

Aklık modifikasyonun küresel biyokimyasal döngüler
üzerinde etkisini değerlendirmek için güneş-
kalkanlarının kısıtlı uygulanmaları için bir öneri

Massachusetts Institute of Technology

1 Aralık 2009

İdari özet

Karbon dioksit ve diğer sera gazları gibi insan kaynaklı salınımların neden olduğu iklim değişiklikleri, kuraklık, sel ve deniz seviyesinin yükselmesi sonucunda küresel boyutta insan hayatını negatif olarak etkileme tehdidi taşır. Bütün bu kaygılara rağmen yıllık karbon dioksit salınımları son on yıl içerisinde giderek artmıştır. Bu rakam 1990’larda yıllık 6.4 Gt iken son on yılda 7.2 Gt olarak belirlenmiştir (Bala, 2009). Bunlara ek olarak son dönemlerde yapılan bir çalışma salınımların tamamen kesilmesi durumunda bile sıcaklıkların ve deniz seviyesinin yükselmesinin engellenemeyeceğini göstermektedir. Bu öngörüler ışığında dünyanın mevcut ikliminin korunması için jeomühendislik gibi daha doğrudan yöntemler olası çözümler arasındadır.

Jeomühendislik çevre üzerinde bilinçli olarak yapılan büyük çaptaki herhangi bir modifikasyon olarak tanımlanabilir. Fakat bir problemi çözmek için dünya sistemi üzerinde jeomühendislik yoluyla yapılan bir değişik istenmeyen birçok negatif sonuçların doğmasına neden olabilir. Hava kirliliği, yağış rejiminde değişiklikler veya üretkenlik azalması gibi unsurları içerebilen bu negatif sonuçlar, küresel ısınma neticesinde görülen iklimsel değişikliklerden daha önemli etkilere sahip olabilir. Dolayısıyla herhangi bir stratejiyi uygulamadan önce bu stratejinin doğurabileceği yan etkiler etraflıca incelenmelidir. Bu makalede, Arizona Üniversitesinden Roger Angel tarafından hazırlanmış jeomühendislik tasarısı kısmen uygulanarak, bu tasarının beklenmeyen etkileri incelenecektir. Angel (2006) dünya ile güneş arasındaki uzay boşluğuna güneşten gelen ışıının bir kısmını geri yansıtan ve dünyanın soğumasına yardımcı olan küçük mekiklerin gönderilmesini önermektedir. Güneş kalkanı tasarısının etkinliğini değerlendirebilmek için orijinal tasarıda önerilen toplam mekik sayısının %10’unun yerleştirilmesini önermekteyim. Bu kısıtlı uygulamanın dünya iklimini bir yanardağ patlaması düzeyinde etkilemesi beklenmemektedir; bilim insanları bu düzeydeki bir iklimsel değişikliliğin yağış

rejimi ve net birincil üretkenlik üzerindeki küçük etkilerini ölçebilir ve buradan elde ettikleri bulguları kullanarak tam ölçekli bir uygulamanın etkilerini öngörebilirler.

Jeomühendislik her ne kadar uç bir seçenek olsa da, gelecekte küresel ısınmanın neden olduğu zararlı etkilerin önüne geçmenin en önemli yolu haline gelebilir. Jeomühendislik tasarılarının uygulanmasına geçilmeden önce benim önerdiğim gibi deneylerin yapılması şarttır. Dolayısıyla bu gibi deneyleri yapmamızın zamanı şimdidir, iş işten geçtikten sonra değil.

Giriş

Küresel iklim değişikliğinin nedenleri ve sonuçları

CO₂ seviyelerinin atmosferdeki artışı, iklimi küresel boyutta değiştirmek ile tehdit etmektedir. Normalde, CO₂, diğer sera gazları (SG) ile beraber dünya yüzeyinin yaşanabilir sıcaklıklarda kalmasını sağlar. SG'ler güneşten salınan kısa dalga boylu ışınlamaların dünya yüzeyine ulaşmasına izin verir, fakat güneş tarafından ısıtılmış ve yer yüzeyinden yansıyan uzun dalga boylu ışınlamayı soğurur. Sera gazları bu termal enerjiyi soğurarak ısıyı dünya yüzeye hapsedmiştir ve tarihsel süreçte küresel sıcaklıkların 20°C civarında yükselmesine neden olacak kadar ısı saklanmış (Smith and Smith, 2001).

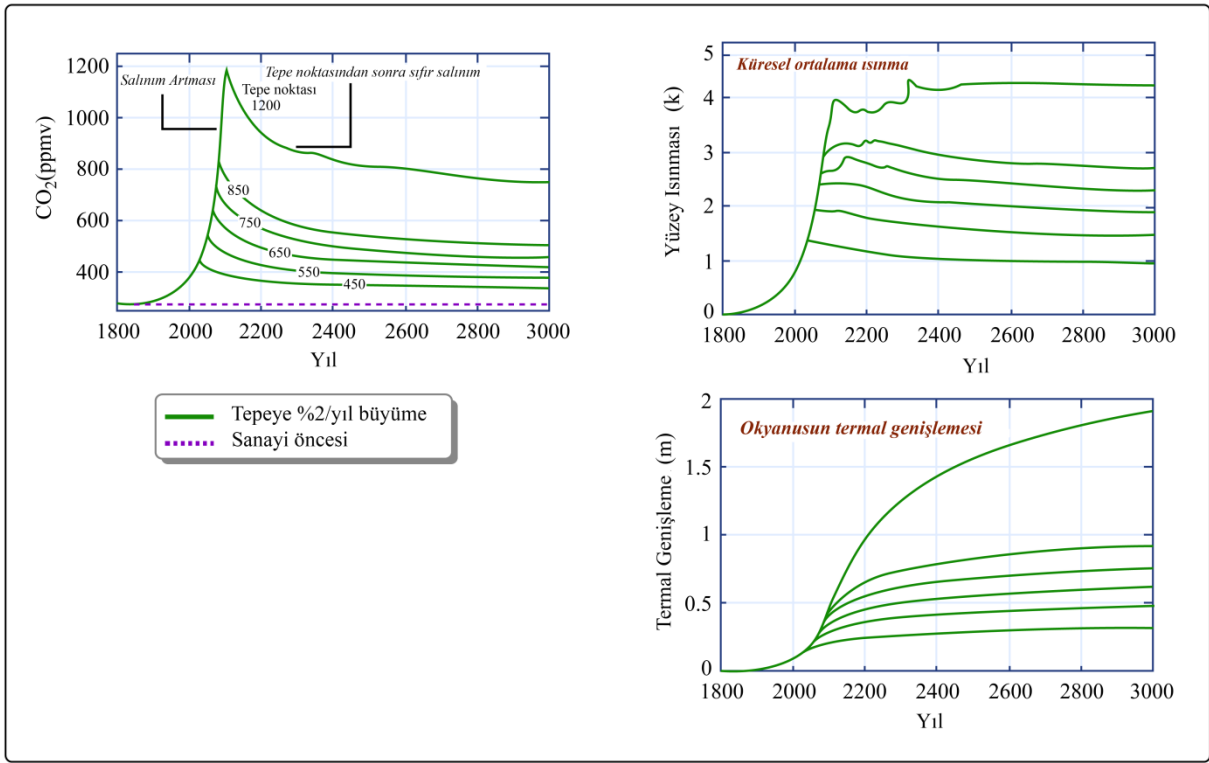
Son birkaç on yılda, fosil kaynakların yakılması, beton üretimi ve başka insan kaynaklı faaliyetler, görülmemiş derecede CO₂ miktarlarının atmosfere salınımı ile sonuçlanmıştır (Bala, 2009). Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonları sanayi devrimi öncesi 280 ppm civarındaydı. Günümüzde bu rakam 381 ppm'ye ulaşmış olup yıllık olarak 2-3 ppm oranında artmaktadır (Canadell *et al.*, 2007). Atmosferdeki SG'ler tarafından hapsedilen ısı şimdiden küresel sıcaklıkların yaklaşık 0.8°C yükselmesine neden olmuştur ve iklimsel modellemeler bu rakamın yüzyılımızın sonuna kadar 1.8-4°C kadar daha yükseleceğini öngörmektedir (Bala, 2009).

