

Troposfer ve Alçak Stratosferde Sülfat Aerosollerinin Planlanmamış Etkileri

Massachusetts Institute of TechnologyDepartment of Civil and
Environmental Engineering

11/29/2009

Yönetim Özeti

Sülfat aerosol enjeksiyonu, atmosferdeki karbondioksit birikimine bağlı olarak Dünya'nın yüzey ısısındaki artışı engellemek için öne sürülen bir jeomühendislik planıdır. Atmosferdeki aerosollerin birikimi, Mount Pinatubo ve El Chichón'daki büyük volkanik patlamaların da gösterdiği gibi güneş ışığını dünyadan geri yansıtmaktadır. Bu püskürmelerin ikisi de püskürmeleri takip eden yıllar boyunca bölgesel yüzey sıcaklıklarında belirgin düşüşlere neden olmuştur; sülfat aerosollerinin bir enjeksiyonunun da aynı şeyi yapması beklenmektedir. Ancak planın, bölgesel yağış değişimleri gibi, ozonun incelmesi ve asit yağmuru gibi potansiyel yan etkileri bulunmaktadır. Ek olarak, sülfat aerosol enjeksiyonu karbon dioksidin devam eden birikimini hedeflememektedir (address).

Planın küresel yüzey sıcaklıklarını düşürmedeki etkinliğini ve potansiyel sonuçlarının ciddiyetini ölçmek için, küçük-ölçekli bir aerosol enjeksiyon planını içeren bir deney önerdim. Deneysel dizayn Robock *et al.* (2008) tarafından yapılmış olan bilgisayar simulasyon modellerine dayanmaktadır. Deneyin hedefi, Kuzey Kutbun'daki yaz deniz buzulunun miktarını arttırmayı amaçlayan bir planın yan etkilerini soruşturmadır. Deneyin bize, bir sülfat aerosol enjeksiyon planının sonuçlarına dair değerli bilgiler sağlayacak olmasına rağmen, herhangi tipte bir jeomühendislik planı uygulanmadan önce daha ileri derecede deneyler gerekli olacaktır.

Küresel İklim Değişikliğine Bir Giriş

Endüstriyel Devrimin ilerlemesinden, dünya üzerindeki toplumlar üretim kapasitelerini geliştirme yönünde çaba göstermiştir ve, sonuçta küresel emisyonlara olan katkılarını arttırmışlardır. Sonuç olarak, atmosferdeki karbon dioksitin oranı milyon başına (ppm) 280 parçacıktan 380 ppm'e çıkmıştır, ve ortalama küresel yüzey sıcaklığı 0.8°C artmıştır (Bala, 2009). Bu artışlar insan kökenli bozulmanın sonucudur, ve kontrolsüz olarak devam ederek, tüm dünya boyunca ekosistemleri büyük ölçüde değiştirebilecek belirgin iklim değişikliklerine yol açması olası görünmektedir.

Küresel ısınma ve iklim değişimi, antropojenik sera gazlarının atmosferdeki derişimindeki artışların sonucudur. En önde gelen sera gazlarından birisi karbon dioksit, metan, su buharı, ozon ve nitröz oksittir. Tüm bu gazların küresel iklim değişimi biliminde önemli rol oynamasına karşın, karbon dioksit üzerinde çok sayıda modeller ve varsayımlar oluşturulandır, ve insanların atmosfere salınımında en önmeli rolü oynadığı gazdır.

Doğal sera gazları küresel iklimimizde önemli bir rol oynamaktadır.

Dünya'nın yüzeyini yaşanabilir bir sıcaklıkta tutan bir battaniye olarak işlev görmektedir. Buna sera etkisi denir. Su buharı ve karbon dioksit gibi sera gazları olmadan, Dünya'nın yüzeyi, normal küresel ortalama 14 °C yüzey sıcaklığı yerine yaklaşık -19 °C olabilirdi (Le Treut *et al.*, 2007). Bu sıcaklık insan ırkının sağ kalmasını ve üretkenliğini sağlamıştır ve böylece, günümüzde küresel iklim değişikliğine ve ekosistemlerin yok edilmesine katkıda bulunan Dünya'nın sanayileşmesini sağlamıştır.

Atmosferdeki karbon dioksitin artışı iki temel bileşene sahiptir: yana fosil yakıtlardan ve çimento üretiminden gelen emisyonlar, ve ormansızlaştırma ve orman-hasadı gibi toprak kullanımındaki değişimler. Tipik bir döngüde, karadaki ve okyanustaki doğal giderler (sinks) atmosferdeki karbon dioksidi düzenler ve ortamdan alır (remove). Ancak, karbon dioksit daha sıcak sularda daha çözülebilir durumdadır, bu da “antropojenik karbonun aşağı doğru taşınımını” azaltır (Bala *et al.*, 2005). Geçtiğimiz 20 yıl içinde, fosil yakıt emisyonlarının büyüme oranı 1990 yılındaki yılda %1.3 değerinden 2006 (?) yılında %3.3'e çıkmıştır (Canadell *et al.*, 2007). Karbon dioksitin atmosfere salınımı arttıkça, doğal karbon giderlerinin etkinliği azalmaktadır.

