

Diffüz ışınım kontrollü sera deneyleri yoluyla
karasal ototrof üretkenliği üzerine stratosferik
sülfür aşılamaının etkilerinin araştırılması

Massachusetts Institute of Technology
Department of Civil and Environmental Engineering

1.018/7.30J
Sonbahar 2009

İdari özet:

Endüstri Devriminden itibaren yaşanan popülasyon artışı ve daha fazla enerji talep eden teknolojilerin geliştirilmesi fosil kaynakların kullanımında artışa yol açmıştır. Fosil yakıt kullanımının bir yan ürünü olarak sera gazları atmosferde benzeri görülmemiş seviyelere çıkmıştır. Dünyanın dengesinin bozulması küresel iklim değişikliğini önlemek için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır. Bu yöntemlerden bir tanesi çevrenin küresel bir ölçekte modifiye edildiği jeomühendisliktir.

Bu önerinin odak noktasını stratosfere sülfür aerosolleri aşılmasını öneren jeomühendislik tasarısı oluşturacaktır. Atmosferdeki sülfür konsantrasyonunu arttırmak Dünyanın aklık derecesini arttıracaktır çünkü bu parçacıklar güneşten gelen ışının bir kısmını geri uzaya yansıtır. Sülfür aerosollerinin stratosfere geniş ölçekte aşılması asit yağmurları, ozon parçalanması ve karasal üretkenliğin etkilemesi gibi beklenmedik sonuçları olabilir.

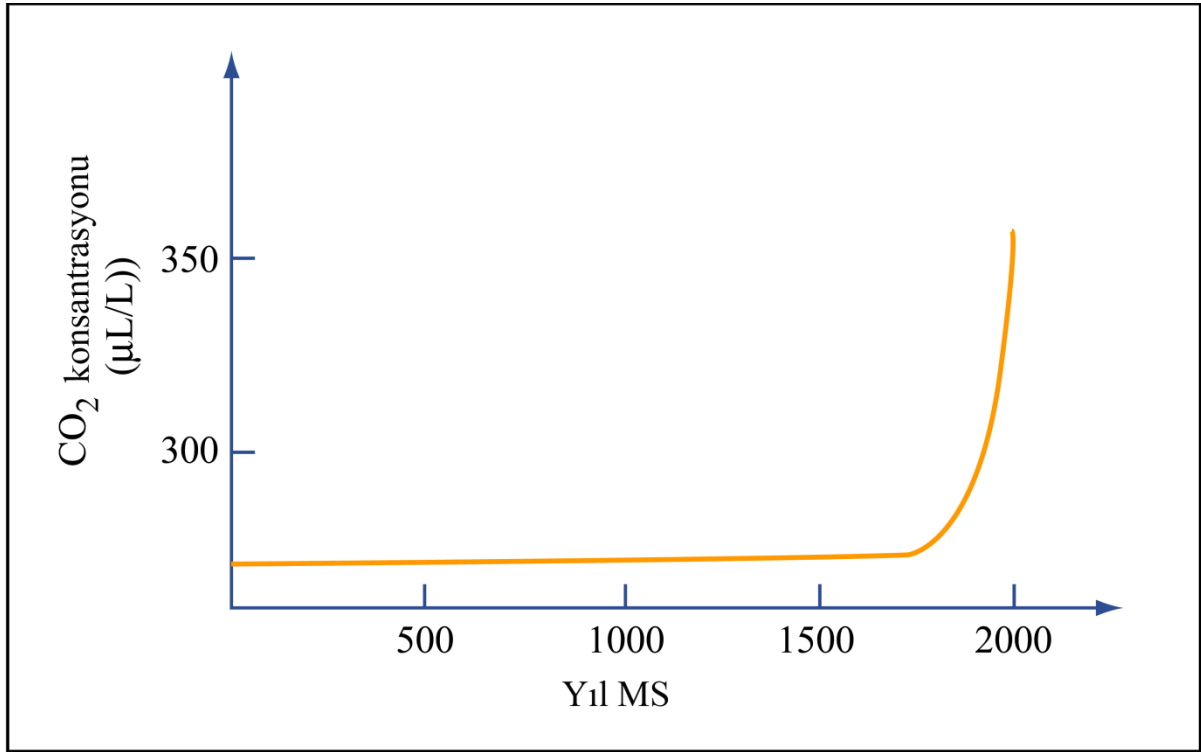
Bu öneride tarif edilen deney, stratosferik sülfür aşılmasının olası etkileri üzerine olan bilgilerimizi geliştirmek ve geniş ölçekli bir uygulamanın pratikliği üzerine daha iyi bilgi edinebilmemiz için tasarlanmıştır. Deney bir dizi diffüz ışınım kontrollü seralardan faydalanan sülfat aerosollerinin gelen ışınım üzerindeki etkisini farklı sera kaplamaları (camları) kullanarak taklit etmeyi amaçlamaktadır. Amaç stratosferik sülfür aşılmasının neden olduğu ışınım değişikliklerinin karasal ototrof üretkenliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu deneyin sonucunda stratosfere sülfür aşılmasının neden olduğu beklenmedik sonuçlar üzerine daha kapsamlı ve detaylı bilgiler elde edilmiş olacaktır.

Önerilen deney stratosferik sülfür aşılmasının neden olduğu ışınımdaki değişikliklerin karasal üretkenlik üzerine olan etkisini araştırmaktır. Sonuçlarımız ışınım değişimi ile üretkenlik arasında ya pozitif ya da negatif bir ilişki olduğunu ortaya koyacaktır. Eğer sonuçlarımız artan sülfat aerosol konsantrasyonlarının ototrofik üretkenlik artışı ile sonuçlandığı ortaya koyarsa bu jeomühendislik tasarısının iki kat etkili olduğunu göstermiş olacağız. Çünkü tasar hem ışınımı geri yansıtarak gezegenimizi soğutmakta hem de karasal ototrofların karbon tutma potansiyelini arttırmaktadır. Stratosferik sülfür aşılmasının küresel iklim değişikliğini birden çok şekilde azaltması diğer jeomühendislik tasarılarına oranla stratosfere sülfür aşılmasını daha geçerli bir yöntem olarak ortaya koymaktadır.

Küresel İklim Değişikliğine Bir Giriş

Dünyanın oluşumundan beri küresel iklimde çarpıcı ve döngüsel varyasyonlar gözlemlenmiştir. Küresel iklim, dünyanın yörüngesi ve eksenindeki oryantasyonu, kıtaların dağılımı, sera gazlarının konsantrasyonu, baskın yaşam formları ve güneşin anlık ışınlamının gücü (Desonie) gibi birçok faktörün oluşturduğu karmaşık bir sistemin sonucudur. Buzul ile buzullar arası dönemler arasında gerçekleşen döngüsel değişiklikler jeolojik zaman dilimi içerisinde gözlemlenmiştir. Modern zamanların en önemli sorunlarında bir tanesi artan insan popülasyonunun, yüksek miktarda insan kaynaklı sera gazlarının salınımı sonucunda, küresel iklim değişikliğini tetiklemiş olmasıdır. Bu salınımlar sonucunda bir yüz yıldan biraz fazla sürede atmosferik koşulları ve genel olarak biyosferi değiştirmiş bulunmaktayız.

On sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıldaki endüstri devrimi, sayısız teknolojik ve bilimsel ilerlemelerin yaşanması ile sonuçlanmıştır. Ne yazık ki bu ilerlemeleri çok sayıda zararlı çevresel etkenler takip etmiştir. Enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanımı Endüstri Devriminden çok önceler dayanmaktadır. Fakat günümüzde popülasyon artışının önemli boyutlara ulaşması ve yüksek miktarlarda enerji gerektiren teknolojilerin gelişmesi fosil yakıtlara olan gereksinimin üssel olarak artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak insan kaynaklı karbon dioksit salınımları Endüstri öncesi dönemde sıfırdan günümüzde yıllık yaklaşık altı milyar metrik tona kadar yükselmiştir (Garrett, 1992). Günümüzde karbon dioksit konsantrasyonları Endüstri öncesi dönemdeki 280 ppm konsantrasyonlarından milyon başına 100 birim daha yüksektir (Bala, 2009). Açık bir şekilde görülmektedir ki insan kaynaklı karbon dioksit artışındaki patlama Endüstri devrimi ile başlamıştır (Şekil 1).



Şekil MIT OpenCourseWare'e aittir

Şekil 1 Son 2000 yıl içerisindeki Atmosferik Karbon dioksit konsantrasyonları (Vitousek, 1994).

Karbon dioksit artışının endişe verici tarafı son birkaç yüzyıldaki insan kaynaklı artışların buzul/buzullar arası geçiş dönemlerindeki konsantrasyon değişiklikleri ile benzer seviyelerde olmasıdır (Vitousek, 1994). Doğal iklim değişiklikleri uzun dönemler içerisinde gerçekleşir böylece adaptasyonun oluşması için yeterli süre mevcuttur. Buna karşılık insan kaynaklı değişiklikler doğal hızın on katında ilerlemiştir (Vitousek, 1994). İklim değişikliği hızındaki bu artış daha hızlı adaptasyonu gerektirecektir. Bu nedenden dolayı fosil yakıt tüketimi ve bunun neden olduğu hızlı değişiklikler şu anda var olan birçok türün geleceğini tehlikeye sokmaktadır.

Geçmişte, biyokimyasal karbon çevrimi dengeli bir değiş tokuş döngüsü ile işlemekteydi. Karbon dioksit birincil olarak solunum ve organik maddenin çürümesi ile atmosfere giriş yapmaktadır. Atmosferik karbon dioksit fotosentez yoluyla ve okyanus derinliklerinde depolanarak sistemi dengeleyen

mekanizmayı oluşturmaktadır. Fosil yakıtların tüketimi, ormansızlaştırma ve beton üretimi gibi insan kaynaklı karbon dioksit artışı, doğal süreçlerin yol açtığı artışa oranla düşükte olsalar, bu dengeyi bozmuştur (Garrett, 1992). Şekil 2’de gösterildiği üzere, karbon döngüsü, artan atmosferik karbon dioksit konsantrasyonlarını dengeleyebilecek güce sahip değildir. Dolayısıyla karbon dioksitin çoğu atmosferde kalmaktadır.

Şekil 2 Küresel karbon döngüsünün, kaynak ve bataklarının yıllık akıları. Milyar metrik ton karbon olarak verilmiştir. Kaynaklar ve bataklar derin okyanus, karasal toprak ve vejetasyon depolarına akar. Kaynaklar ve bataklar şekilde oklar ile gösterilmiş olup fotosentezi, çürümeyi ve fosil-yakıt tüketimini içermektedir (Garrett, 1992).

Küresel ısınmanın başlıca nedeni, sera gazlarının artışına bağlı olarak, uzaya geri kaçan soğurulmamış ışıınım miktarında azalmanın olmasıdır. Dünyaya ulaşan güneş ışınlarının yaklaşık olarak %30’u atmosfer tarafından soğurulmadan önce uzaya geri yansıtılır (Garret, 1992). Geri yansımaya atmosferde kalan ışıınım ise metan, karbon dioksit, nitroz oksit, su buharı ve ozon gibi sera gazları ile etkileşerek kızıl ötesi ışıınım şeklinde dünyaya ulaşır (Garret, 1992). Sonuç, dünya yüzeyinin yalnızca güneşin anlık ışıınımı tarafından açıklanması mümkün olmayacak derecede ısınmasıdır (Grassl, 2009). Bu durum sera etkisi olarak bilinir.

Hızlı küresel ısınmanın biyosfer üzerinde önemli geniş ölçekli ekolojik etkileri vardır. Fotosentez tepkimesinin bir parçası olan karbon dioksit miktarlarındaki artış fotosentez hızının artmasına neden olacaktır. Bazı ototrofik türler diğerlerine oranla çevresel değişikliklere karşı daha çabuk adapte

olabilirler dolayısıyla karbon dioksit artışına karşılık rekabetsel bir üstünlük sağlayacaktır (Fajer, 1989). Bir başka ekolojik problem, karbon dioksiti daha etkin olarak kullanan bitkiler daha düşük besin içeriğine sahip dokular ürettiği için ortaya çıkacaktır (Fajer, 1989). Dolayısıyla herbivorların, çürküçülerin ve besin zincirinin daha üstündeki bütün organizmaların büyüme oranları aksamaya uğrayacak ve bu gibi populasyonların hayatta kalma başarıları tehlikeye girecektir (Fajer, 1989). Küresel iklim değişikliği aynı zamanda biyoçeşitliliği de etkileyecektir çünkü özgül ekolojik çevrelerin konumları kaydıka türler hayatta kalabilmek için dağılımlarını değiştirmek zorunda kalacaktır. Örneğin gelecekte tatlı sularda görölmesi beklenen 4 derecelik bir artış bazı tatlı su türlerinin daha kısıtlı bir enlemsel aralığa sıkışmasına neden olacaktır (Heino, 2009).

İnsan aktivitesi tarafından indüklenen küresel iklim değişikliği aynı zamanda kendi türümüz üzerinde de önemli etkileri olacaktır. Kutup bölgesindeki buzullar şimdiden erimeye başlamış olup su seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır. Tahminlere göre bu yüz yıl içerisinde deniz seviyesinin 0.18 ila 0.59 metre arasında yükselmesi beklenmektedir (Dupont, 2008). Bu durum verimli kıyosal alanları verimsiz hale getirebilir ve besin kıtlığının yaşanmasına neden olabilir. Sıcaklık artışının yanı sıra küresel iklim değişikliği yağmur örüntülerinde de dalgalanmaların görölmesine neden olacaktır. Yağış örüntüsünde dalgalanmalar su sıkıntısının yaşandığı yeni bölgeler doğurabilir, dolayısıyla yetersiz su kaynaklarına sahip insan sayısını arttırabilir (Dupont, 2008).

Dünyada var olan koşullar bin yıllar içerisinde şekillenmiş ekolojik evrimsel adaptasyonların bir sonucudur (Remmert, 1980). İnsan türü yalnızca şu anki mevcut koşullar altında hayatta kalabilir (Remmert, 1980). Neden olduğumuz insan kaynaklı salınımlar hem kendi türümüzü hem de genel olarak dünyayı tehdit etmektedir. Küresel iklim değişikliği ve etkileri son dönemlerde oldukça

ön plana çıkmış ve geleceğin ne getirebileceğine dair kaygıların artmasına neden olmuştur. Bilim insanları ve politikacılar insan kaynaklı iklim değişikliğini durdurabilmek için uygulanabilir ve etkin yöntemler bulmaya çalışmaktadır. Jeomühendislik çevrenin küresel ölçekte bilinçli olarak değiştirilmesini içeren önemli bir strateji olarak ortaya çıkmıştır.