Özellikle denizler küresel sıcaklıkların artmasından doğrudan etkilenecektir. Deniz sıcaklıkları yükseldiğinde, su genişleyecektir ve muhtemelen deniz seviyesi 1-2 m yükselecektir. Eriyen buzul kütleleri buna ek olarak su seviyesini 1-2 m daha da arttırabilir. Fazla CO₂'nin bir kısmı denizlerde çözünerek karbonik asit, bikarbonat ve karbonat oluşturarak denizlerin asiditesinin artmasına neden olacaktır. Denizlerin asiditesinin artması mercan resiflerinde kalsitleşmenin ve bazı balıklardaki koku alma duyusunu engellemesi gibi (Anthony *et al.*, 2008; Munday *et al.*, 2009) deniz yaşamını negatif etkileyen sonuçların doğması ile

sonlanabilir. Şimdi bile denizlerdeki su seviyesi, sıcaklığı ve asiditesi yükselmiş ve dağ buzulları ve kar örtüsü gibi karasal su kaynakları azalmış durumdadır (Bala, 2009). Eğer sıcaklık artmaya devam ederse bu etkilerin sonuçları şiddetlenecektir.

İklimdeki değişiklikler evlerimizin ve yaşam biçimlerimizin ortadan kalmasına neden olabilir (Solomon *et al.*, 2009). Yükselen deniz seviyesi düşük rakımlardaki kıyı düzlüklerini ve küçük adaları su altında bırakacaktır. Bunlara ek olarak, daha sıcak bir atmosfer daha yüksek miktarda su buharı içerecektir ve sonuç olarak yağış rejiminde geniş etkili ve tahmin edilmesi güç değişikliklere neden olacaktır (Soloman *et al.*, 2009). Kuraklıkların ve sellerin sıklığı ve tropikal hortumların şiddeti artacaktır (Bala, 2009). Her bir kıtanın belirli bölgelerinde yağış oranları %10-20 azalacaktır ve bunun sonucu olarak su kaynakların verimliliği düşecek, tarım faaliyetleri bozulacak, çölleşme artacak ve ekosistemler değişecektir. Bu seviyede bir su sıkıntısı, 1930'larda yağış oranının on yıllık bir süre içerisinde %10'luk bir düşüş görülmesi sonucunda gerçekleşen toz fırtınasına neden olan kurak dönemden çok daha vahimdir. Küresel ısınma senaryolarında öngörülen kuraklık hem daha geniş ölçekli hem de daha uzun süreli olacaktır (Soloman *et al.*, 2009).

Günümüzdeki iklimi korumak için salınımların dünya genelinde kesilmesi gerekmektedir. Fakat bir takım politik önlemlere karşın, sanayiler yoluyla atmosfere salınan sera gaz seviyeleri git gide artmaktadır. 1990'larda insan aktiviteleri sonucunda yıllık 6.4 GT karbon salınıırken, 2001 – 2004 arasında bu rakam 7.2 GT/yıl'a yükselmiştir (Bala, 2009). Şu anda CO₂ emisyonları tamamen kesilse bile insan kaynaklı karbonun %40'ı atmosferde daimi olarak kalacaktır (Soloman *et al.*, 2009). Şekil 1'de görüldüğü gibi salınımlar durduktan sonra bile, küresel sıcaklıklar, okyanusların ısınmış olmasından dolayı hala yüksek seviyede kalacaktır. Su kütlelerinin sıcak atmosferle karışması sonucunda okyanus sıcaklığı yavaş yavaş artacaktır.



Şekil MIT OpenCourseWare'e aittir

Şekil 1: Önümüzdeki bin yıl içerisindeki CO₂ seviyeleri, artan yüzey sıcaklığı ve yükselen deniz seviyesi. Deniz seviyesindeki artış sadece termal genişlemeyi göz önüne almaktadır ve buzul erimesini içermemektedir. Farklı çizgiler 450, 550, 650, 750, 850, ve 1200 ppm salınımların durduğu zamandaki farklı CO₂ seviyelerini göstermektedir. Bu zaman ölçeğinde, sıcaklık ve deniz seviyesindeki yükselme kalıcı olarak görünmektedir (Soloman, Plattner, *et al.*, 2009).

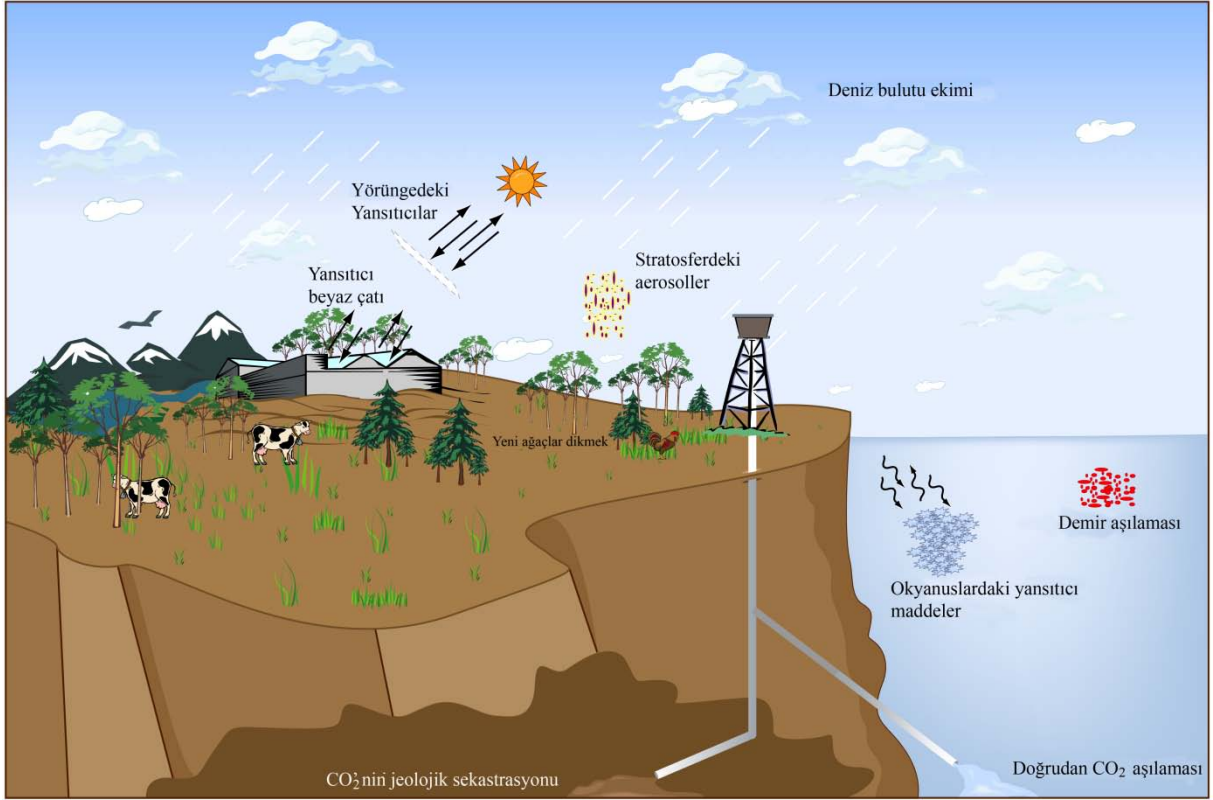
CO₂ seviyelerinin dayanıklılığı, salınımlar ne kadar kesilirse kesilsin, bunun iklim değişikliğini tamamen tersine çevirmek için yeterli olamayacağını göstermektedir. Açık bir şekilde küresel ısınmanın etkilerini tersine çevirmek için daha doğrudan ve çarpıcı eylemlere ihtiyacımız vardır.