Potansiyel sonuçlar

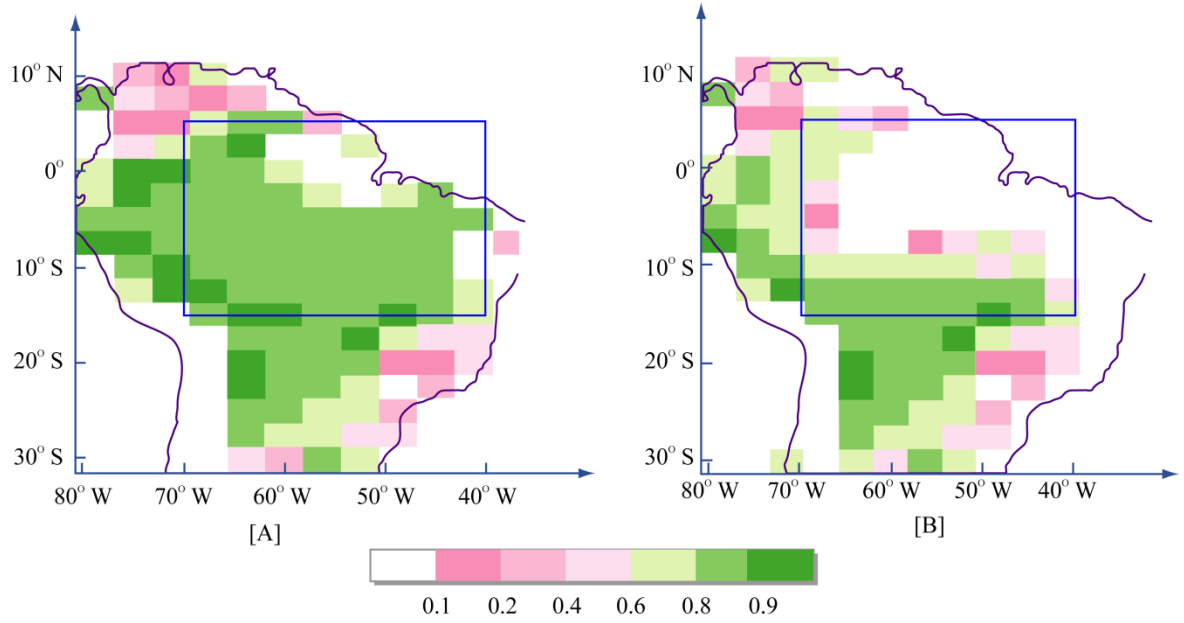
Eğer küresel salınımlar bu oranlarla artmaya devam ederse, sonuçları büyük olabilir. Schneider (2009) atmosferimizin 1000 ppm CO₂'ye sahip olduğu senaryoyu sunmaktadır. Bu senaryo, dünyaya özgü olan, dağ buzulları ya da mercan-resif komüniteleri gibi ekosistemlerin olmadığı bir dünyaya yol açabilir. Schneider'in sunduğu senaryonun aşırı (ekstrem) olmasına karşın, sunduğu fikirler mantıklıdır. Eğer belirttiği sonuçlardan sadece birkaçı gerçek olursa, günümüzdekinden belirgin biçimde farklı bir dünya ile karşılaşabiliriz.

Örneğin, mevcut küresel sıcaklığın 1 °C artışı resiflerin ağarmasına (bleaching) yol açabilir. Mercan resifleri çevresel değişikliklere aşırı derecede duyarlıdır, ve ciddi mercan ağarması zaten gerçekleşmiştir, 1998 yılında resif mercanlarının yaklaşık %16'sının öldüğü zamanki gibi (Walther *et al.* 2002). 2.7 °C'lik bir artış Grönland buz tabakasının erimesine neden olabilir, ve 3 °C'lik bir değişimde, “kara karbon tersine dönüşler ve Antarktik buzul tabakalarının destabilizasyonu” gibi katastrofik değişimler meydana gelebilir (Bala, 2009).

Sıcaklıklar bölgeler arasında değişim gösterebilir, çünkü maksimum

sıcaklıklar minimum sıcaklıklardan daha yavaş artmaktadır, yani yüksek enlemlerde daha uzun donsuz dönemler olurken orta enlem bölgelerindeki sıcaklık değişimleri daha az belirgin olacaktır (Walther *et al.*, 2002). İklim değişimi aynı zamanda çoğu türde farklı reaksiyonlara neden olmuştur. Üremesi ya da göçü mevsimlere dayanan türler daha erken ulaşmaktadır, baharda göç eden kuşlar gibi. (Walther *et al.*, 2002)

Gerçekte, iklim değişimini frenlemeye yönelik çabalara rağmen ekosistemler çoktan uzun-vadeli değişimlere doğru yönelmiş olabilir. Jones *et al.* (2009) Amazon yağmur ormanlarını içeren bir modeli tanımlamaktadır, bu model küresel ortalama sıcaklıktaki bir artışın toprak dekompozisyonunu arttırdığını ve, yağıştaki azalış ile birlikte, bitki verimliliğinin önemli ölçüde düşmesine neden olduğunu önermektedir. “Vejetasyon örtüsü ve karbon rezervi” (Jones *et al.*, 2009) gibi iklim değişiminin bazı etkileri yağıştan sıcaklığa değişimin hızında farklılık gösterdiği için, , iklim aynı kalsa ya da bir önceki durumuna gelse de hem karasal hem de sucul ekosistemlerin değişmeye devam etmesi olasıdır. Bu da 2050 civarında, figür 1’de görüldüğü gibi, Amazon ‘da ki ağaç örtüsünün günümüzdekinin %50’sinden aşağı olacağı anlamına gelebilir.



Şekil MIT OpenCourseWare'e aittir

Şekil 1. 2050 yılındaki Amazon ormanı ağaç örtüsü. Renk gradiyenti kısmi kaplamayı göstermektedir. **a** mevcut **b** tahmin edilen (Jones *et al.*, 2009)

Jeomühendislik: Tarihçe ve arkaplan

Karbon dioksit salınımlarını önlemeye yönelik küresel çabalara rağmen, atmosferdeki karbon dioksitin derişimi halen artmaktadır, ve kullanım azatılımı tek başına çevreyi korumak için yeterli gibi görünmemektedir. Jeomühendislik daha soğuk bir iklim oluşturabilmek, artan küresel sıcaklık ve karbon dioksit konsantrasyonlarını önleyebilmek amacıyla için dünyanın manipule edilmesidir. İklim değişimi sorununa insan müdahalesi hem olumlu hem de olumsuz özelliklere sahiptir, fakat aşırı çevresel değişimleri

önlemek için acil durum çözümü olabilir.