Jeomühendislik

Çevrenin geniş ölçekli manipülasyonu yeni bir jeomühendislik buluşu olmayıp uzun süredir etrafta dolaşmaktaydı. Hatta, Arrhenius 1905 kadar erken bir tarihte fosil yakıt tüketiminin olası etkilerini öngörmüştür (Keith, 2000). Her ne kadar Arrhenius ve çağdaşları artan karbon dioksit miktarlarının tarımsal yararları üzerinde durmuş olsalar da, çevresel manipülasyon fikri üzerine göndermelerde bulunmuşlardır. 1960' larda hava ve iklim modifikasyonu olarak bilinen ve günümüzdeki jeomühendisliğe çok benzer bir tasarı ortaya çıkmıştır (Keith, 2000). Amerika Birleşik Devletleri ve S.S.C.B. makro ölçek mühendislik tasarıları ile çevreyi değiştirmeyi planlamışlardır. Jeomühendislikte ve hava ve iklim değişikliklerinde ölçek ve amaç ortaktır; fakat, ikisinin amaçları oldukça farklıdır. Hava ve iklim modifikasyonunun amacı doğal iklimi iyileştirerek doğal afetleri hafifletmek iken jeomühendisliğin amacı insan kaynaklı iklimsel etkileri azaltmaktır. 1960' lardan itibaren karbon dioksit konsantrasyonlarında gerçekleşen artışın ciddiyeti anlaşılmış ve vurgu doğal iklimi iyileştirmek yerine doğal iklimi kurtarmak üzerine kaymıştır.

Şekil 3 Besin eklemesi, ormanlaştırma, yüzey aklık derecesinin artırılması ve stratosferik aerosol aşılmasını içeren temel jeomühendislik tasarıları. Siyah ok başları uzaya geri yansıtılan kısa dalga boylarını gösterirken beyaz ok başları karbon hareketini simgelemektedir (Lenton, 2009).

Jeomühendislik stratejileri dünya tarafından emilen güneş ışıının miktarını azaltan ve yansıtılan ışıının miktarını arttıran olmak üzere iki temel sınıfa ayrılabilir (Şekil 3). Işıının emiliminin azaltılması ya ilk etapta dünya yüzeyine çarpan güneş ışıının miktarının azaltılması ile ya da dünyanın yansıtma veya aklık derecesini arttırmak ile başarılabılır. Gelen ışıının miktarını azaltmaya yönelik öneriler dünya ve güneş arasında dünyanın çekim gücünün minimize olduğu Lagrange noktasına yansıtıcı güneş kalkanları koymak ya da dünyanın yörüngesinin etrafına küçük aynalar koymaktır (Bala, 2009). Aklık artırımı ise stratosfere sülfür aşılması, bulut yoğunlaşmasını arttıran özler ile hatta çatıları beyaza boyayarak kentsel aklılığı arttırarak elde edilebilir (Lenton, 2009).

Jeomühendislik tasarılarının diğeri bir kolu ise artık miktardaki karbon dioksitin uzaklaştırılması ile sera etkisinin önlenebileceği fikrinden ileri gelir. Bu tasarılar atmosferik karbon dioksitin karasal sistemlere, okyanus

derinliklerine veya derin jeolojik oluşumlara taşınmasını içerir (Bala, 2009). Burada, verilen jeomühendislik tasarılarından, stratosfere sülfür aşılması incelenecek ve tartışılacaktır.

Stratosfere Sülfür Aşılması Yoluyla Jeomühendislik

Bir jeomühendislik tasarısı olan “stratosferik sülfür aşılması” için ilham büyük ihtimalle volkanik patlamalardan gelmiştir. Volkanik patlamalar, sülfat aerosolleri de dahil olmak üzere, atmosfere yüksek miktarda farklı gazlar fırlatırlar (Brovkin, 2009). Volkanik patlamalarını takip eden yıllarda, sülfat aerosollerinin neden olduğu klık artımının bir sonucu olarak, daha soğuk iklimler görölmektedir. Volkanik aktivitenin olmadığı bir yılda stratosfere sülfat girdisi yaklaşık 0.1 teragramı bulmaktadır (Rasch, 2008). Pinatubo dağının patlaması, patlama olmayan yıllardaki yıllık stratosferik sülfür girdisinin 100 katı bir girdiye neden olmuştur (Rasch, 2008). Bu jeomühendislik tasarısı, stratosferik sülfat aerosollerinin dünyanın yansıtma derecesini arttırma kapasitesine sahip olmaları üzerine dayanmaktadır. Tıpkı volkanik patlamalarda olduğu gibi. Doğal ve yapay sülfür aşılama yöntemleri şekil 4’te gösterilmiştir.

Şekil 4 stratosferik sülfür aşılması volkanik patlamaları taklit eder. Her iki süreçte sülfat aerosollerinin konsantrasyonlarını arttırarak dünyanın yansıtma derecesini arttırır. Kaynak: <http://www.nature.com/nature/journal/v447/n7141/full/447132a.html>

Işınım kaynaklı dengesizliği hafifletebilmek için sülfürün stratosferde kalması gerekmektedir ve jeomühendislik tasarısı işte bu noktada volkanik patlama analojisinden uzaklaşmaktadır. Sülfür aşılamaının troposfer yerine stratosferde gerçekleşmesinin birçok nedeni vardır. İlk olarak troposferde gerçekleşen insan kaynaklı sülfür salınımı asit yağmurlarına neden olmaktadır (Kravitz, 2009). İkinci olarak sülfürün troposferde ortalama kalma süresi sadece bir hafta kadar iken sülfürün stratosferde kalma süresi birkaç yılı kapsamaktadır (Crutzen, 2006). Sülfürün stratosferde ortalama kalma süresinin daha yüksek olması sülfat aerosollerinin daha yüksek miktarda dağılıma ulaşacakları anlamına gelir. Dolayısıyla daha az sıklıkta aşılamanın yapılmasını gerekmektedir. Bu jeomühendislik tasarısı her ne kadar stratosferik sülfür içeriğinde yüksek miktarlarda değişikliklere neden olsa da atmosferin tamamı göz önüne alındığında net sülfür değişikliği çok önemli görünmemektedir. Dolayısıyla istenmeyen çevresel etkilerin görülmesi düşük olasılığa sahiptir.

Stratosfere fiziksel olarak sülfür eklenebilmesi için birkaç yöntem önerilmiştir. Stratejik olarak bütün aşılamaalar, stratosferik dolaşım sistemi içerisinde yukarı doğru yönelen akımların etrafında yapılacaktır böylece kapsamlı bir dağılıma ulaşılabilir ve stratosferik ömür uzunluğunun daha yüksek olması sağlanacaktır (Crutzen, 2006). Aşılama için önerilen yöntemler arasında sülfürü stratosfere taşımak ve orada serbest bırakmak için topçu mermilerinin veya balonların kullanılması bulunmaktadır. Diğer yöntemler, uçak egzozları ile sülfür aşılamaının yapılması veya uzun-dönemli duman işlemesi ile sülfürün taşınmasıdır (Rasch, 2008). Tahminlere göre yıllık yaklaşık olarak 5 teragram sülfür eklemesi, ikiye katlanan karbon dioksit konsantrasyonlarının yol açtığı ısınma etkisini dengeleyebilmektedir (Crutzen, 2006).

Sülfür aerosollerinin stratosfere aşılamaından sonra bunların etkinliğine tesir eden birçok faktör bulunmaktadır. Önerilen yöntemlerden çoğu hidrojen

sülfüt ve diatomik sülfürün, sülfür dioksit ve zaman içerisinde mikro-metre altı sülfat parçacıklarına dönüşümünü içermektedir (Crutzen, 2006). Parçacık büyümesi, söz konusu sülfür bileşiğinin buharlaşmasının ve konsantrasyonunun bir fonksiyonudur (Rasch, 2008). Düşük sülfür konsantrasyonları düşük kısmi basınç ile ilişkilidir ve dolayısıyla parçacıklar küçük kalır (Bauman, 2003). Sülfür bileşiklerinin yüksek konsantrasyonlarda olması, tıpkı volkanik patlamalarda olduğu gibi, parçacık büyüklüğünün artması ile sonuçlanır. Parçacık büyüklüğü ile ışığı etkin bir şekilde saçmak arasında ters bir orantı vardır: küçük parçacıklar büyük sülfür parçacıklarına oranla aklık derecesini daha etkin arttırmırlar (Bauman).

