonlinear Analysis Modelling and Control*, 12 (4), 511–524. doi: 10.1016/j.nonrwa.2005.09.002
- Mulderij, G., Mau, B., van Donk, E., & Gross, M.E. (2007). Allelopathic activity of *Stratiotes aloides* on phytoplankton—towards identification of allelopathic substances. *Hydrobiologia* 584, 89–100. doi:10.1007/s10750-007-0602-0
- Muhammetoğlu, A., & Soyupak, S. (2000). A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, 133 (2-3), 161–180. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00297-0
- Muraoka, K., & Fukushima, T. (1986). On the box model for prediction of water quality in eutrophic lakes. *Ecological Modelling*, 31, 221–236. doi:10.1016/0304-3800(86)90065-7
- Nürnberg, G.K. (1984). The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnology and Oceanography*, 29, 111–124. doi: 10.4319/lo.1984.29.1.0111
- Nürnberg, G.K., & LaZerte, B.D. (2004). Modeling the effect of development on internal phosphorus load in nutrient-poor lakes. *Water Resources Research*, 40, W01105. doi:10.1029/2003WR002410
- Ofir, E., Heymans, J.J., Shapiro, J., Goren, M., Spanier, E., & Gal, G. (2017). Predicting the impact of Lake Biomanipulation based on food-web modeling—Lake Kinneret as a case study. *Ecological Modelling*, 348, 14–24. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.12.019
- Onderka, M. (2007). Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir (Slovakia)—a simple regression model. *Ecological Modelling*, 209, 412–416. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.07.028
- Pers, B. (2005). Modeling the response of eutrophication control measures in a Swedish lake. *Ambio* 34, 552–558. doi:10.1639/0044-7447(2005)034[0552:MTROEC]2.0.CO;2
- Pulatsü, S., & Aydın, F. (1997). Water quality and phosphorus budget of Mogan Lake, Turkey. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 25(3), 128–134. doi: 10.1002/AHEH.19970250303
- Reckhow, K. (1993). A random coefficient model for chlorophyll nutrient relationships in lakes. *Ecological Modelling*, 70, 35–50. doi:10.1016/0304-3800(93)90071-Y
- Reid, T., & Crout, N. (2008). A thermodynamic model of freshwater Antarctic lake ice. *Ecological Modelling*, 210, 231–241. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.07.029
- Rucinski, D.K., DePinto, J.V., Beletsky, D., & Scavia, D. (2016). Modeling hypoxia in the central basin of Lake Erie under potential phosphorus load reduction scenarios. *Journal of Great Lakes Research*, 42 (6), 1206–1211. doi: 10.1016/j.jglr.2016.07.001
- Salerno, F., Viviano, G., Carraro, E., Manfredi, E.C., Lami, A., Musazzi, S., Marchetto, A., Guyennon, N., Tartari, G., & Copetti, D. (2014). Total phosphorus reference condition for subalpine lakes: a comparison among traditional methods and a new process-based watershed approach. *Journal of Environmental Management*, 145, 94–105. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.06.011
- Shukla, J.B., Misra, A.K., & Chandra, P. (2008). Mathematical modelling and analysis of the depletion of dissolved oxygen in eutrophied water bodies affected by organic pollutants. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 9, 1851–1865. doi: 10.1016/j.nonrwa.2007.05.016
- Şanal, M., Köse, B., Coşkun, T., & Demir, N. (2015). Mogan Gölü'nde sucul makrofitlere göre ekolojik kalitenin tahmini. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5, 51–55.
- Şen, Z., Kadioglu, M., & Batur, E. (2000). Stochastic modeling of the Van Lake monthly level fluctuations in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 65, 99–110. doi: 10.1007/s007040050007
- Thapanand, T., Moreau, J., Jutagate, T., Wongrat, P., Leckhonlayut, T., Meksumpun, C., Rodloi, A., Dulyapruk, V., & Wongrat, L. (2007). Towards possible fishery management strategies in a newly impounded man-made lake in Thailand. *Ecological Modelling*, 204 (1-2), 143–155. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.041
- Vanhuêt, H. (1992). Phosphorus eutrophication in the SW Frisian lake district. 1. Monitoring and assessment of a dynamic mass balance model. *Hydrobiologia*, 233, 259–270. doi:10.1007/BF00016114
- Villanueva, M.C.S., Isumbisho, M., Kaningini, B., Moreau, J., & Micha, J.C. (2008). Modelling trophic interactions in Lake Kivu. What roles do exotics play? *Ecological Modelling*, 212, 422–438. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.047
- Vinçon-Leite, B., & Casenave, C. (2019). Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2085–3001. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.320
- Wu, Z., Liu, Y., Liang, Z., Wu, S., & Guo, H. (2017). Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: a dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference. *Water Resources*, 116, 231–240. doi:10.1016/j.watres.2017.03.039
- Xu, Y., Schroth, A.W., Isles, P.D.F., & Rizzo, D.M. (2015). Quantile regression improves models of lake eutrophication with implications for ecosystem-specific management. *Freshwater Biology*, 60, 1841–1853. doi:10.1111/fwb.126__15

- Yamashiki, Y., Kato, M., Takara, K., Nakakita, E., Kumagai, M., & Jiao, C. (2010). Sensitivity analysis on Lake Biwa under the A1B SRES climate change scenario using Biwa-3D Integrated Assessment Model. Part I. Projection of lake temperature. *Hydrological Research Letters*, 4, 45–49. doi: 10.3178/HRL.4.45
- Zhang, J., Jørgensen, S.E., Tan, C.O., & Beklioglu, M. (2003). Hysteresis in vegetation shift—Lake Mogan Prognoses. *Ecological Modelling*, 164, 227–238. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00050-4
- Zhang, H., Culver, D.A., & Boegman, L. (2008). A two-dimensional ecological model of Lake Erie: application to estimate dreissenid impacts on large lake plankton population. *Ecological Modelling*, 214, 219–240. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.02.005
- Zhao, J., Ramin, M., Cheng, V., & Arhonditsis, G.B. (2008). Plankton community patterns across a trophic gradient: the role of zooplankton functional groups. *Ecological Modelling*, 213, 417–436. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.01.016