Jeomühendislik fikri 1950'ler ve 60'lardan beri gündemdedir. İki ana oyuncu A.B.D. ve S.S.C.B. idi, her ikisi de iklimi kontrol etme yolları peşindeydi, sıklıkla askeri nedenlerle (Keith, 2000). Sovyetler Birliği iklim-kontrolünü "Sovyet Biliminin en acil sorunlarından biri" olarak ele alıyordu (Keith), ve bugünlere benzer çok sayıda çözümü öne sürüyordu. Bunlar bulut bombardımanı (cloud seeding) ve hem Kuzey Rusya hem de Ekvator'da iklim örüntülerini değiştirmek için aerosollerin kullanımını içeriyordu. A.B.D. benzer şekilde 1950'lerde bulut bombardımanı ile ilgili deneyler yaptı, ve Vietnam savaşı sırasında bulut bombardımanını askeri hedeflerini gerçekleştirmek için kullandı. Bu da "Çevresel Modifikasyon Teknikleri" nin düşmanca amaçlarla kullanımını yasaklayan uluslar arası bir anlaşmaya önayak oldu.

Bu çağdan sonra, jeomühendisliğe sıklıkla olumsuz bir bakış açısıyla yaklaşıldı, ancak 1990'larda hakim bilimsel topluluk tarafından yeniden ele alındı. Araştırmalar, karbon dioksitin mevcut seviyelerinin kalkmasının (dissipate) için 1000 yılı alabileceğini gösterdi, alternatif çözümlere olan ilgi zirveye ulaştı. Jeomühendislik popüler bilimsel yayınlarda yeniden

gözükmeye başladığında bile, çok az sayıda bilim adamı kariyerlerini jeomühendislik konularını araştırmaya adamaya hevesliydi. Jeomühendislik son birkaç yıla kadar, Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli gibi antropojenik iklim değişimi raporlarına dahil edilmemiştir.

Şimdi, jeomühendislik planlarının büyük kısmı iki kategoriye ayrılmaktadır: Dünya'ya ulaşan güneş ışınımının miktarını azaltmak, ve atmosferden karbon dioksidi uzaklaştırmak. Işınımı azaltmayı içeren planlar, genellikle Dünya'nın albedosunu, ya da yansıtımını arttırmayı içermektedir. Bu ya Dünyanın yüzeyinde daha yüksek yansıtma özelliğine sahip bitkileri ya da ekinleri genetik olarak modifiye ederek, ya da atmosferde bulut bombardımanı, atmosfere aerosol bırakılması ya da güneşi yansıtacak uzay kalkanlarının fırlatılması ile yapılabilir. Atmosferden karbon dioksitin uzaklaştırılmasını içeren planlar, okyanusların demir ile fertilizasyonunu, karbon dioksitin yeraltında depolanması ve sucul karbon yakalaması ile.

Bireysel Planlara Genel Bir Bakış

CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmanın bir yolu, karbon dioksit derişimini biyokütlede (fitoplanktonda) depolayarak azaltmayı hedefleyen

okyanusların demir ile fertilizasyonudur. Ek demir sağlayarak ki bu fitoplanktonların fotosentez ve büyümelerinde anahtar besleyicilerden biridir, fitoplankton popülasyonu artırılabilir ki bu sonuçta atmosferden fitoplanktonlar tarafından alınan karbon dioksit miktarını artırır. Göreceli olarak basit bir plan olarak görünmesine karşın, çalışacağına dair bir gösterge yoktur, ve yakın zamandaki deneyler eklenen demirin büyük kısmı krill’ ler tarafından alınmaktadır.

Sıklıkla öne sürülen bir başka plan ise güneş kalkanıdır. Hem masraf hem de fizibilite açısından öne sürülen planların aşırı ucundadır. Güneş kalkanının diğer planlardan daha ‘yeşil’ bir çözüm olma ihtimaline karşın, kendine özgü potansiyel zararlı etkilere sahiptir. Bir güneş kalkanının konsepti, küresel ortalama yüzey sıcaklığını düşürmek için güneş ışınları sadece birkaç derece yansıtılmalıdır. Bu küçük yarı-saydam diskler “L1 Lagrange noktasından güneş yönüne” koyularak başarılabılır (Keith, 2000) Ancak, bir uzay kalkanı ekranı, öne sürülen planların en pahalılarından birisidir.

Jeomühendislik ile ilgili Sorunlar

Genel olarak, jeomühendisliğe eşlik eden sorunlar ve komplikasyonlar

çoktur. Planların uygulanması ve kontrolüne bağı politik çatışmalardan, jeomühendislik planlarının çalışma yeteneğine kadar çeşitlilik gösterir, çünkü çoğu jeomühendislik modelinin üzerine kurulduğu mevcut iklim öngörü yöntemlerimiz isabetten yoksundur (Bala, 2009). Ek olarak, girişilen herhangi bir planın belirsiz bir zamana kadar bakımı yapılmalıdır çünkü diğer şekilde dünya hızlı bir küresel sıcaklık ya da karbon dioksit derişimi artışına doğru gidebilir.

Stratosferik Aerosoller

Bu makalenin geri kalanı, sülfat aerosollerinin troposfer ve alçak stratosfere bırakılmasına odaklanmaktadır. Bu plan güneş ışıınımı yönetimi kategorisi altına girmektedir. Sülfat aerosollerinin hedefi, atmosferde güneş ışığını dünyadan yansıtacak aerosollerini arttırarak yüzey sıcaklığını düşürmektir. Bu gözlemlerin temeli Mt. Pinatubo ve El Chichón gibi volkanik püskürmelerden gelmektedir.