Jeomühendislik çevrenin dünya ölçeğinde değiştirilmesini içerdiği için, ilgili etkiler tüm dünyada görülecektir. Jeomühendislik her ne kadar küresel ısınmayı azaltmaya çalışsa da negatif sonuçların ortaya çıkma ihtimali her zaman vardır. Jeomühendislik tasarılarının yaratacağı bütün sonuçları ön görebilmek oldukça zordur çünkü ekolojik bilim içerisinde sayısız değişken vardır. Jeomühendislik yaşanan küresel iklim değişikliği için en iyi çözüm yolu olarak kabul edilmeden önce detaylı deneylerin yapılması ve jeomühendislik tasarılarının uzun dönemli etkilerinin tamamen ortaya konması gerekmektedir.

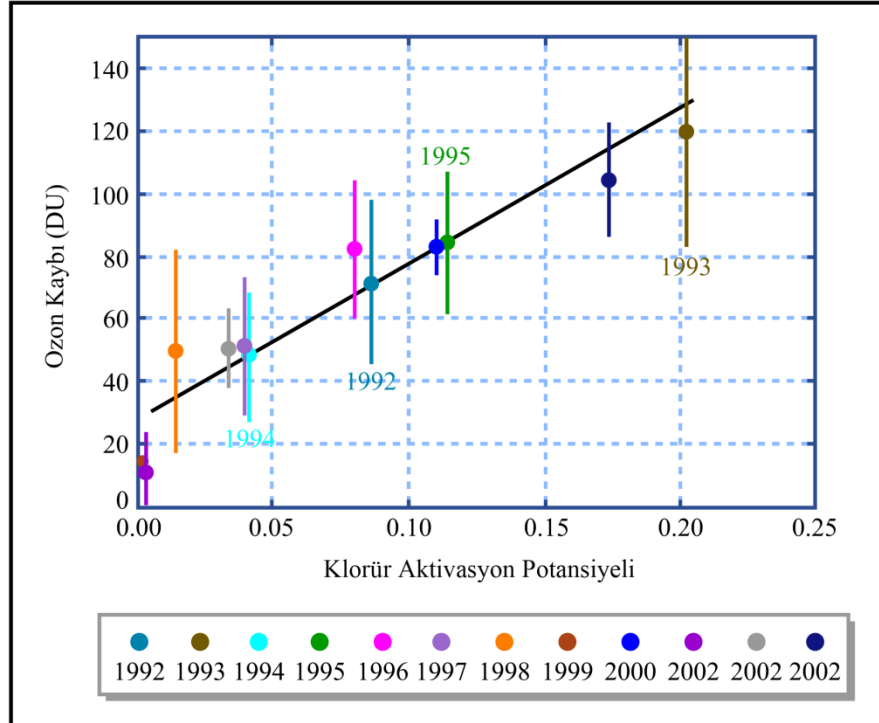
Stratosferik Sülfür Aşılmasının Olası Etkileri

Stratosferik sülfat aerosol manipülasyonunun beklenmeyen olası sonuçlarından bazıları, şimdiden tartışmaların odak noktası haline gelmiştir. Olası yan etkiler arasında ozon parçalanması, sülfür çökmesi ve karasal biyosfer üzerindeki etkileri olup bu önerinin odak noktasını bu yan etkiler oluşturacaktır.

Ozon Parçalanması

Stratosfere sülfat aerosollerinin jeomühendislik yöntemiyle aşılması ile volkanik patlamalar arasında kurulan analogi, bu yöntemin ozon üzerindeki etkisi içinde geçerli olabilir. 1982'deki El Chichon patlaması atmosfere 3 – 5 terragram sülfür salmıştır ve orta-enlem bölgelerinde 20 km'lik yükseklikte yer alan ozonun yaklaşık %16'nın yok olmasına neden olmuştur (Hofmann, 1989).

Sülfat aerosollerinin ozonu parçalamadaki fiziksel yeteneği birkaç faktöre bağlıdır. Sülfür parçacıkları, klorür'ün tepkime etkinliğini arttıran ve ozonu parçalayabilen bir yüzey yaratır. Dolayısıyla sülfür aerosol konsantrasyonlarındaki bir artış klorürün tepkimeye girme olasılığında da bir artışa neden olur (Tilmes, 2008). Klorürün tepkimeye girme olasılığındaki artış ile ozon kaybı arasında doğrudan bir ilişki vardır (Şekil 1). Bu bağlantıya dayanarak sülfat aerosollerinde yapılacak bir değişikliğin ozon kaybını arttıracak sonucuna varabiliriz.



Şekil MIT OpenCourseWare'e aittir

Şekil 1 Klorür tepkime olasılığı ile ozon kaybı arasındaki doğrusal bağıntı (Tilmes, 2008)

Ozon parçalanması için en uygun koşullar yüksek enlemlerde görülmektedir çünkü klorürün tepkime etkinliği soğuk sülfür yüzeylerinde en yüksektir (Tilmes, 2008). Kutup bölgeleri kloroflorokarbonlardan dolayı zaten ozon parçalanmasına uğramış durumdadır ve dolayısıyla daha fazla kayba veya uzun dönemli ultraviyole ışınlarla maruz kalmaya hassastırlar. Ozon kaybı ve gecikmiş ozon yenilenmesi stratosferik sülfür aşılmasının önemli etkilerindendir çünkü deri kanserine yol açan, bitkileri tehlikeye sokan ve fitoplankton popülasyonlarının düşmesine neden olan mor ötesi ışınımın artmasına sebep olmaktadır (Aucamp, 2007).

Sülfür Çökmesi

Sülfür aşılmasının troposfer yerine stratosfere yapılmasının bir nedeni de sülfürün stratosferdeki daha uzun ortalama ömür süresidir. Stratosferde sülfürün ortalama kalıcılık süresi bir ya da iki yıl iken bu rakam troposferde sadece yaklaşık olarak bir haftadır (Crutzen, 2008). Atmosferik sülfür aşılması ile ilgili bu strateji her ne kadar atmosferde yer alan bir sülfür parçacığının ömür uzunluğunu arttırsa da eninde sonunda sülfür parçacığı troposfer içerisine düşecek ve zaman içerisinde yüzeyde çökme oluşacaktır. Önemli bir endişe sülfat aerosollerinin su ile karışması sonucunda çevre için zararlı olabilecek asidik sülfür çökelmelerinin oluşmasıdır (Kravitz, 2009).

Yapılan tahminler, stratosferik sülfür aşılmasından kaynaklanan asit çökmesinin hava kirliliğinden kaynaklanana oranla göz ardı edilebilecek düzeyde kalacağını göstermektedir (Robock, 2008). Stratosferik sülfür aşılması sonucunda oluşan asit çökmesini araştıran deneyler yapılmış ve sonuçlar yukarıda verilen tahmini destekler niteliktedir. Yani asit çökme seviyeleri, ekosistemlerin negatif olarak etkilenmesi için gerekli kritik seviyenin altındadır (Kravitz, 2009). Asiditeyi tamponlayabilmek için gerekli yöntemlere sahip

olmayan ekosistemler, örneğin tatlı su ekosistemleri, asit çökmesinden dolayı zarar görmeye açıktırlar (Kravitz, 2009).