Jeomühendislik: daha çarpıcı bir eylem

Küresel ısınmanın önlemesi amacıyla dünyanın sıcaklığını değiştirmeye yönelik yapılan her hangi bir planlı müdahale jeomühendislik olarak sınıflandırılır. Bu terim, çevresel değişiklikler ile sonuçlanan bilinçli ve kapsamlı bütün müdahaleleri içermektedir (Keith, 2000). Günümüzde her ne kadar bu terim büyük oranda insan kaynaklı küresel ısınma ile mücadele etmek için ortaya atılan önerileri içerse de, amaçlar çok daha çeşitli olabilir.

On yıllar boyunca jeomühendislik ciddiye alınmamıştır. Daha sonra 2006'da kimyada Nobel ödülüne sahip Paul Crutzen, stratosfere sülfür enjekte edilmesini öneren bir makale yayınlamıştır. Paul Crutzen, salınımların azaltılması için yapılan çalışmaların hüsrarla sonuçlandığını öne sürmüştü ve en iyi seçeneğin jeomühendisliği olduğunu belirtmiştir. Ozon tabakasındaki incelmeyi ortaya çıkartmasından dolayı oldukça saygın bir yeri olan Crutzen, jeomühendislik alanına geçerlilik kazandırmıştır (Schneider, 2008).

Günümüzde jeomühendislik yöntemleri iki sınıf altında toplanabilir: karbon sekestrasyonu (karbonu inaktive ederek diğer bileşikler ile bağ yapmasını önlemek) ve güneş ışığının perdelenmesi (Bala, 2009). Şekil 2 bu önerilerden birçoğuna ilişkin şematik bir özet vermektedir.



Şekil MIT OpenCourseWare'e aittir

Şekil 2: Jeomühendislik önerilerine ilişkin resim. Karbon sekestrasyonu karbonu atmosferden çekerek başka bir yerde biriktirir. Demir fertilizasyonu, yeni ağaçlar dikmek ve jeolojik sekestrasyon karbon sekestrasyonuna verilebilecek örnekler arasındadır. Akıllık modifikasyon yöntemleri uzaya yansıtılan solar ışınım miktarını arttırmaktadır. Şekildeki çeşitli yansıtıcıların ve bulut ekimlerinin amacı budur (Bala, 2009).

Karbon sekestrasyonunda, karbon atmosferden çekilerek, organizmalarda, okyanus derinlikleride, minerallerde veya jeolojik petrol yataklarında depolanır (Bala, 2009). Karbonu sekestre etmenin bir yöntemi demir aşılması ya da okyanuslara demir eklenmesidir (Keith, 2000). Okyanusların çoğunda demir kısıtlayıcı bir besin kaynağıdır, dolayısıyla denizlere demir eklenmesi fitoplankton yoğunluğunda çarpıcı bir artışa neden olacaktır. Okyanus birikintilerinde karbon elementinin demir elementine oranı 10,000:1'dir. Dolayısıyla okyanusa eklenen her bir mol demir için, biyolojik organizmalar

10,000 mol karbon tüketecektirler. Bu organizmalar öldüğünde okyanus derinliklerine batarak bünyelerinde biriken karbonu derinlerde depo etmiş olacaktır. Fitoplanktonlar karbonu sekestre ederken aynı zamanda bünyelerine büyük oranlarda nitrojen ve fosfor alırlar ve dolayısıyla okyanusların verimliliğini azaltırlar. Buna ek olarak fitoplanktonlar öldüklerinde, detritörler tarafından tüketilirler ve bu süreç okyanustaki çözünmüş oksijen seviyelerinin azalmasına neden olur. Son olarak demir aşılması sucul ekosistemleri tahrip ederek karbonu sekestre eder. Bu tahribat her seviyedeki sucul yaşamı negatif yönde etkileyebilir (Strong *et al.*, 2009). Karbonu kalıcı olarak sekestre etmek için önerilen bir başka yöntem ise karbonun, magnezyum ve kalsiyum silikatlarına bağlanmasıdır. Fakat karbon 1:1 oranında bağlandığı için, bu bileşikler yoluyla karbonu izole etmek, bu yöntemin kullanımını engelleyecek derecede pahalıdır (Keith, 2000).

Küresel sıcaklıkları etkin bir şekilde azaltmanın bir başka yöntemi ise dünyanın aklık yani yansıtma derecesini arttırmaktır. Fikrin özünü SG'ler tarafından dünya yüzeyine hapsedilen ekstra ısıyı, dünya yüzeyine gelen güneş ışıınının bir kısmını geri yansıtarak dengelemek oluşturmaktadır. Bala (2009)'da açıklandığı üzere bunu yapmak için birçok mekanizma önerilmiştir. Bu işin bir yolu stratosfere sülfür, toz veya yansıtma gücü yüksek olan maddeler atılmasıdır. Bir başka yol ise okyanus yüzeyinin bir kısmını yansıtıcı maddeler ile kaplamak veya bulut yoğunlaştırma ham maddesi olarak okyanusların üzerine H_2SO_4 salarak bulut örtüsünü arttırmaktır. Son bir yöntem ise bir tane büyük veya birkaç tane küçük güneş kalkanını (kalkanlarını) uzaya yerleştirerek güneş ışıınının bir kısmının yeryüzüne ulaşmasını doğrudan engellemek.

Aklık derecesini modifiye etmek üzerine kurgulanan önerilerin bir takım dezavantajları vardır. Birçoğu okyanuslara ve atmosfere yabancı maddelerin sokulmasını içermektedir ve dolayısıyla çevre ve hava kirliliğine neden olabilecekleri gibi okyanuslardaki asitleşmeyi de göz önüne almazlar (Bala,

2009). Buna ek olarak her ne kadar küresel sıcaklıkların korunmasını sağlasalar da, küresel hidrolojik döngüyü değiştirerek küresel yağış rejiminde büyük olasılıkla bir düşmeye neden olacaklardır (Lunt *et al.*, 2008).

Aklık derecesini modifiye eden yöntemler oldukça karmaşık olup, artı taraflarının, bu yöntemin olası yan etkilerine ağır basacağına dair henüz bir işaret yoktur. Dolayısıyla bu yöntemlerden bir tanesinin, daha detaylı bir şekilde incelenmesinde yarar vardır.

Küçük uzay mekikleri örtüsü ile aklık modifikasyonu

Makalesinde Angel (2006), güneş ışınlarını geri yansıtan bir perdenin oluşturulabilmesi için uzaya küçük mekiklerin ya da cisimlerin gönderilmesini önermiştir. Bu perde, gelen güneş akısını %1.8 oranında azaltarak ikiye katlanan CO₂ konsantrasyonlarının oluşturduğu sıcaklık artışını dengeleyecektir. Roketler önceden kurulmuş mekikleri L1 Lagrange noktasına gönderecektir. Bu bölge dünya ile güneş arasında kalan ve her iki kütleyle ait çekim gücünün bir birini iptal ettiği noktadır (Seifritz, 1989).