1991 ve 1982'nin püskürmeleri 20. yüzyılın en büyük iki volkanik püskürmesiydi (Robock *et al.*, 2007). Volkanik püskürmeler sulfur dioksit ve diğer tanecikli maddeleri stratosphere salmaktadır. Filipinler'deki

Pinatubo püskürmesi yaklaşık 20 Tg SO₂ alçak stratosphere salmıştır (Robock et al., 2009), ve 1991 den 1993'e küresel sıcaklıkta yaklaşık 1°C lik bir düşüşe neden olmuştur (Lane *et al.*, 2007). Volkanik püskürmeler bir stratosferik aerosol jeomühendislik planına analog olabilmesine karşın, önemli bir farklılık bir püskürme çok sayıda günler boyunca aerosolleri salarken, bir jeomühendislik planı sabit, kadememli bir salınımına ihtiyaç duymaktadır.

Sülfat aerosollerini stratosphere salmak derin bir etkiye sahip olabilir çünkü sülfürün stratosferdeki doğal değişimi kabaca yıllık 0.1 Tg S dir, Mt. Pinatubo'nun atmosphere saldığı 20 Tg S'e karşılık. Sülfat aerosolleri, troposferden sulfur bileşiklerinin taşınımı nedeniyle doğal olarak bulunur, ancak volkanik püskürmeler tarafından bırakılan değişimler doğal olarak bulunanlardan çok daha yüksektir. Aerosoller, stratosferde troposferdekine göre çok daha yüksek kalıcılık süresine sahiptir. Çok sayıda güne karşılık çok sayıda yıllık bir kalıcılık süresi, iklimsel etkileri korumak için daha az aerosolün stratosphere bırakılması gerektiği anlamına gelir (Rasch *et al.*, 2008). Stratosferin özellikleri aerosollerin fırlatma bölgesinden daha geniş bir alana disperse olarak, local yerine küresel bir etkiye yol açmasına neden

olur, jeomühendisliğin önemli bir özelliği. Figür 2 stratosferin, troposferin ve tropopause'nin (ikisini bölen tabaka) konumunu, göstermektedir. Herhangi bir sülfat aerosol jeomühendisliği planı aşağı stratosphere aerosollerin fırlatılmasını hedefleyebilir, dünyanın yüzeyinin 10 ila 15 km üzerinde.

**Şekil telif hakları kısıtlamasından
dolayı çıkartılmıştır**

Şekil 2: Atmosferin şematiği. Troposfer 0 dan 10 km'ye kadar konumlanmıştır ve stratosfer 10 dan 50 km ye kadar konumlanmıştır. Aşağı stratosfer Dünyanın yüzeyinden 10-15 km den daha yukarıdadır.

http://www.windows.ucar.edu/earth/Atmosphere/images/stratosphere_diagram_sm.jpg

Atmosferik aerosollerin kaynağı hem doğal hem de antropojenik kaynaklar olabilir. Örnekler, dimetil sulfidi, sülfür dioksidi, hidrojen sülfidi ve karbonil sülfidi içermektedir (OCS). OCS stratosferde bulunan sülfürün kabaca yarısını sağlarken diğer gazlar ise troposferde daha büyük bir rol

oyunar. Stratosferdeki sülfat aerosollerinin büyük kısmı sülfürik asit formunda bulunur. Geniş bir alanda aerosol parçacıklarının dağılması çoğunlukla rüzgardan kaynaklanır, ancak bir sülfat partikülünün ömrü, meteorolojik koşullarını, partikül boyutunu içeren daha fazla değişkene bağlıdır (Rasch *et al.*, 2008).

Herhangi bir jeomühendislik planınja girişmeden önce, riskleri değerlendirmek önem taşır. Sülfat aerosollerini ile yapılan jeomühendislik kğresel ekosistemde değişimlere yol açabilir, bunların en zararlıları hidrolojik döngüdeki, atmosferik sirkülasyondaki değişimler, devamlı okyanus asidifikasyonu ve asit yağmurlarıdır. Robock (2008) daha çok sayıda, politik ve yüzeysel sorunlar dahil tüm planları kapsayan potansiyel sonuçları özetlemektedir, göklerin beyazlaşması ve mevcut anlaşmaları ilgilendiren çatışmalar gibi.

Sülfat Aerosollerinin Kasıtsız Sonuçları

Sülfat aerosollerini atmosfere bırakıldığında ne olabileceğini anlamak için, ve bu sayede bu tip bir jeomühendislik planının kasıtsız sonuçlarını tahmin etmek için, geniş ölçekli volkanik püskürmeleri analiz edebiliriz.

Örneğin, Mout Pinatubo püskürmesi hava sıcaklıklarını düşürdü ve atmosferde mevcut olan su buharının miktarını azalttı (Trenberth ve Dai, 2007). 1992 de, Pinatubo püskürmesini takiben, dünyanın belirgin bir yüzdesi kuraklık koşulları ile yüzleşti, bu püskürme ile ilişkilendirilen bir olguydu (Dai *et al.*, 2004). Ek olarak, 1992 yılındaki yağış değişimleri diğer yıllara nazaran daha büyük olmuştur, bu da sülfat aerosollerinin atmosferdeki artışı ile hidrolojik döngü arasındaki bir ilişkiyi belirtmektedir (Trenberth ve Dai, 2007). Dahası, tropiklerdeki volkanik püskürmeler, Kuzeyküre yazlarında ısınmaya neden olurken yüksek enlemlerde püskürmeler Kuzeyküre kışlarında ısınmaya neden olmaktadır (Oman *et al.*, 2006). Mevsimsel sıcaklık değişimleri atmosferik sürkülasyondaki değişimlere bağlıdır. Sülfat aerosollerı tek bir lokasyondan bırakılsa dahi yağışta, sıcaklıkta ve su buharında küresel değişimlere yol açma potansiyeline sahiptir.