Karasal Üretkenlik Üzerine Etkisi

Stratosferik sülfür değişikliklerinin karasal biyosfer üzerindeki olası etkileri halen büyük ölçüde bilinmemektedir. Stratosfere sülfür dioksit aşılmasındaki temel amaç dünyanın aklık derecesine arttırarak gelen ışıınımı daha yüksek miktarda geri uzaya yansıtabilmektir. Aerosollerin gelen ışıınım üzerinde bir başka etkisi daha vardır; ışıık aerosollerce zenginleştirilmiş stratosfere girdikçe yansıyacak ve tekrardan ışıımaya uğrayacaktır. Böylece yeryüzüne ulaşan diffüz ışıınım miktarı artacaktır.

Fotosentez süreci ışıığa bağımlıdır. Dolayısıyla aklık derecesinin arttırılması sonucunda gelen ışıık miktarında görülecek olan dalgalanmalar fotosentez hızını ve sonuç olarak da bitki büyümesini ve birincil üretimi etkileyecektir. Atmosferden karbon dioksit çekerek, fotosentetik organizmalar, biyokimyasal karbon döngüsünde önemli bir rol oynar. Şu günlerde yaşadığımız küresel iklim değişikliği çıkmazı göz önüne alındığında karasal karbon depolarının etkinliği kritik öneme sahiptir.

Artan derecede sülfat aerosollerinin karasal üretkenlik üzerindeki etkileri ile ilişkili tahminler öne sürülmüş ve bu kuramları sınamak için deneyler yapılmıştır. Bazı uzmanlar gelen güneş ışıınımlarındaki azalmanın karasal biyosfere gelen fotosentetik olarak aktif ışıınımı azaltacağını ve net birincil üretkenliği negatif olarak etkileyeceğini öne sürmüşlerdir (Govindasamy, 2002). Fakat ilgili literatür detaylıca incelendiğinde bu konu üzerinde bir anlaşmaya varıldığını söylemek oldukça zordur.

Başka tahminler jeomühensiliğe uğramış stratosferin aslında Dünya yüzeyine ulaşan diffüz ışıınım oranını arttıracağını belirtmektedir (Gu, 2003). İlk

bakışta aklık derecesini arttıran bu yöntemin, gelen ışıını geri yansııtma üzerine kurulduğundan dolayı, diffüz ışıını oranı artışı ile sonuçlanabileceğini ortaya sürmek ters gelebilir. Stratosfere sülfür aşılması yapmak diffüz ışıının ve doğrudan gelen ışıının toplamından oluşan toplam küresel güneş ışıını miktarını azaltır (Gu, 2003). Fakat stratosferik aerosol konsantrasyonlarındaki artış diffüz ışıını oranında da artış ile sonuçlanmaktadır (Gu, 2003).

Modifiye edilmiş ışıını şiddetinin karasal üretkenlik üzerindeki etkilerini sınavan deneyler yapılmıştır fakat ilerleme için halen yer vardır. Uzmanların halen tam bir uzlaşmaya varmamış olmaları, karasal üretkenlik ile sülfat aerosollerince zenginleştirilmiş bir stratosfer arasındaki ilişkiyi etkileyen birçok karmaşık faktörün tutarlı öngörülerde bulunmamızı zorlaştırdığını göstermektedir (Gu, 2003; Wuebbes, 2001; Govindasamy, 2002). Küresel boyutta aerosol manipölasyonunun net birincil üretkenlik bakımından ne anlama gelebileceğini anlayabilmek için geçmişte alınan sonuçları onaylayan ve bunları geliştiren ek deneylerin yapılması gerekmektedir.

İlgili Geçmiş Deneyler Üzerine Bir Derleme

Wuebbles et al.'un 2001'de yapmış olduğu bir çalışma güneş ışıınında %1.8'lik bir azalmanın net birincil üretkenlikte önemli bir düşmeye neden olmadığını göstermiştir (Wuebbles, 2001). Govindasamy tarafından yapılan benzer bir deneyde benzer sonuçlar elde edilmiş olup gelen güneş ışığı miktarındaki küçük dalgalanmaların bitki üretkenliği üzerinde önemli etkileri olmayacağı sonucuna varılmıştır (Govindasamy, 2002). İklim modelleri, biyosferin karmaşık yapısını mümkün olduğunca hatasız bir şekilde ele alabilmek için sürekli geliştirilmekte ve kusursuzlaştırmaya çalışılmaktadır. Fakat bu alan halen son derece aktif olup oluşturulan iklim modellerinden hiçbirisi kusursuz değildir. İklim modelleri tarafından öngörülen sonuçları destekler nitelikte sonuç veren dış saha deneyleri yapıldıkça iklim

modellemeleri sonuçlarının güvenilirliğini artacak, yani stratosferdeki aerosol miktarını modifiye etmenin birincil üretkenliği önemli derecede etkilemediği sonucu desteklenmiş olacaktır.

Diffüz Işınım Kontrollü Seralar (DIKS) ile Deney

Stratosferik sülfür aşılmasının karasal üretkenlik üzerine etkileri halen belirsizdir. Dünya sistemi oldukça karmaşık ve dolayısıyla modellemesi zor olduğu için geçmiş deneyler çelişkili sonuçlar ortaya koymuştur. Önerilen deney stratosferin üretkenlik üzerine etkisini uzun dönemli araştırmak için diffüz kontrollü seraları (DIKS olarak kısaltılmıştır) kullanmaktadır.

Diffüz Işınım Kontrollü Seralar (DIKS) ile Deney

- I. Stratosfere sülfat aerosollerinin aşılması sonucunda diffüz ışınım oranında artma olacaktır ve dolayısıyla karasal ototrof üretkenliğinde de artış olacaktır.
- II. Sülfat aerosol aşılması aynı zamanda doğrudan gelen ışınım miktarında da azalmaya yol açarak birincil üretkenliği düşürme yönünde etki edecektir. Fakat üretkenlikteki net değişim pozitif yönde olacaktır çünkü bitkiler doğrudan gelen ışınım oranla diffüz ışınımdan daha iyi yararlanabilirler.
- III. Artan stratosferik aerosol konsantrasyonlarının ilk başta karasal ototroflar üzerinde önemli bir etkisi olmayacaktır. Fakat bazı bitkilerin diffüz ışınımdan diğerlerine oranla daha kolay yararlanabilmeleri uzun ölçekte biyoçeşitlilik örüntülerini değiştirebilir.

Deney için Karasal Biyosferin Tekrardan Kurgulanması

Stratosferik aerosol manipölasyonunun neden olacağı etkilerin tamamını anlayabilmek için jeomühendislik tasarılarının küresel ölçekte uygulanması gerekmektedir. Fakat bu kısır bir çelişkidir; sonuçlarının kapsamını ve ciddiyetini bilmeden biyosferi risk altına sokamayız. Bunun yerine, biyosferin olabildiğinde iyi taklit edildiği deneylerin tasarlanması gerekmektedir.

Modifiye edilmiş ışınının üretkenlik üzerindeki etkisini sınamak için bu deneyde bir dizi sera kullanacaktır. Her bir sera diğerlerinden yalıtılmış bir ekosistem içerecek ve bu seralarda küresel birincil üretkenliğe önemli derecede katkı yapan üç farklı ekosistem modellenenecektir. Seralarda kopyalanacak ekosistemler içerisinde tropik yağmur ormanları, ılıman yaprak döken ormanlar ve çayırlar olacaktır. Her bölgeye bir tane kontrol bire tane de DIKS olmak üzere iki sera yerleştirilecektir. Seralardaki sıcaklıkların çok soğuk veya çok sıcak olmasını önleyebilmek için, seralar havalandırma sistemine sahip olacaktır. Aynı zamanda hava ve toprak nem oranlarını doğru seviyelerde tutabilmek için seralar su tesisatına sahip olacaktır.