L1 Lagrange noktası, bir eyer noktasıdır, yani mekikler aktif olarak sabitlenmedikleri sürece oldukları konumdan yavaş yavaş kayarlar. Angel (2006) mekikleri oldukları yerde tutmak için iki yöntem önermektedir. İlk yöntemde bilim insanları mekikler üzerindeki ışıyım basıncını minimuma indirmeyi önermektedir. Işıyım basıncı elektromanyetik ışıyımın karşılaştığı her hangi bir nesne üzerinde uyguladığı basınçtır. Bu basınç ışıyımı yansıtan cisimlerde ışıyımı emen cisimlere oranla iki kat daha fazladır. Mekikler, ışıyım basıncını minimize etmek için, gelen ışıyımı doğrudan güneşe geri yansıtmak yerine ışıyımın güzergahını birkaç derece saptırır. Mekikler yeterince uzakta oldukları için güneş ışınlarının gidişatındaki bu küçük dereceli değişiklik bile ışıyımın dünyadan önemli derecede sapmasına ve uzayın derinliklerine doğru

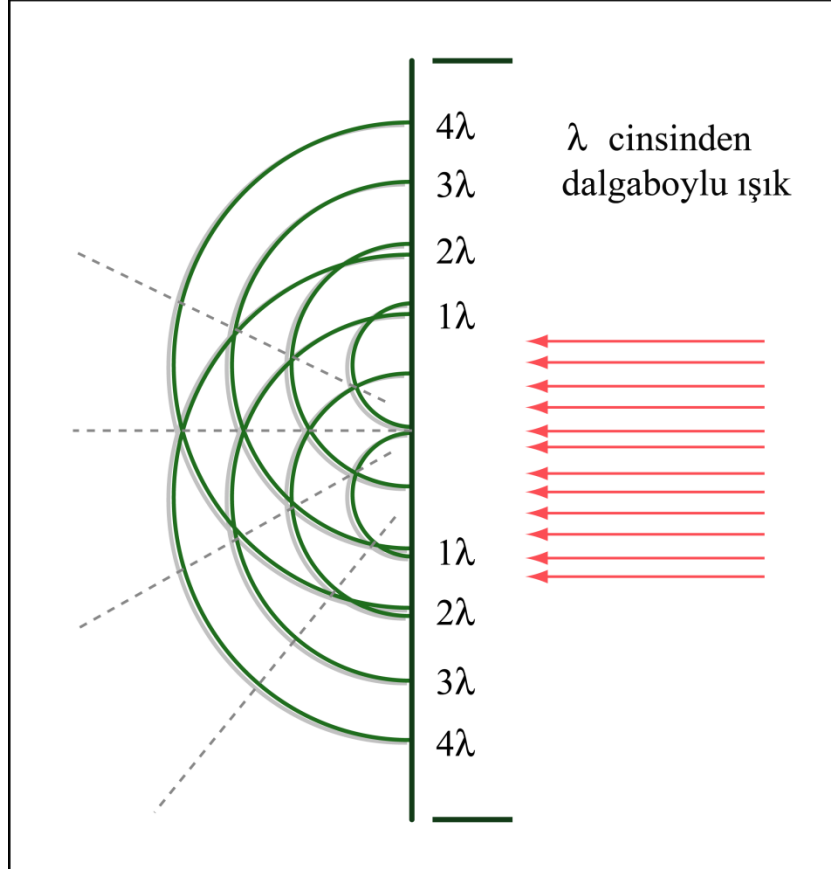
yol almasına neden olmaktadır. Güneş kalkanını daha da güvence altına alabilmek için bilim insanları mekiklerin üzerine konum, hız ve güneş ışığını tespit eden radyo alıcıları ve sensörler yerleştireceklerdir. Alıcılar gelen verileri, mekiklerden oluşan bu uzay perdesi içerisine yerleştirilmiş daha büyük uzay mekiklerine iletecek, oradan da bu veriler dünyaya aktarılacaktır. Dünyadan gelen bilgi doğrultusunda bu büyük uzay mekikleri küçük mekiklerin hareketlerini yönlendirecektir. Hareketi sağlamak için mekikler ışıyım basıncını kullanırlar. Gelen kuvvet aynalar yoluyla yönlendirilir ve böylece istenilen hıza ulaşılır.

Her mekik birçok delik içeren son derece hafif ve geçirgen bir film tabakasından oluşmaktadır. Film tabakasından geçen ışık deliklerden geçen ışığa oranla yarım devre rötar yapacaktır. Dolayısıyla bir birlerini örseleyici şekilde etki edecektirler. Film tabakası her biri farklı dalga boyundaki ışığı engelleyen değişen derecede kalınlığa sahip tabakalardan oluşmaktadır. Böylece maksimum derecede engelleme sağlanmış olacaktır. Mekiklerin yapı maddeleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

**Şekil telif hakları
yüzünden kaldırılmıştır**

Şekil 3: Mekiklerin yapı maddelerinin ayrıntılı gösterimi. (a) Mekikler delikler içeren ince bir film tabakasından oluşmaktadır. (b) Farklı seviyelerdeki kalınlıklar farklı dalga boyundaki ışığı engeller, böylece deliklerden geçen geniş spektrumdaki ışık huzmelerini engeller (Angel, 2006).

Bütün dalgalarda olduğu gibi, ışık da bir delikten geçtiği zaman, çıkışta, her yöne doğru çağıldar. Bu durum Şekil 4’te gösterilmiştir. Deliklerin bir birlerine göre konumları farklı deliklerden geçen ışıkların bir birleri ile nasıl çakışacağını belirler. Dolayısıyla deliklerin bir birlerine göre konumları ışığın güneş kalkanı tarafından hangi açıyla saptıracağını tayin etmektedir.



Şekil MIT OpenCourseWare’e aittir

Şekil 4: Delikten geçen ışık. Işık delikten geçtiğinde, yarım daireler şeklinde karşı taraftan çağıldayarak çıkar. Çizgi üzerindeki sayılar deliğe olan uzaklığı betimlemektedir. Kesikli çizgiler çağıldakların kesiştikleri yerlere işaret etmektedir. İki delik arasındaki mesafe iki ışık arasındaki kesişmenin açısını dolayısıyla güneş-kalkanı mekiklerinden geçen ışığın sapma açısını belirler (Bawendi, 2008).

Toplamda önerilen perde 100,000 km uzunluğunda olacaktır. Yani dünya çapının yaklaşık 15 katı. Bu uzunluk, dünyanın sürekli olarak gölgelenmesini sağlamak için gereklidir çünkü ayın çekim gücü dünyanın yörüngesinde düzensizliklere yol açmaktadır.

Angel (2006)'ya göre mekikleri yerleştirmek 25 yıl alacaktır ve birkaç trilyon dolara ya da söz konusu zaman boyunca GSMH'sinin %0.5'ine mal olacaktır. Bu maliyet 1980'lerde önerilen ve yaklaşık olarak dünya GSMH'nin %6'sına mal olacak benzer yöntemlere oranla oldukça düşüktür. (Bala, 2009).

Bu planın gücü değişken sayısının az olduğu ve fiziksel özellikleri iyi bilinen uzayda gerçekleşecek olmasıdır. Angel (2006) mekiklerin sadece güneş ışığı sabitini etkileyeceğini öngörmektedir. Çevre kirliliğine neden olmayacaklardır ve istendiği takdirde bilim insanları bunları doğrudan L1 Lagrange noktasından uzaklaştırabilirler. Yöntem, hata payını oldukça düşürdüğü için oldukça kararlıdır. En büyük teknolojik engel mekikleri uzaya yerleştirmek ve orada tutmaktır. Ama eğer başarılı bir şekilde yerleştirilebilirlerse, Dünya'nın soğumasına neden olacaklardır. Ama bu mekiklerin yer yüzeyinde beklenmeyen ve istenmeyen etkilerinin olup olmayacağı ise araştırılması gereken önemli bir konudur.