Stratosferik aerosol salınımı aynı zamanda asit yağmurlarında artışa neden olabilir. Bazı aerosoller troposfere kadar ulaşabilir ve su ile birleşerek sülfirik asit oluşturabilirler, sonuçta bu daçeşitli ekosistemlerde asit birikimine neden olabilir (Kravitz *et al.*, 2009). Bu artışlar, şehir

habitatlarına oranla bozulmamış habitatlarda daha kolay farkedilebilecektir ve belirgin derecede yüksek yağış rejimine sahip alanlar en büyük etkiyi götrecektir (Kravitz *et al.*, 2009). Bazı ekosistemlerde sülfürün gerekli besleyici olmasına karşın, diğer ekosistemlerde aşırı fazla miktarlarda bulunması aşırı derecede zararlı olabilir. Asit yağmuru sucul ekosistemlerdeki biyoçeşitlilikte bir azalmaya yol açmıştır ve asidik topraklar ağaçlarca kullanılabilir olan besleyicilerin miktarını sınırlayabilir (Kanan ve James, 2009). Asit yağmuru tarafından etkilenen bölgeyi kontrol etmek mümkün değildir çünkü sülfat aerosolleri dünya boyunca bulut kimyasında değişimlere yol açar.

Bu planın bir başka belirgin potansiyel sonucu ozonun delinmesindeki artıştır. Antarktika üzerindeki mevsimsel ozon tabakası suyun yüzeyindeki ve nitrik asit partiküllerindeki kimyasal tepkimeler sonucu oluşur, ve sülfat aerosollerinin salınımı bu kimyasal tepkimelerin meydana geldiği yüzey alanını arttırabilir (Robock, 2008). Sonuç olarak, ozon deliği daha da büyüyebilir ve daha fazla morötesi ışıınım dünyaya gelebilir. UV radyasyonu olumsuz etkilere sahiptir ve bitkilerdeki fotosentez kısımlarına, DNA'ya zarar verirken insanlarda deri kanserine neden olabilir (Stapleton,

1992).

Son olarak, stratosferik aerosoller ile küresel sıcaklıktaki artış ile mücadele etmek devamlı karbon emisyonlarını hedeflemez. Atmosferdeki sera gazlarının sürekli olarak artışı okyanuslarda asitlenmeye yol açar. Okyanus, atmosferdeki fazla karbon dioksitin belirgin bir kısmını alır (Robock, 2008), çünkü CO₂ çözündüğü zaman çözülmüş karbon dioksit, karbonik, bikarbonat ve karbonatı oluturur. Okyanus asidifikasyonu belirgin biçimde mercan resifleri gibi sucul ekosistemleri etkiler ve tüm biyolojik zincirde yan etkileri olabilir (Robock, 2008).

Bunlar, bir sülfat aerosol jeomühendislik planından ortaya çıkabilecek sonuçların sadece birkaçıdır. Herhangi bir planın potansiyel faydaları ile birlikte etkilerinin genişliği ve ciddiyeti düşünülmelidir.

Hipotez

Stratosferik sülfat aerosollerinin gerçek etkilerini değerlendirmek için, bir deneyin yürütülmesi ve veri toplanması gereklidir. Çok sayıda potansiyel sonuç olduğu için, hiçbir deney tek başına hepsini analiz edemez. Öne sürdüğüm deney, Kuzey Kutbunda'ki yaz deniz buzulunu arttırmayı

amaçlayan bir jeomühendislik planından meydana gelebilecek sonuçları spesifik olarak sınamak için tasarlanacak bir deneydir.

Kuzey Kutbun'daki yaz deniz buzulunun miktarını arttırmayı hedefleyen bir sülfat aerosol planı, gerçekten de başarılı bir şekilde buzul seviyesini arttıracaklarını varsayıyorum (hypothesize), fakat aynı zamanda bölgesel yağış örüntülerinde büyük değişikliklere yol açacaktır. Spesifik olarak, Afrika ve Asya'da ki musonların zayıflayacağını öngörüyorum. Hipotezimi yüksek-enlem volkanik püskürmelerin analizi üzerine kuruyorum, Kuzey-yarıküre yazlarında atmosferik sirkülasyonda değişikliklere yol açan (Oman *et al.*, 2006), ve zayıflamış musonlar tarafından takibedilen olaylar (Graf, 1992; Oman *et al.*, 2006). Bir yüksek-enlem sülfat enjeksiyonu bir volkanik püskürmeye paralel olabileceği için, benzer değişimlerin takip etmesini öngörüyorum.

Musonlar, okyanus ve kara arasındaki sıcaklık gradiyenti nedeniyle oluşur. Atmosferdeki aerosollerin miktarındaki bir artışın, sıcaklık gradiyentini düşürdüğü ve kara üzerindeki bulut örtüsünü azalttığı gösterilmiştir (Oman *et al.*, 2005). Bu iki sonuç, bulutluluk ve toprak nemindeki azalış nedeniyle sıcaklıkta bir artışa neden olur (Graf, 1992;

Oman *et al.*, 2005). Daha önceki yağmurlu mevsimdeki daha az yağmur ve artmış sıcaklık kuraklıklara neden olabilir, tarımın devamına bel bağlayan yüzbinlerce insanın besin üretimini etkileyebilir. Bu öne sürülen planın ikincil bir sonucudur, fakat çok sayıda kıtadaki insanın yaşam şartlarını ve hayatta kalmasını etkileyebilecek potansiyele sahiptir.

Deneysel Dizayn

Deneysel dizaynlarımı Robock *et al.* (2008) tarafından hazırlanan modeller üzerine kurdulayacağım. Bu modeller salınan (injected) materyalin miktarını, salındığı bölgeyi ve aerosollerin boyutunu belirleyecektir. Fırlatma mekanizması için, Budyko (1977) ve Robock *et al.* (2009) tarafından yapılan önerimlere dayanıyorum.