Kurulan seralarda, o sera hangi çevreyi taklit ediyorsa o çevre taklit edilecektir. Doğal ortamlarındaki güneş ışığı miktarını alabilmeleri için bu seralar doğal ortamlarına konacaktır. Dolayısıyla bu, tropik yağmur ormanı serasının Brezilya'ya, ılıman yaprak döken orman serasının New York'a ve çayır serasının ise Teksas'a konacağı anlamına gelmektedir.

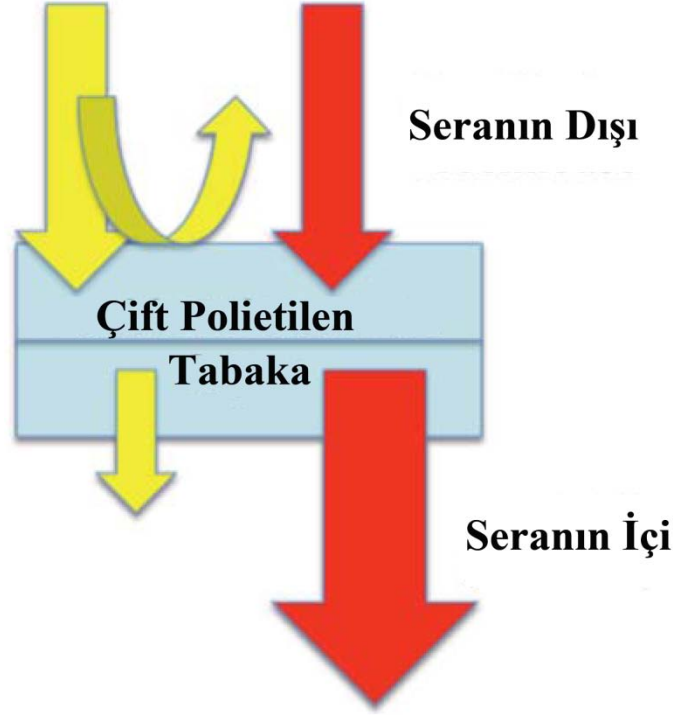
Tropikal yağmur orman serasının çevresi Latin Amerika yağmur ormanlarına göre modellenenecek ve sıcaklık 26°C'de tutulup her yıl 4000 mm yağış alacaktır (Smith, 2001). Bitki türleri arasında mango ağacı, yagrumo macho ve Tabebuia ağaçları olacaktır fakat taklit edilen biyoçeşitlilik bu sıralanan birkaç türle sınırlı olmayacaktır çünkü yağmur ormanları en karmaşık ekosistemlerden bir tanesidir (Lopes, 2009).

Ilıman yaprak dökten orman serası Avrupa kayını, dişbudak, huş ve karaağaç ağaçlarından oluşacaktır (Smith, 2001). Sıcaklık, ortalama en düşük 20°F ile ortalama en yüksek 70°F arasında mevsime göre değişkenlik gösterecek ve bu seralar yıllık 980 mm civarında yağışa sahip olacaktır (Ulusal Hava Servisi, 2009).

Teksas çayırılıkları, “Teksas karatoprak çayırılıkları”na göre modellenecektir ve 35°F ile 95°F arasında değişen sıcaklıklara ve yıllık yaklaşık 880 mm yağmur oranına sahip olacaktır (Ulusal Hava Durumu Servisi, 2009). Bu seranın florası büyük olup, *Sorghastrum nutans*, *Tripsacum dactyloides* ve *Panicum virgatum* çim türlerini ve *Andropogon* cinsi çimlerden oluşacaktır (World Wildlife Fund, 2001).

Deneyisel Değişken: Sera Camlaması ve Diffüz Işınım

Sera kaplamaları ile stratosferik aerosoller gelen ışınımı benzer şekilde etkiler. Sera camlaması doğrudan gelen ışınımı geri yansıtarak bitkilere doğrudan gelen ışınımı azaltır (Giacomelli, 1993). Stratosferik aerosol aşılması gibi, sera camlaması da bitkilere ulaşan diffüz ışınım oranını artırır (Giacomelli, 1993). Sera kaplamasının gelen ışınım üzerindeki etkisi Şekil 3’te özetlenmiştir. Seralar, atmosferi fiziksel olarak değiştirmeden, ilgili jeomühendislik tasarısının etkilerini modellemek için oldukça iyi bir analogtur.



Şekil 3 Çift polietilen tabakanın gelen ışıının üzerindeki etkisi. Kırmızı oklar camlama tarafından etkisi artırılan diffüz ışıını temsil eder. Sarı oklar bazısı yüzeyde geri yansıtılan doğrudan gelen ışıını temsil eder.

Bu deneyde değişken, gelen diffüz ışıınıdır. Farklı sera camlama maddeleri diffüz ışıını seviyeleri değiştirmek ve kontrol etmek için kullanılacaktır. Doğal koşulları modelleyebilmek için kontrol serası ince cam ile kaplanacaktır çünkü bu kaplama gelen ışıını diğer maddelere oranla daha az oranda etkilemektedir (Giacomelli, 1999). Deneyde doğal ortam kontrol olarak kullanılacaktır çünkü deneysel sera içerisinde predasyon, besin ve havadaki değişkenlik gibi unsurların taklit edilmesi mümkün değildir. Doğrudan gelen ışıını miktarındaki azalma ile diffüz ışıını miktarındaki artmanın yarattığı etkileri anlayabilmek için diğer bütün faktörlerin sabit tutulması gerekmektedir.

Her bölgedeki deneysel seralar, çift katlı polietilen camlar ile kaplanacaktır. Geçirgenlik (τ) sera kaplamasına gelen ışıını (I_0) ile sera içerisindeki ışıını (I) arasındaki oran olarak tanımlanır (Giacomelli, 1993). Yani,

İETİT TİT TİT I

Çift polietilen camlar ile yapılan deneylerde bu yüzeyin geçirgenliğini %80 olarak ölçülmüştür (Giacomelli, 1999). Tek bir polietilen katmanı camın altında %29'luk bir difüzyon ile sonuçlanırken çift katmanlı bir polietilen %40'luk bir difüzyon ile sonuçlanır (Giacomelli, 1999).

Göz önüne alınması gereken bir başka unsorda yapısal destek kirişlerinin varlığıdır. Yapısal kirişler bazı yönlerden gelen ışınımı engelleyebilir ve ek gölgelere neden olabilir. İdeal bir serada bu yer kaplayan destek kirişleri bulunmaz ve bazı polietilen sera kaplamaları bu yapısal destek birimlerine gereksinim duymamaktadır. Kontrol ve deneysel seralar arasında benzerlik sağlayabilmek için her iki serada da aynı yapısal destek malzemesi kullanılacaktır.

İnşa edilen seralar Eden projesi seralarının boyutlarında olacaktır. Eden projesine ait seraların kubbeleri Şekil 4'te verilmiştir. Bu deneyde kopyalanması için Eden projesindeki Akdeniz biyomunun büyüklüğü seçilmiştir. Önerilen seralar 30 m yüksekliğinde olup 6540 m²'lik bir alanı çevrelemektedir ("Akdeniz Biyomu"). Bu büyük boyut söz konusu ekosistemin küçük bir seraya oranla daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlayacaktır.