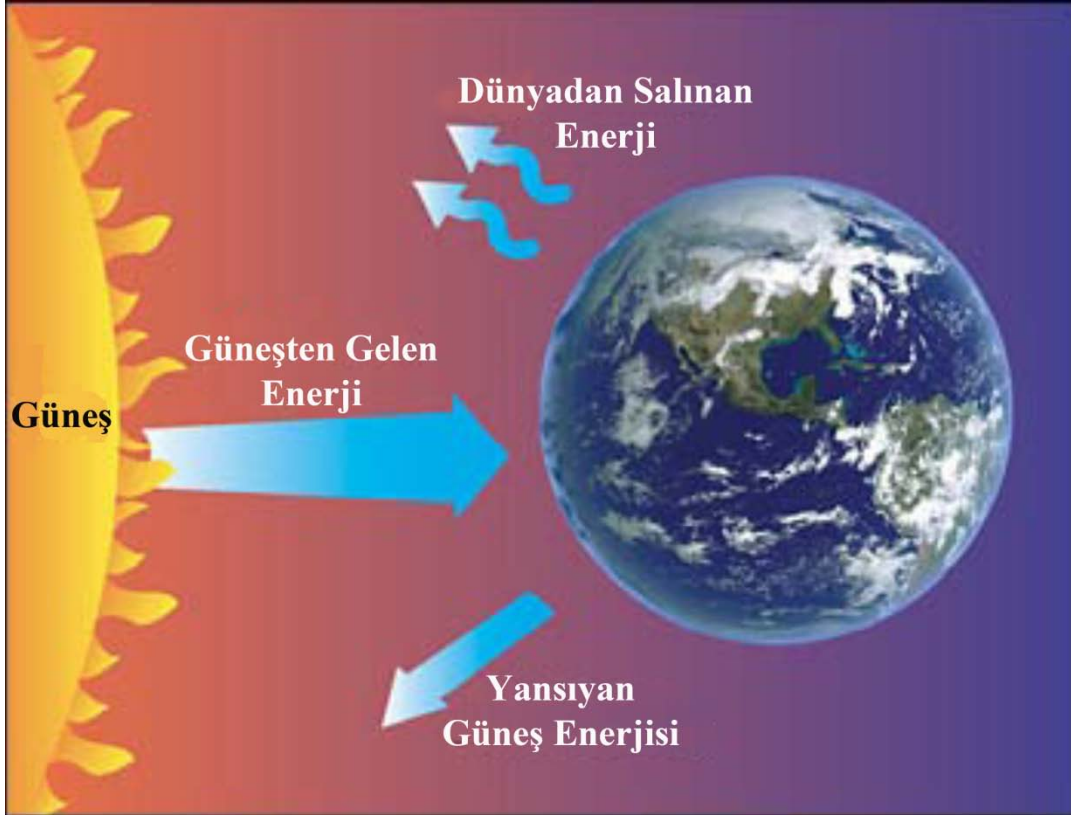
Deney Önerisi

Küresel döngüler üzerine güneş-kalkanının beklenmeyen etkileri

Angel (2006) tarafından önerilen güneş-kalkanının amacı dünyanın şu anki sıcaklıklarını koruyarak günümüzdeki yaşam tarzlarını korumaktır. Fakat insanların dünya sisteminin iki önemli motorunda, termal ısı korunumunda ve güneş ışığı sabitinde değişiklik yapıp, sıcaklık dağılımı, net birincil üretkenlik ve hidrolojik döngü gibi biyo-jeo-kimyasal döngüler üzerinde hiç bir etkisinin olmayacağını düşünmek saflıktır. Aşağıdaki bölüm konuyla ilişkili ekolojik süreçleri artan karmaşıklıkta seviyeler halinde tanımlayacaktır. Daha sonra bilgisayar modellerinin tahminlerini kullanarak günümüzdeki CO₂ seviyelerinin iki katına sahip bir dünyada kurulan bu güneş-kalkanın, ilgili süreçler üzerinde ne gibi etkileri olabileceği ortaya konacaktır.

Seviye 1: Küresel sıcaklık

Şekil 5'te gösterildiği üzere, güneş-kalkanının amacı dünyaya gelen güneş ışıınım miktarını azaltarak, sera gazları tarafından hapsedilen fazla miktardaki uzun dalga boylu ışıınımın etkisini dengelemektir. Fakat uzun dalga boylu ışıınım ile güneş ışıınımının dünyayı ısıtma biçimleri arasında önemli farklılıklar vardır. Güneş ışıınımı dünyaya sadece gündüzleri ulaşır ve enleme ve mevsimlere göre dağılımında önemli farklılıklar görülür. Buna karşın CO₂ gibi sera gazları dünyaya daha düzenli ve eşit bir şekilde dağılmışlardır, her zaman vardır ve mevsimsel değişimleri görece olarak oldukça düşüktür. Sonuç olarak sürekli olarak CO₂ tarafından ısıtılan bir dünyada günlük, mevsimsel ve enlemsel sıcaklık varyasyonlarının azalması beklenir (Govindasamy & Caldeira, 2000).



Şekil 5: Gelen enerji ile giden enerji arasındaki denge. Sera gazları dünyadan dışarıya yayılan enerjiyi azaltarak dünyanın sıcaklığını artırır. Bu etkiyi dengelemek için güneş kalkanı gelen solar enerjinin bir kısmını yansıtarak, giden solar enerji miktarını artırır (NOAA).

Govindasamy and Caldeira (2000) yaptıkları simülasyonda bu döngüsel şiddetteki azalmanın şaşırtıcı derecede küçük olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlara baktığımızda, günlük döngünün şiddetinde sadece 0.1°C'lik bir azalma ve günümüzdeki ortalama değerlere oranla dünyanın sadece %15'inde önemli derecede sıcaklık değişimi olduğu belirlenmiştir. En büyük etki güneş ışınlarının doğrudan geldiği ve azalmanın en çok hissedileceği ekvator yakınlarında görülmüştür. Mevsimsel döngüler aslında CO₂'ce zengin bir dünyaya oranla artmıştır çünkü artan miktarlardaki deniz buzulları atmosferi okyanusun ısıtıcı etkisinden korumuştur.

Sıcaklık değişimi istenen bir olay değildir, fakat ele alacağım ikinci beklenmeyen etkinin, yani bitki üretkenliğinin, insan yaşamı üzerinde çok daha çarpıcı sonuçları vardır.

Seviye 2: Karasal biyosfer

Bir ekosistem içerisindeki net birincil üretkenlik (NBÜ) kısmen CO₂ konsantrasyonuna ve fotosentetik açıdan aktif ışıınıma (FAI) yada 400-700 nm arasındaki ışığa bağlıdır (Naik *et al.*, 2003). Güneş-kalkanın günümüzdeki NBÜ seviyelerini korumadaki etkinliği belirsizdir. Jeomühendislik artan CO₂ seviyeleri altındaki, yani artan NBÜ değerleri altındaki bir dünyada uygulanacaktır. Dolayısıyla güneş kalkanı FAI derecelerini azaltarak NBÜ değerlerini de azaltacaktır (Govindasamy *et al.*, 2002).