Robock *et al.* (2008) tarafından kullanılan model “National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies ModelE” atmosfer-okyanus genel sirkülasyon modelidir. Bu model İzlanda’daki 1783 Laki püskürmesi ve Alaska’daki 1912 Katmai püskürmesini (Robock *et al.*, 2008; Oman *et al.*, 2005) takip eden koşulları başarılı bir şekilde simüle etmiştir. Gerçekte, Robock *et al.* (2008), bir control deneyini,

tropical aerosol salınımının bir simülasyonunu ve bir arktik aerosol deneyini içeren çoklu simülasyonlar yürüttüler. Dahası, kurulumun gerçek bir deneye uyarlanabileceğini gösteren bir neden olarak, simülasyon levha (durgun) bir okyanus yerine dinamik bir okyanusu simüle etmektedir. Hipotezde belirtildiği gibi, öne sürülen deney yaz deniz buzulu üzerindeki sülfat aerosol salınımının, ve ilişkili iklimsel cevapların, özellikle Afrika ve Asya'daki yağışı etkileyebilecek etkenleri değerlendirebilmek için Kuzey Kutbu üzerine odaklanacaktır.

Ancak, bunun bir deney olduğunu ve gerçek bir jeomühendislik planı olmadığını hatırlamak önemlidir. Sonuçta, sülfat seviyelerini Dünya'nın daha önce karşılaştığı ölçek içinde tutmak önemlidir. Mt. Pinatubo volkanik püskürmesi stratosphere 20 Mt SO₂ fırlatmıştır (Bluth *et al.*, 1992), ve bundan ötürü bu deney için olan sülfat seviyeleri bu seviyenin altında tutulacaktır.

Teknik Detaylar

Bu deneyde göz önünde bulundurulması gereken çok sayıda değişken vardır, bunlar partikül boyutunu, yüksekliği ve fırlatma bölgesi ile birlikte aerosolün ömrünü de içermektedir. Mt. Pinatubo püskürmesinden gelen

partiküller 0.35µm yarıçapa sahiptir, ancak daha küçük partiküllerin stratosferik ömürleri daha uzundur, bu durumda daha az salınma gerek vardır (Rasch *et al.*, 2008). Bu durumda, bu deney 0.25µm yarıçapa sahip partikülleri kullanacaktır, bunların ortalama stratosferik ömürleri 2 yıldır (Budyko, 1977). Planın etkilerinin Kuzey Kutbuna sınırlı kalması için 68°N enleminde aerosollerin fırlatılmasını öneriyorum. Atmosferik oranlara bağlı olarak boylam keyfidir (Robock *et al.*, 2008). Robock *et al.* (2009) 68°N konumunda bulunan Grönland'daki Gunnbjørn Fjeld'i önermektedir çünkü burası Kuzey Kutbun'daki en yüksek noktadır, bu durumda da materyali atmosphere bırakmak daha az enerji gerektirmektedir. Aerosollerin stratosferde troposphere göre daha uzun ömüre sahip olması nedeniyle, aşağı stratosphere salınacaklardır, 10-15 km arasında bir yüksekliğe (Robock *et al.*, 2008).

İklimsel cevabı jeomühendislik ile sınırlamak için, daha düşük oranda bir salınım kullanılmıştır, ve yeniden, Robock *et al.* (2008)'ın simülasyonunu takiben, sülfat aerosollerini 3 Mt/annum oranında salınacaktır. Bu bir deney için uygundur, çünkü her 6.67 yılda bir Pinatubo püskürmesine eşittir, Dünya'nın doğal kapasitesine aşırı yük

oluşturmayacak bir sülfat seviyesine neden olacaktır. Deney yıl boyunca devam ettirilecektir, Robock *et al.* (2008)'a göre ortalama küresel yüzey sıcaklığında bir düşüş görecektir kadar uzun bir süre boyunca. Bu 10 yıldan fazlası anlamına gelebilir, aşağı stratosphere toplamda 30 Mt SO₂ eklenecektir.

Kuzey kutbu kışına bağlı olarak, sonbahar ve kış boyunca salınımların bu derece büyük olması gerekli değildir çünkü aerosollerin karanlık kış döneminde etkisi yoktur (Robock *et al.*, 2009). Ancak, Kuzey Kutbun'daki partiküllerin ömrü tropiktekinden daha kısadır çünkü aerosoller Kutupta ilkin olarak uzaklaştırılırken, tropical aerosollerin öncelikle kutba doğru taşınması gerekmektedir (Robock *et al.*, 2008). Bu, bu deney açısından yararlıdır çünkü etkileri sadece Kuzey Kutup bölgesi sınırlamaya çalışıyoruz, dikkate değer bir çabadır çünkü yüksek-enlem volkanik püskürmelerde genellikle aerosoller püskürmenin meydana geldiği yarı küre ile sınırlı kalmaktadır (Omkan *et al.*, 2005).

**Şekil telif hakları kısıtlamasından
dolayı çıkartılmıştır**

Şekil 3: Stratosfere sülfat aerosolü salınım yöntemlerinin öne sürülen yöntemleri. Çizim, Brian West. (Robock *et al.*, 2009).

Fırlatma Mekanizması

Şimdiye kadar, farklı fırlatma mekanizmaları ile az sayıda deney yapılmıştır. Buna rağmen, uçaklar, top mermileri ve stratosferik balonlar gibi farklı fırlatma mekanizmaları gibi olasılıklar öne sürülmüştür (Robock *et al.*, 2009). Şekil 3 bu fikirleri göstermektedir.

Tüm bu seçenekler arasında, en pratik olanı uçakların kullanımıdır. Nedeni şudur, hem tropiklerde hem de Kuzey Kutbun'da alçak stratosphere uçuş için gerekli olan teknoloji zaten mevcuttur. Gerçekte, daha büyük yük boşluğuna sahip daha büyük uçaklar Kuzey Kutbun'da o bölgedeki daha düşük stratosferik yükseklik nedeniyle kullanılabilir. Robock *et al.* (2009) KC-135 Stratotanker ya da KC-10 Extender gibi uçakları önermektedir, bunların ikisi de büyük yük kapasitesine sahiptir ve devamlı olarak çalıştırılabilir. Bu uçaklardan oluşan büyük bir filo minimal ek masraflarla elverişli (uygun) olabilir çünkü halen orduda kullanımdadır.