Şekil 4 Cornwall, İngiltere'deki Eden Projesi. Eden projesi dünyadaki en büyük seraları içeren turistik bir mekandır. Dünya içerisindeki biyomlar burada canlandırılmaktadır.

Kaynak: <http://botanytcd.files.wordpress.com/2009/09/eden-project.jpg>

Net Birincil Üretkenliğin Ölçülmesi

Net birincil üretkenlik belirli bir zaman içerisinde biriken toplam organik madde miktarı olarak tanımlanır (Clark, 2001). Bu nedenle, ototrofik üretkenliği ölçebilmek için yeni yaprakları, dalları, tohumları, kökleri vs. içeren tüm yeni bitki birimleri değerlendirmeye alınacaktır (Clark, 2001).

Sera içerisinde rastgele kuadratlar seçilerek biyokütle değişimi aylık olarak ölçülecek ve kayıt edilecektir. Aylık veriler, vejetasyondan kırılarak alınan örneklerin kuru ağırlığının ölçülmesi şeklinde elde edilecek ve aynı zamanda söz konusu kuadrat içerisinde toplanan ölü vejetasyonu da içerecektir (“NBÜ’nün Hesaplanması”). NBÜ buradan Weigert ve Evans’ın 1964’teki (r burada çürüme hızıdır) denklemi kullanılarak hesaplanacaktır:

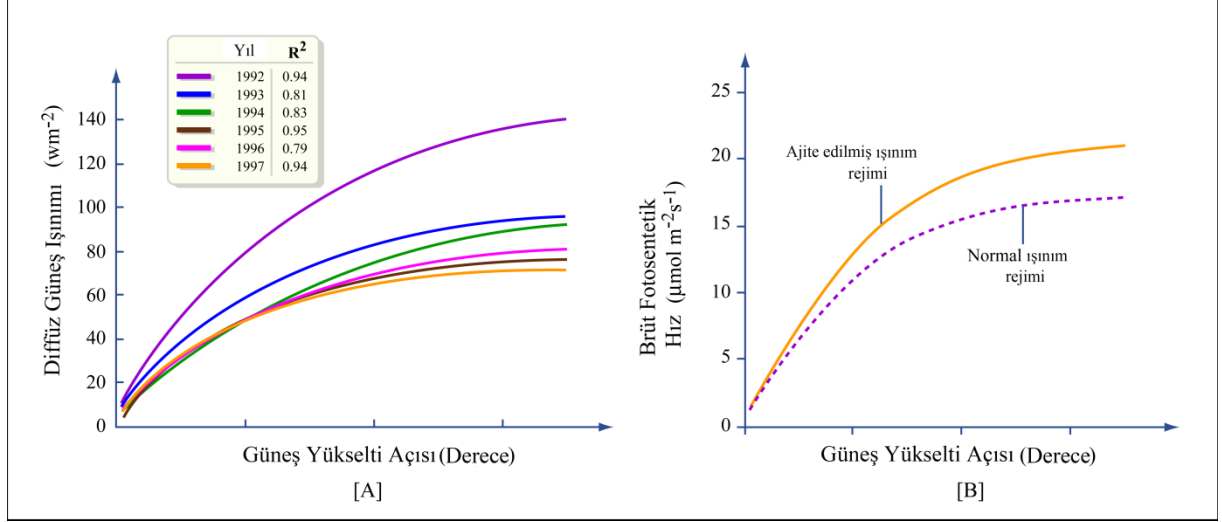
$$NBÜ = \sum \Delta \text{Biyokütle} + \Delta \text{Toplam Ölü} + r(\text{Toplam Ölü})$$

Bu deneyin on yıllar boyunca kesintisiz olarak sürdürülmesi planlanmaktadır, böylece karasal ototrofların sülfat aerosol manipülasyonuna verdiği uzun dönemli tepkiler nicelleştirebilecektir. Deneyin tam süresi deneyden elde edilen sonuçlara ve bu sonuçların deneyin devam etmesini gerektirip gerektirmemesine bağlı olacaktır.

Beklenen Sonuçlar

Geçmişte yapılmış çalışmalar ve deneyler önerilen DIKS deneyinin olası sonuçları hakkında tahminler yapabilmemizi sağlamaktadır. Stratosfere sülfür aşılmasının olası etkileri üzerine yapılan öngörülerin çoğu önerilen jeomühendislik tasarısının volkanik patlamalara olan benzerliği üzerine kurulmuştur. Lianhung Hu ve arkadaşları Pinatubo Dağı patlamasının Harvard

ormanları üzerindeki etkilerini çalışmışlardır (2003). Deneyleri volkanik patlamadan kaynaklı diffüz ışınlam oranındaki artışın Harvard ormanlarının üretkenliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şekil 2’de gösterildiği gibi, araştırmacılar, hem diffüz güneş ışınlamalarının hem de



Şekil MIT OpenCourseWare’e aittir

Şekil 2 Pinatubo Dağı patlamasının Harvard Ormanlarında gözlemlenen etkileri 2a) Diffüz Güneş Işınımı ile Güneş Yükselti Açısı 2b) Brüt Fotosentetik Hız ile Güneş Yükselti Açısı. 1991’deki patlamayı izleyen yıllarda hem diffüz radyasyon hem de fotosentez hızında artış olmuştur (Gu, 2003’ten uyarlanmıştır).

Volkanik patlamalar yoluyla atmosfere sülfür dioksit aşılması nadir gerçekleşen izole bir olaydır. Dolayısıyla küresel iklim değişikliğini yumuşatabilmek için stratosfere yapılan sülfür aşılmasının uzunca bir süre ve sürekli olarak sürdürülmesi gerekmektedir. Her ne kadar ilkin sonuçlar volkanik patlama benzetmesi ile uyuşsa da uygulama süresi arttıkça sonuçların bu doğal analogdan ne derece sapacağını tahminlemek oldukça zordur. Kaygılarımızın ve sorularımızın çoğunun küresel iklim değişikliğini yumuşatmak için yeterli sürekliliğe sahip olmayan volkanik patlamalar tarafında karşılanabileceği beklenmemelidir. Küresel iklim değişikliğini stratosferik sülfür aşılması

yoluyla hafifletmenin kullanılabilirliğini anlayabilmek için önerilen DIKS deneyi gibi sürekli uygulamanın etkilerini ölçen ek deneylerin yapılması gerekmektedir.

Stratosferik sülfür aşılmasının ototrofik üretkenliğin artmasına neden olduğu ziraat ve ormancılarının oturttuğu tarımsal prensipler tarafından da desteklenmektedir (Gu, 2003). Bitki örtülerinin doğrudan ışıınım yerine düffüz ışıınım kullanıldığında daha yüksek fotosentetik etkinliğe sahip oldukları gösterilmiştir (Gu, 2003). Diffüz ışıınım bitkilere birçok farklı açıdan ulaşır ve dolayısıyla bitki yüzeyinin daha geniş bir bölümünün fotosentez yapmasına izin verir.

Jeomühendisliğin beklenmeyen negatif etkileri üzerine oldukça fazla yazılıp çizilmiştir fakat ben bu deneyin positif bir etki ortaya çıkartacağını öngörmekteyim; yani stratosferik sülfür aşılması net birincil üretkenliği arttıracaktır. Eğer deney gelen ışıınımdaki değişikliklerin birincil üretkenliği teşvik edeceğini bulursa birincil üreticilerin karbon depoları olarak etki etme yeteneklerini arttırıyoruz anlamına gelmektedir. Bazı jeomühendislik tasarıları sadece karasal ototrofların karbon depo potansiyellerini arttırmaları üzerine odaklanmıştır. Stratosferik sülfür aşılmasının iki kat etkili olduğu ortaya çıkabilir çünkü hem yüzeye doğrudan ulaşan güneş ışıınım miktarını azaltarak soğumaya neden olur hem de karasal karbon dioksit depolarının etkinliğini arttırarak atmosferden karbon dioksit çeker.