Hem Naik *et al.* (2003) hem de Govindasamy *et al.* (2002) tarafından yapılan simölasyonlar, atmosferdeki CO₂ seviyelerinin günümüzdekinin iki katına çıktığı koşullarda NBÜ değerlerinde görölen %60-70 oranındaki artış ile karşılaştırıldığında, azalan güneş ışığı seviyesinin yol açacağı etkinin göz ardı edilebilir olduğunu göstermiştir. Fakat Naik *et al.* (2003) NBÜ dağılımında farklılıklar olacağını ortaya koymuştur. Jeomühendisliğin uygulandığı bir dünyada tropikal ormanlarda üretkenlik %2 oranında düşerken orta dereceli enlemlerde bulunan ormanlar ile çayırılıklarda %2 oranında artış olacaktır.

İrdeleyeceğim son ekolojik süreç, küresel hidrolojik döngölere ilişkin süreç, son derece karmaşık olup yerel üretkenlik üzerine önemli etkileri olacaktır.

Kademe 3: Küresel hidrolojik döngü

Küresel hidrolojik döngünün iki bileşeni irdelenecektir: su buharının konsantrasyonu ve dünya genelindeki yağış miktarı. Sıcaklık ve basınç suyun atmosferdeki konsantrasyonunu belirler. Dolayısıyla eğer jeomühendislik küresel sıcaklıkları sabit tutarsa su buhar konsantrasyonu da sabit kalacaktır (Bala *et al.*, 2008). Buna karşın küresel yağış rejimleri sadece sıcaklığa bağlı olmayıp aynı zamanda sıcaklık kaynağına da bağlıdır. CO₂ ve güneş ışınımı değerlerindeki değişiklikler atmosfere giren ile çıkan ışınım oranına etki eder. Fakat bu iki mekanizma farklı atmosferik seviyelerde etkili olmaktadır. CO₂ büyük oranda troposferin ısınmasına neden olurken, güneş ışınımı dünya yüzeyini ısıtır (Hansen *et al.*, 1997). Gne doğrudan ye yüzü ile etkileştiği için CO₂ tarafından tutulan enerjiye oranla, enerjisinin daha büyük bir kısmı suyu buharlatırmada kullanılabilir. Gne ışınım değerlerini değiştirerek elde edilen her derece sıcaklık için yağış rejimi %2.5 oranında değişmekte iken, insan kaynaklı CO₂'nin yol açtığı her derece için yağış rejimi sadece %1.5 oranında değişmektedir (Bala *et al.*, 2008). Dolayısıyla her iki sürecide kontrol ederek sıcaklık değişimlerinin bir birlerini dengelemesi sağlansa da yağış rejiminde yine de net bir farklılık oluşacaktır.

Kurgulanan modeller jeomühendislik uygulanmış bir dünyada küresel yağış rejiminde %5'lik bir azalma gösterse de yerel bölgelerin çoğunda varyasyonlar daha düşük seviyede çıkmıştır (Lunt *et al.*, 2008). Yağış rejiminde %1'in üzerinde bir değişiklik dünyanın sadece üçte birinde görülmüş olup en büyük değişim tropiklerde kaydedilmiştir (Bala *et al.*, 2008). Buna rağmen tropikler halen üretken kalmaktadır çünkü yağış rejimindeki d, buharlaşma oranlarındaki d tarafından dengelenir ve dolayısıyla toprak nemi sabit kalmaktadır (Lunt *et al.*, 2008).

Hipotez

Yukarıda verilen bilgisayar modellemesinin sonuçları dünya sistemi üzerinde insan bilgisinin tamamını temsil etmektedir. Kabul edilir ki, araştırmacıların kendileri bile sonuçların eksikliklerini itiraf etmektedir; dünya bu modellerin göz önüne almadığı birçok karmaşık geribildirimlere sahiptir. Örneğin Govindasamy *et al.* (2002) CO₂'ce zengin bir atmosfer altında NPÜ değerlerindeki artışı hesaplarken, nitrojen ve fosfor kısıtlaması göz önüne almamışlardır ve sonuç olarak beklenmedik derecede yüksek bir rakam ile karşılaşmışlardır. Her şeye rağmen modeller sağlam bilimsel temellerle dayandığı için nitelik bakımından doğru olmalıdır. Bu modelleri temel alarak, Angel (2006) tarafından önerilen güneş-kalkanının dünyanın sıcaklığını düşürmenin yanında uygulamaya sokulduktan hemen sonra yüksek CO₂ seviyeleri içeren bir dünyada beklenmedik iki önemli etkisi olacağını ileri sürmekteyim: küresel NPÜ'nün dağılımını değiştirecekler ve yağış rejiminde azalmaya neden olacaklardır. Aşağıda bu iki nokta detaylandırılmıştır.

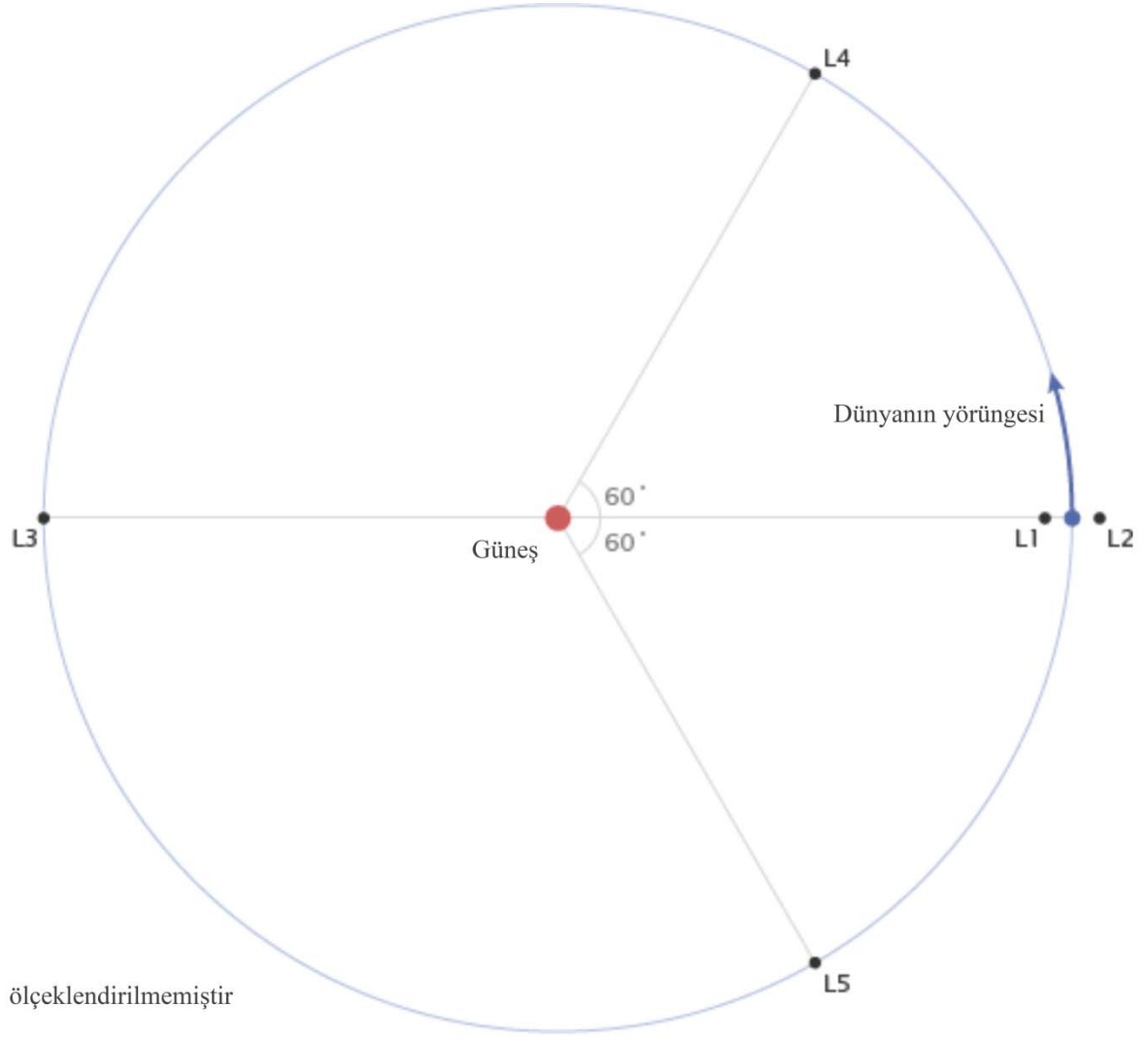
İlk olarak, güneş-kalkanının ortalama küresel NPÜ'ler üzerindeki etkisi göz ardı edilebilir, fakat güneş-kalkanı belirli ekosistemlerde NPÜ'yü önemli derecede arttırabilir veya azaltabilir. Daha açık bir şekilde, NPÜ değerlerinde en büyük düşüş tropiklerde yaşanırken, diğer ekosistemlerde NPÜ artacak fakat ortalama değer sabit kalacaktır. Yerel NPÜ varyasyonları bile, küresel ısınmanın neden olması beklenen NPÜ değişikliklerine oranla düşük kalacaktır.