Deneyin düşünülmesi gereken diğer bir kısmı ise sulfur dispersali yöntemidir (yayılımı). Budyko (1977) orjinal olarak, uçak yakıtına sulfur karıştırmayı önermiştir. Ancak, bu yöntem, troposferin kirlenmesini en alt

düzeye indirmek için stratosferde kullanılan yakıtın tropopause'nin altında kullanılan yakıttan ayrılmasını gerektirmektedir (Robock *et al.*, 2009). Daha pratik bir çözüm, uçağa ayrı bir tanka bağlı bir hortum ağzı eklemektir. Gerçekte, önerilen uçakların her ikisi de, Şekil 4'de görüldüğü gibi bir hortum ağzına sahiptir, çünkü bu uçaklar uçuş-sırasında yakıt ikmali için kullanılmaktadır, sonuçta fazladan bir eklemeye gerek yoktur.

**Şekil telif hakları kısıtlamasından
dolayı çıkartılmıştır**

Şekil 4: Uçuş sırasında bir uçağa yakıt ikmali yapan KC-10 Extender. *Robock et al.*, 2009'dan alınmıştır.

Deneyle İlgili Detaylar

Bu deney Dünya sistemini kullandığı için, replike (kopya) bir deney olası değildir. Ancak, on yıllık deneyi takiben fizibilite, pratiklik ve sülfat aerosolleri jeomühendislik planının işe yararlığı üzerine önerimlerde bulunmak amacıyla toplanmış olan veri 10 yıl için iklim verisi ile

karşılaştırılacaktır. Jeomühendislik planının uzantılarını anlamak için gerekli olan verinin büyük kısmı zaten düzenli olarak toplanmaktadır, böylece tüm veri kaynaklarını tek bir merkezi lokasyonda ya da veritabanında toplamak mesele olmayacaktır.

Bu deneyin hedefi jeomühendisliğin beklenmeyen sonuçlarını anlamak olduğu için, toplanan veri Kuzey Kutup deniz buzulu üzerinde bilgi içerecektir, mikare kaplama, derinlik, deniz seviyesi basıncı ve Arktik kıyusal yağış gibi, fakat aynı zamanda Afrika ve Asya üzerindeki yağış örüntüleri ile ilgili geniş ölçekli veri. Afrika ve Asya boyunca veri noktaları yıllık ortalama yüzey hava sıcaklığını, güneş ışıınımını (aşağı yönde kırsadalga ışıınım), aylık küresel yağış ve aerosollerin her yıl boyunca enlemsel yayılımı gibi. Ek olarak, yüzey hava sıcaklığı ve yağıştaki bölgesel değişimleri göstermek için bölgesel veri alınacaktır. Bu verileri kullanarak, jeomühendislik planının çeşitli bölgesel ekosistemler üzerinde yapmış olduğu etkilerini değerlendirmek ve daha ileri kullanım ile ilgili önermeler yapmak mümkün olacaktır.

Sonuçlar ve Önerimler

Sonuçlar

Robock, *et al.* (2008)'e göre bir önceki kısımda tanımlanan deneye benzer bir şekilde yürütülen sülfat aerosol jeomühendislik planının, Arktik deniz buzulunun miktarını, mevcut seviyelerin %10-25 arasında belirgin olarak arttırması olasılığı yüksektir. Ancak, deniz seviyesini arttırma sürecinde, dünyanın diğer bölgelerinin de değişken iklimleri tecrübe etmesi kesindir. Hindistan ve Kuzey Çin üzerinde daha zayıf bir yaz musonu ile ilişkili olarak bir yağış değişimi olabilir, aynı zamanda Batı Afrika'daki Sahel çölünde bir yağış düşüşü de gerçekleşebilir. Bu değişimler Şekil 5'de gösterilmiştir. Figürün dünyanın bazı yerlerinde bir yağış artışı göstermesine karşın, artışlar genellikle açık okyanusun üzerinde meydana gelmektedir ve kara kütleleri üzerinde çok az etkiye sahipken, yağıştaki olumsuz değişimler büyük insan popülasyonlarını ciddi biçimde etkileyebilir. Doğu Afrika'da, örneğin, musonlar iki yağmurlu mevsimi kontrol etmektedir, ve bölgedeki çiftçiler başka zamanlar kuru olan bu bölgede bu yağmura bağlıdır (Nairobi, 1979). Hindistan'da, musonlar

sadece alt-kıtadaki yağmurun büyük kısmını sağlamakla kalmaz, fakat aynı zamanda kültürel öneme sahiptir ve romantizm ve güzelliği simgeler. Bir sülfat aerosol planının uygulanması potansiyel olarak küresel çevrelerde çok sayıda olumsuz sonuca yol açabilir.

**Şekil telif hakları kısıtlamasından
dolayı çıkarılmıştır**

Şekil 5: Bir sülfat aerosolü jeomühendislik planını takip eden yağış değişiklikleri. Kahverengi renk olumsuz değişimleri simgelemektedir. Yeşil renk olumlu değişimleri göstermektedir. Robock, *et al.*'dan alınmıştır (2008).