Öneriler ve Sonuçlandırıcı Tartışma

Önerilen DIKS deneyinde karasal ototrofların, stratosfere sülfür aşılması sonucunda güneş ışıınımda gerçekleşen değişikliklere verdiği tepkiler üzerinde durulmaktadır. Okyanuslar Dünya yüzeyinin %71'ini kaplamaktadır. Dolayısıyla stratosferik sülfür aşılması sonucunda doğan ışıınım değişikliğine sucul sistemlerin verdiği cevapları incelemek oldukça önemlidir. Sucul sistem

önerilen DIKS deneyinin kapsamının dışındadır fakat stratosferik sülfür aşılmasının dünya ölçeğinde uygulanmasının olası sonuçlarını daha iyi anlayabilmek için araştırılması gerekmektedir.

Stratosferik sülfür aşılması ve jeomühendislik tasarıları büyük oranda çevrenin dünya ölçeğinde manipüle edilmesini içerir. Evet, jeomühendislik tasarılarının sonuçları üzerindeki bilgilerimizi arttırabilmek için deneyler tasarlayabiliriz. Bazı deneylerin beklenmeyen pozitif sonuçlar verdiğini bulabileceğimiz gibi bazılarının ise negatif sonuçlar verdiğini görebiliriz. Fakat bir jeomühendislik tasarısını düşünebileceğimiz her açıdan sınısak bile halen farkına varmadığımız veya öngöremeyeceğimiz yan etkileri olabilir. Şu anda biyosferimizi ve bütün karmaşık işlevlerini doğru bir şekilde modelleyememekteyiz. Dolayısıyla jeomühendisliğin sonuçlarının tam olarak anlaşılabilmesi için fiziksel uygulamalar gerekmektedir.

Küresel çevreyi bilerek değiştirmek küresel iklim değişikliğini yumuşatmak için öne sürülmüş en iyi fikir olmayabilir. Fakat jeomühendislik tasarılarını sınamak önemlidir çünkü diğer öneriler, örneğin karbon dioksit salınımlarının azaltılması gibi, sonuç vermedikçe jeomühendislik dünyamızı kurtarmak için yönelmemiz gereken bir yöntem olabilir. Eğer olabileceklerin en kötüsü gerçekleşirse, ortaya çıkabilecek yan etkiler ne kadar iyi araştırılmış ise bunlarla mücadelemiz o derecede başarılı olacaktır. DIKS deneyini ben tam da bu amaca yönelik sundum: yani stratosferik sülfür aşılması ile yapılan jeomühendisliğin sonuçlarının daha iyi ortaya konabilmesi için.

Kaynaklar

Aucamp, P. J. (2007). Questions and answers about the effects of the depletion of the ozone layer on humans and the environment. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 6(3), 319-330.

- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41-48.
- Bauman, J. J., Russell, P. B., & Geller, M. A. & Hamill, P. (2003) A stratospheric aerosol climatology from SAGE II and CLAES measurements: 2. Results and comparisons, 1984– 1999. *J. Geophys. Res.* 108, 4383
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications*, 11(2), 356-370.
- Crutzen, P. J. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77(3-4), 211-219.
- Desonie, Dana. (n.d.). Global Climate Change. *Biology encyclopedia*. Retrieved (2009, October 18) from <http://www.biologyreference.com/Fo-Gr/Global-Climate-Change.html>
- Dupont, A. (2008). The strategic implications of climate change. *Survival*, 50(3), 29-54.
- Estimation of NPP for grasslands. Retrieved from http://daac.ornl.gov/NPP/html_docs/grassland.html
- Fajer, E. D. (1989). How enriched carbon-dioxide environments may alter biotic systems even in the absence of climatic changes. *Conservation Biology*, 3(3), 318-320.
- Garrett, C. W. (1992). On global climate change, carbon dioxide, and fossil fuel combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 18(5), 369-407.
- Giacomelli, G. and Roberts, W.J. (1993). Greenhouse Covering Systems. Retrieved November 5, 2009, from University of Arizona website: <http://ag.arizona.edu/CEAC/research/archive/HortGlazing.pdf>

- Giacomelli, G. (1999) Workshop Summary: Lecture 1 Components of Radiation: Definition of Units, Measuring Radiation Transmission, Sensors. Retrieved November 5, 2009, from New Brunswick Rutgers website: <http://www.cook.rutgers.edu/~horteny/Workshop?Summary.pdf>
- Govindasamy, B., Thompson, S., Duffy, P. B., Caldeira, K., & Delire, C. (2002). Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 2061.
- Grassl, H. (2009). Scenarios of climate change. *European Physical Journal-Special Topics*, 176, 5-12.
- Gu, L. H., Baldocchi, D., Verma, S. B., Black, T. A., Vesala, T., Falge, E. M., et al. (2002). Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107(D5-6), 4050.
- Gu, L. H., Baldocchi, D. D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Michalsky, J. J., Urbanski, S. P., et al. (2003). Response of a deciduous forest to the mount pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 299(5615), 2035-2038.
- Heino, J., Virkkala, R., & Toivonen, H. (2009). Climate change and freshwater biodiversity: Detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews*, 84(1), 39-54.
- Hofmann, D. J. and Solomon, S. (1989). Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon. *J. Geophys. Res.* (D4), 5029–5041.
- Keith, D. W. (2000). GEOENGINEERING THE CLIMATE: History and Prospect1. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 245-284.
- Kravitz, B., Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G., & Marquardt, A. B. (2009). Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114

- Lenton, T. M., & Vaughan, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5539-5561.
- Lopes, A. V., Girao, L. C., Santos, B. A., Peres, C. A., & Tabarelli, M. (2009). Long-term erosion of tree reproductive trait diversity in edge-dominated atlantic forest fragments. *Biological Conservation*, 142(6), 1154-1165.
- Mediterranean biome. Retrieved from <http://www.edenproject.com/visiting-eden/whatshere/mediterranean-biome/index.php>
- National Weather Service. (2009). *Climate for Albany, New York*. Retrieved from <http://www.rssweather.com/climate/New%20York/Albany/>
- National Weather Service. (2009). *Climate for Dallas-Fort Worth, Texas*. Retrieved from <http://www.rssweather.com/climate/Texas/Dallas-Fort%20Worth/>
- Rasch, P. J., Tilmes, S., Turco, R. P., Robock, A., Oman, L., Chen, C. (., et al. (2008). An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 4007-4037.
- Remmert, H. (1980). *Ecology a text book*
- Robock, A. (2008). 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 64(2), 14-+.
- Tilmes, S., Muller, R., & Salawitch, R. (2008). The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes. *Science*, 320(5880), 1201-1204.
- Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 75(7), 1862-1876.

World Wildlife Fund. (2001). *Texas blackland praries*. Retrieved from <http://www.nationalgeographic.com/wildworld/profiles/terrestrial/na/na0814.html#wildside>

Wuebbles, D. J., V. Naik, and J. Foley (2001). Influence of geoengineered climate on the biosphere. EOS Transactions, AGU, 82(47), AGU Fall Meeting.

MIT OpenCourseWare

<http://ocw.mit.edu>

1.018J / 7.30J Ekoloji I: Dünya

Güz 2009

Bu materyallere atıfta bulunmak ya da kullanım koşulları için <http://ocw.mit.edu/terms> adresini ziyaret ediniz.