İkinci olarak güneş-kalkanı buharlaşmanın düşmesine neden olacaktır ev sonuç olarak küresel yağış rejiminde düşüş gözlenecektir. Yine en çok etkilenen ekosistem tropikler olacaktır ve yağış rejimindeki en büyük düşüş bu bölgede görülecektir.

Deney Önerisi

Bilgisayar modelleri sürekli olarak gelişmekte olsalar da bu modeller yoluyla elde edilebilecek bilgi miktarı kısıtlıdır. Konu hakkında bir atılım gerçekleştirebilmek için Angel (2006) tarafından önerilen güneş-kalkanı yönteminin kısmen uygulanmasını önermekteyim. Bu ölçekte bir deneyi gerçekleştirebilmek son derece çetrefilli bir girişimdir fakat boşa atılmış bir kurşun değildir. Modeller tarafından öngörülen değişiklikler, özellikle küresel ısınma sonucunda beklenen iklim değişikliklerine oranla, uysaldır. Eğer benim önerimde olduğu gibi güneş-kalkanı tasarısı dar kapsamda uygulanırsa, zararlı etkilere neden olmaksızın sonuçları gözlemlenebilir.

Angel (2006) Şekil 6 ve 7’de gösterildiği üzere, toplam ağırlığı yaklaşık olarak 20 milyon ton gelen küçük mekikleri, güneş ışıınımını saptırmak amacıyla L1 Lagrange noktasına göndermeyi önermektedir. Bu yöntemin kısmen uygulanmasını öneren bu deneyde, öngörülen mekiklerin sadece onda birinin yerleştirilmesini önermekteyim. Bu koşullar altında güneş akısı sadece %0.2 oranında düşecektir. Bu derecede bir düşüş 1991’de Pinatubo yanardağının patlaması sonucunda görülen değişiklikler ile karşılaştırılabilir (Trenberth & Dai, 2007). Deneyin uygulanmasına gelince, her bir mekik yaklaşık olarak 1 gram ağırlığında olacak ve uzaya 800,000’lik gruplar halinde yollanacaktır. Dolayısıyla deneyi gerçekleştirebilmek için 2,500,000 adet fırlatma gerekmektedir. Deneyin bir yıl içerisinde gerçekleştirilmesi için gün başına yaklaşık olarak 7,000 civarında fırlatma yapılması gerekmektedir (Angel, 2006) ve toplam maliyet yarım trilyonu bulmaktadır.



Şekil 6: Lagrange noktası. Güneş-kalkanı her daim dünya ile güneş arasında yer alan L1 Lagrange noktasında yer alacaktır (NASA, 2009).



Şekil 7: L1 Lagrange noktası. Lagrange noktası dünyadan 1.5 milyon kilometre uzakta olup bu uzaklık yaklaşık olarak ayın dünyaya olan uzaklığının beş katıdır (NASA, 2009).

Uygulamanın başlangıcından itibaren 3 yıl boyunca güneş ışınlam değerleri uydular yoluyla doğrudan ölçülecek ve güneş-kalkanının istenen etkiyi gösterip göstermediği irdelenecektir (Haigh, 2002). İstenmeyen etkileri irdelleyebilmek için, küresel yağış rejimleri üzerinde bilgi toplanacak ve dünyanın en büyük bin nehrinin su girdisi belirlenecektir. Pinatubo yanardağı patlaması dünya genelinde ölçülebilir derecede yağışların azalmasına ve nehir sularının düşmesine neden olmuştur. Dolayısıyla benzer çapta etkilere neden olacağı düşünülen güneş-kalkanının etkileri gözlemlenebilir olacaktır (Trenberth & Dai, 2007). Aynı zamanda uydular kullanılarak okyanuslardaki klorofil miktarı ve karasal vejetasyonun yeşillik derecesi ölçülecek ve bu veriler NBÜ değerlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır (Field *et al.*, 1998). Bu ölçümler yoluyla bilim insanları güneş-kalkanının hidrolojik döngü ve üretkenlik üzerindeki etkilerini nicel olarak hesaplayabileceklerdir.

Deney aynı zamanda, yöntemin olası beklenmeyen yan etkilerini de güvenilir bir şekilde belirleyebilecektir çünkü bu etkilerin küçük ölçekte ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bunlara ek olarak deney sonucunda, yeni atmosferik modeller için kullanışlı veriler elde edilmiş, kullanılan donanımın etkinliğini ölçülmüş ve aynı zamanda da dünyanın gölgelenmesine başlanmış olacaktır.

Sonuçlar ve öneriler

Beklenen sonuçlar

Eğer deney planlandığı şekilde ilerlerse, uygulamaya geçildikten üç yıl sonra ilk sonuçlar alınmaya başlanacaktır (Matthews & Caldeira, 2007). Uzaydaki uydular güneş ışığı akısındaki azalmayı doğrudan ölçerek, güneş-kalkanının istenen etkiyi yaratıp yaratmadığını doğrulayabilir. Yeryüzünde ise iklimsel modellemelerin tahminlerine uygun bir şekilde özellikle tropik kuşakta yer alan nehirlerin su seviyelerinde ve tropiklerdeki yağış rejiminde ölçülebilir derecede

bir düşüş olacaktır. Vejetasyonun yeşillik derecesi ölçülerek elde edilen NBÜ değerlerinde eğer bir düşüş kayıt edilirse bu düşüşte benzer bir şekilde tropiklerde görülecektir fakat bu değişikliliğin derecesi yağış rejimine oranla daha düşük olacaktır. Her iki parametrede de görülen değişiklikler, küresel ısınma sonucunda beklenen etkiler göz önüne alındığında oldukça hafif kalmaktadır (Lunt *et al.*, 2008). Uygulamanın dördüncü-altıncı yılına gelindiğinde bilim insanları mekikleri yönlendirerek güneş ışınlарının tekrardan yeryüzüne geçişine izin verecek ve görülen etkilerin tersine dönmesi sağlanacaktır. Böylece gözlemlenen değişikliklerin güneş-kalkanı tarafından kaynakladığı kanıtlanacaktır.

