

Sunî Yağış

Hayrettin Bacanlı

Telekomünikasyon Şube Müdürlüğü

Ankara

2008

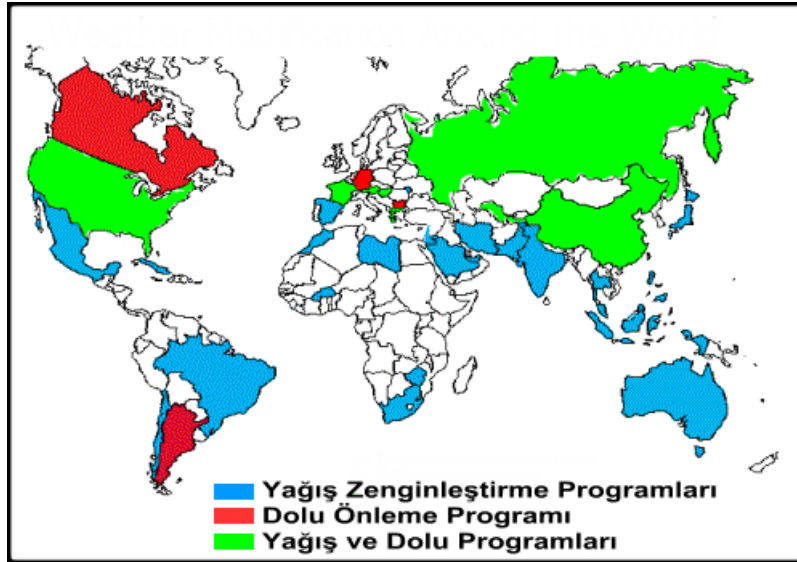
Giriş

Yüzyıllar boyunca insanoğlu, su kaynaklarını artırmak, şiddetli hava olaylarının etkisini azaltmak için hava ve iklimi değiştirmenin yollarını araştırmıştır. Hava modifikasyonuna ilişkin modern teknoloji 1940'lı yılların sonunda gümüş iyodun, bulut damlacıklarının buz kristallerine dönüştürülmesinde kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır.

Günümüzde birtakım ölkeler enerji talebini karşılamak, dünya üzerindeki kurak ve yarı kurak bölgelerde azalan su kaynaklarını tekrar zenginleştirmek, varolan kaynakların seviyesini artırmak için yüzden fazla hava modifikasyon projesi yürütmektedir. Bulut tohumlama yöntemi 1960'lı yıllardan itibaren ABD'de geliştirilmiş ve günümüze kadar uygulanmaya devam edilmiştir.

Yağmur bombası yöntemi ölkemizde ilk olarak 1990 yılında İstanbul'da İSKİ tarafından uygulanmıştır. Farklı zaman dilimlerinde İstanbul Ankara ve İzmir'de de kısa süreli olarak aynı yöntemden faydalanılmıştır.

Dünyada 24 ölkede bulut tohumlama yöntemini daha fazla yağış sağlamak için kullanılmaktadır.



şekil-1 Dünyada uygulanan Hava Modifikasyon alışmaları

Bulut yapısının karmaşıklığı ve değişkenliği yapay olarak değiştirilmesi girişimlerinin anlaşılmasını oldukça güçleştirmektedir. İstatistik ve bulut fiziği konusundaki bilgiler ile bu bilgilerin hava modifikasyonuna uyarlanma konusundaki deneyimler arttıkça, bulut tohumlama deneylerinde yeni kriterler ortaya çıkmaktadır. Orta ölçekli haberleşme ağı istasyonları, otomatik yağışölçer ağı, rüzgâr profili belirleyicisi, mikro dalga radyometreler, uydular, radar, hava hareket ölçüm sistemiyle donanmış uçaklar gibi yeni donanımların ortaya çıkması ve gelişmesi, bu konuda yeni boyutların da ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır. Buna paralel olarak aynı değerde önemli bir konuda bilgisayar sistemlerindeki gelişmelerdir. Yeni veri setleri artan karmaşıklığa sahip sayısal bulut modelleri ile birlikte kullanılmakta, değişik hava modifikasyon deneylerinin test edilmesine yardımcı olmaktadır. Kimyasal çalışmalarla beraber yürütölen iz çalışmalarıyla, buluta doğru ve buluttan dışarıya olan hava

akımlarının yolları belirlenmekte ve tohumlamada bu yollar kullanılmaktadır. Bu yeni yöntemler yağış ve bulut klimatolojisinin daha iyi anlaşılmasını da sağlamaktadır.