Önerimler

Öne sürülen deneyin, bir sülfat aerosol planının çoğu özelliğini sınamasına karşın, çok sayıda bilinmeyen vardır. Küresel, uzun-vadeli bir jeomühendislik planının daha ileri deney ya da küresel ölçekte politik uzlaşmalar olmadan yürütülmesi akıllıca değildir. Herhangi jeomühendislik planı belirsiz bir süreye kadar yürütülmelidir çünkü kesildiği zaman hızlı sıcaklık ve karbon dioksit artışı olabilir. Küresel çevresel etkiler, planın belirsiz doğası ve çevresel etkiler ile ilgili olarak her ülkenin razı olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Farklı küresel çevreler üzerindeki çevresel etkiler ve gerçekleşebilecek herhangi bir olumsuz etkinin hafifletilip hafifletilemeyeceğine dair detaylı dökümantasyon gereklidir. Bu jeomühendislik alanı dışındaki araştırmacılardan işbirliği gerektirmektedir. Küresel bir organizasyonun, belki de Birleşmiş Milletlerin, bir jeomühendislik planının sorumlusu olması gerekebilir ve onaylama süreci potansiyel olarak yılları alabilir. Uzlaşmalar hızlı bir şekilde başlatılmalıdır çünkü küresel ısınma kritik bir seviyeye ulaşmaktadır ve gelecek birkaç yıl içinde küresel ısınma, eyleme geçilmesi gereken kritik bir seviyeye ulaşacaktır.

Sonuç

Jeomühendislik küresel iklim değişimi ile savaşmanın bir yoludur. Jeomühendisliğin çok sayıda farklı tipi vardır ve herhangi bir plan yürütülmeden önce, etkinliği ve yan etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır. Bu noktada, jeomühendisliğin, küresel ısınmanın kaynağı olan, karbon dioksit salınımlarını azaltmadan daha iyi ya da daha etkin olduğunu söyleyemeyiz, ancak bir olasılıktır ve göreceli olarak hızlı bir çözüm sağlayabilir. Sülfat aerosollerini aracılığıyla jeomühendislik artan yüzey sıcaklıklarını hafifletme potansiyeline sahiptir; güneş ışımasını azaltmayı

hedefleyen diğerk yöntemlere kıyasla göreceli olarak ucuzdur ve volkanik püskürmeler ile paralel olarak bir bakıma garantili bir etkinliğe sahiptir. Ancak, bu yazıda sunulan deneyin etkinliğini detaylandırmasına rağmen, aynı zamanda potansiyel sonuçlarını sunmaktadır. Bu sonuçların düşünülmesi ve yeniden sınanması gereklidir, uygulanması ile ilgili belli bir karar verilmeden önce olası politik ve sosyal sonuçlarla birlikte.

Jeomühendisliğin olasılığını henüz hesaplayamayız ya da tam teşekküllü bir yürütmeye başlayamayız. Bunun yerine, jeomühendisliği ilgilendiren deneyleri ve anlaşmaları geliştirmek için küresel ve politik toplumlar birlikte çalışmalıdır.

Kaynaklar

- Baker, M., & Peter, T. (2008). Small-scale cloud processes and climate. *Nature*, 451(7176), 299.
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41-48.
- Bala, G., Caldeira, K., Mirin, A., Wickett, M., & Delire, C. (2005). Multicentury changes to the global climate and carbon cycle: Results from a coupled climate and carbon cycle model. *Journal of Climate*, 18(21), 4531.
- Bluth, G. J. S., Doiron, S. D., Schnetzler, C. C., Krueger, A. J., & Walter, L. S. (1992). Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991

Mount-Pinatubo eruptions. *Geophysical Research Letters*, 19(2), 151-154.

Budyko, M. I. (1977). Present-day climatic changes. *Tellus*, 29(3), 193-204.

Canadell, J. G., Le Quere, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., et al. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(47), 18866-18870.

Dai, A. G., Trenberth, K. E., & Qian, T. T. (2004). A global dataset of palmer drought severity index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130.

Graf, H. (1992). Arctic radiation deficit and climate variability. *Climate Dynamics*, 7(1), 19-28.

Jones, C., Lowe, J., Liddicoat, S., & Betts, R. (2009). Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature Geoscience*, 2(7), 484-487.

Kannan, R., & James, D. A. (2009). Effects of climate change on global biodiversity: A review of key literature. *Tropical Ecology; International Tropical Ecology Congress, Dehra Dun, INDIA.* , 50(1) 31-39.

Keith, D. W. (2000). Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 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, D14109.

- Lane, L., Caldeira, K., Chatfield, R., Langhoff, S. (2007). Workshop Report on Managing Solar Radiation. Moffett Field, California: NASA.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson T. and Prather, M. (2007). Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Milne, G. A., Gehrels, W. R., Hughes, C. W., & Tamisiea, M. E. (2009). Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience*, 2(7), 471-478.
- Nairobi, N.S. (1979). The East African monsoons and their effects on agriculture. *Geojournal*, 3(2), 193-200.
- Oman, L., Robock, A., Stenchikov, G., Schmidt, G. A., & Ruedy, R. (2005). Climatic response to high-latitude volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 110(D13), D13103.
- Oman, L., Robock, A., Stenchikov, G. L., & Thordarson, T. (2006). High-latitude eruptions cast shadow over the African monsoon and the flow of the Nile. *Geophysical Research Letters*, 33(18), L18711.
- 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 sulfate aerosols. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 4007-4037.
- Robock, A. (2008). 20 reasons why geoengineering may be a bad idea.

Bulletin of the Atomic Scientists, 64(2), 14.

- Robock, A., Adams, T., Moore, M., Oman, L., & Stenchikov, G. (2007). Southern hemisphere atmospheric circulation effects of the 1991 Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, 34(23), L23710.
- Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., & Stenchikov, G. (2009). Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 36, L19703.
- Robock, A., Oman, L., & Stenchikov, G. L. (2008). Regional climate responses to geoengineering with tropical and arctic SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(D16), D16101.
- Schneider, S. (2009). The worst-case scenario. *Nature*, 458(7242), 1104.
- Stapleton, A. E. (1992). Ultraviolet-radiation and plants -burning questions. *Plant Cell*, 4(11), 1353-1358.
- Trenberth, K. E., & Dai, A. (2007). Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 34(15), L15702.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., et al. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395.

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.