Benim tahminlerime göre işlevsel güneş-kalkanı mekikleri oluşturmak en az beş yıl alacaktır. Bu mekiklerin kısıtlı bir uygulama için yerleştirilmesi bir yıl ve sonuçların irdelenmesi için ise altı yıla ihtiyaç olacaktır. Angel (2006)'da verilen değerler temel alındığında önerilen deneyin yaklaşık maliyeti 500 milyar dolar civarında olacaktır. Bu deney nihai planın bir kısmını önden gerçekleştirmeyi önerdiği için söz konusu maliyet geniş çaptaki kapsamlı uygulamanın maliyetinden çıkartılabilir. Özet olarak 12 yılın sonunda kısmi güneş-kalkanı uygulamasından elde edilen sonuçlar projenin geçerliğinin sınanması için yeterli miktarda veri üretmiş olacaktır.

Kapsam: jeo-mühendislik üzerine yorumlar

Küresel ısınma ile mücadele etmenin en güvenilir ve hatasız yolu salınımları kesmektir. Salınımlar olmasa jeomühendislik gibi yöntemlere de ihtiyaç olmayacaktır. Fakat son zamanlardaki gidişata baktığımızda bu yolun pek mümkün olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla her ne kadar ideal olmasa da dünya jeomühendislik gibi yöntemlere başvurmak zorundadır. Jeomühendislik pahalı, uygulanması imkansız ve etkinliği tartışmalı olmanın yanında aynı zamanda yer kürenin milyon yıllardır olan işleyişini de değiştirmektedir. Bu değişiklikler, tasarıların olumlu etkilerini boşa çıkartabilecek birçok negatif

beklenmeyen sonuçların doğmasına neden olabilir. Bugün itibari ile salınımları keserek problemin üstesinden gelmek mümkündür fakat eğer daha çok beklersek, bu çözüm tek başına yeterli olmayacaktır. Bu durumda, kuraklık, seller ve düşük rakımdaki karaların su altında kalması gibi doğal yıkımları önlemenin tek yolu jeomühendisliğe başvurmak olabilir.

Eğer jeomühendislik tek seçenek olarak geriye kalırsa, dünyanın uygulamaya hazır ve iyi irdelenmiş bir plana ihtiyacı olacaktır. Bir tasarı ile ilgili gerekli yapı malzemesini oluşturmak oldukça yavaş bir süreçtir ve bu tasarımın beklenmeyen sonuçlarının irdelenmesi ve bunlara karşın uygun modifikasyonların yapılması daha da uzun bir zaman gerektirmektedir. Eğer benim önerdiğim deney güneş-kalkanına şiddetle ihtiyacımız olduğu bir zamana kadar başlatılmazsa, mekikleri tasarlamak ve çalıştırmak için geçecek olan minimum 12 yıllık süre, gereksiz sıkıntıların yaşanmasına neden olacaktır. Eğer plan işe yaramaz veya kapsamlı bir şekilde değiştirilmesi gerekirse bu daha da fazla zamanın geçeceği anlamına gelir. Stresli zamanlarda, bu gibi gecikmelerin yaşanması, tam kapsamlı bir uygulamaya acelece ve yeterince düşünülmeden geçilmesine neden olabilir. Tam anlamıyla objektif bir değerlendirmenin yapılabilmesi ve ortaya çıkabilecek sorunların hafifletilebilmesi için proje ile ilgili prototiplerlerin ve değerlendirmelerin güneş-kalkanına ihtiyacımız olmadığı şu günlerde yapılması gerekmektedir.

Bu deney nasıl değerlendirilmeli

Güneş-kalkanı uygulamasının başarılı bir şekilde sıcaklıkları kontrol ettiğini ve yan etkilerinin görece olarak az olduğunu varsayarsak, sınımış olduğum bu plan daha da fazla irdelenmelidir ve ihtiyaç olduğu zamanlarda kullanılmak üzere saklanmalıdır. Fakat eğer güneş-kalkanı küresel sıcaklıkların veya üretkenliğin önemli derecede düşmesine neden olursa veya bir başka nedenden dolayı kullanışsız ise bu durumda bilim insanları küresel ısınmanın etkilerini gidermek için başka çözüm yolları aramalıdır. Benim önerim karbon

sekestrasyonuna yönelmektir çünkü eper güneş-kalkanı küresel iklime zarar veriyorsa, güneş ışınlarını gölgelemeye çalışan başka yöntemlerde benzer sonuçlar verecektir. Hatta başka şekilde oluşturulan güneş-kalkanlarının daha büyük zararlar vermesi daha olasıdır çünkü bu yöntemler atmosfere kirleticilerin girmesine bağlıdır. Şüphesiz ben hala küresel ısınma ile mücadele etmenin en iyi yönteminin salınımların kesilmesi olduğunu savunmaktayım.

Ön planlamanın ve sınamanın getireceği avantajlar göz önüne alındığında, ben hiç beklenmeden kısıtlı bir uygulama için gerekli mekiklerin ve fırlatma sistemlerin oluşturulmasını önermekteyim. İçinde bulunduğumuz durum oldukça çetrefilli olup çözüme giden yol uzundur. Fakat bugün göstereceğimiz ekstra bir çaba gelecekte iklim değişikliği ile ilgili krizlerin akıllıca ve etkin bir şekilde ele alınması ile sonuçlanabilir.

Kaynaklar

- Angel, R. (2006) Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103:17 184–17 189.
- Anthony, K. R. N., Kline D. I., Diaz-Pulido, G., Dove, S. & Hoegh-Guldberg, O. (2008). Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105:17442-17446.
- Bala, G., Duffy, P. B., & Taylor, K. E. (2008). Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105:7664-7669.
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96:41-48.
- Bawendi, M. G. (2008). 5.112 Principles of Chemical Science Lecture Notes. *MIT*.

- Canadell, J. G. (2007) Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104:18866–18870.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281:237-240.
- Govindasamy B., & Caldeira K. (2000) Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 27:2141–2144.
- Govindasamy B., Thompson, S., Duffy, P. B., Caldeira, K., & Delire, C. (2002) Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 29:2061.
- Haigh, J. D. (2003). The effects of solar variability on the Earth's climate. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 361:95-111.
- Hansen J., Sato M., & Ruedy R. (1997) Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102:6831–6864.
- Keith, D. W. (2000). Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25:245-284.
- Lunt, D. J., Ridgwell, A., Valdes, P. J., & Seale, A. (2008), “Sunshade World”: A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12710, doi:10.1029/2008GL033674.
- Matthews H. D., & Caldeira K. (2007) Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104:9949–9954.
- Munday, P. L., Dixon, D. L., Donelson, J. M., Jones, G. P., Pratchett, M. S., Devitsina, G. V., & Doving, K. B. (2009). Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:1848-1852.

- Naik, V., Wuebbles, D. J., DeLucia, E. H., & Foley, J. A. (2003). Influence of geoengineered climate on the terrestrial biosphere. *Environmental Management*, 32:373-381.
- NASA. (2009). *Earth Observatory*. Retrieved from <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. *The Global Monitoring Division of the Earth System Research Laboratory*. Retrieved from http://www.esrl.noaa.gov/gmd/education/faq_cat-1.html
- Schneider, S. H. (2008). Geoengineering: could we or should we make it work? *Phil. Trans. Soc. A*, 366:3843-3862.
- Seifritz, W. (1989). Mirrors to halt global warming? *Nature*, 340:603.
- Smith, R. L., & Smith, T. M. (2001). *Ecology & Field Biology* (6th ed.). San Francisco: Benjamin Cummings.
- Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106:1704-1709.
- Strong, A., Chisholm, S., Miller, C., & Cullen, J. (2009). Ocean fertilization: time to move on. *Nature*. 461:347-348.
- Trenberth K. E., & Dai, A. (2007) Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15702, doi:10.1029/2007GL030524.

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.