Operasyonel programlarda tam olarak gelişmemiş teknolojilerin yaratabileceği risklerde hesaba katılmalıdır. Örneğin; belli koşullarda tohumlamanın daha fazla doluya neden olabileceği veya yağışı azaltabileceği göz ardı edilmemelidir.

Bulut Tohumlama İşleminin Tarihi Gelişimi

Bulut tohumlanmasındaki ilk uygulamalarda, Vincent Schaefer ve Irving Langmuir (1940'lı yılların sonuna kadar) bulutları tohumlamak için uçaktan, ezilmiş kuru buz (katı CO₂) parçacıkları attılar. Bulutun içine atılan küçük parçacıklar, havayı yeni sıvı damlacıkların oluşabileceği sıcaklığa kadar soğutur ve damlacıklar -40°C sıcaklığın altında donar. Sonra yeni oluşan bu buz kristalleri birikme ile yağış olarak düşecek kadar büyür (Rogers, 1979).

1947'de Bernard Vonnegut, gümüş iyodürü bulut tohumlama işleminde kullandı. Gümüş iyodür, buz kristaline benzer bir kristal yapısına sahip olduğu için -4°C ve daha düşük sıcaklıklarda etkili bir buz çekirdeği olarak hizmet eder (Mason, 1971; Rogers, 1979) Gümüş iyodürü kullanmak, kuru buzdan daha kolaydır . Çünkü bir uçağın kanadından çıkan veya yer yüzeyindeki kaynaklardan çıkan yanıcı maddelerden buluta taşınabilir. Diğer maddeler örneğin kurşun iyodür ve bakır sülfür de etkili buz çekirdeği olmasına rağmen, gümüş iyodür bulut tohumlama işlemlerinde en yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yağış Oluşumu ve Bulut Tohumlama

Bulutta yağmur damlalarının oluşması Bergeron— Findeisen teorisi denilen bir teori ile de açıklanmaktadır. Bu teoriye göre, buz kristalleri olmadan yağış olmaz. Ancak daha sonra yapılan araştırmalar bazı bulutlarda buz kristalleri olmadan da yağış meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu tip yağışlar daha çok okyanus üzerinde oluşan kümülüs tipi bulutlarda meydana gelmektedir. Bergeron ve Findeisen buz kristallerinin yağışın oluşmasına nasıl tesir ettiklerini şöyle açıklamaktadırlar; İçinde buz bulunan, bir de su bulunan ayrı iki ortam düşünelim. Her iki ortamda da sıcaklık aynı olsun. Buzun buhar basıncı, suyun buhar basıncından daha azdır. Aynı ortamda su ve buz bulunması durumunda buza göre havanın nemi %100 doymuş halde iken, suya göre doymamıştır. Bunun bir neticesi olarak su için yoğunlaşma henüz başlamamasına rağmen buz kristalleri üzerinde yoğunlaşma devam eder. Buz kristalleri büyümeye devam ettikçe bulut damlacıkları da buharlaşmaya başlar. Böylece büyüyen kristaller aşağıya düşmeye başlar. Düşerken diğerleriyle birleşerek daha iri bir hal alırlar. Eğer düşme esnasında bulutun altındaki hava bu buz eritecek kadar ılıksa, onlar yere yağmur olarak, eğer o kadar ılık değilse dolu veya kar olarak düşer.

Bulut tohumlama düşüncesi yukarıdaki teoriye dayanmakta olup esası şudur; Eğer küçük katı bir partikül süper soğuk bir sıvı içine sokulursa, soğukluk yeterli olmak şartıyla, sıvının tamamı katı duruma geçer. Buna göre, buluttaki su molekülleri buz kristali formunda bir çekirdek üzerinde hızla birleşirler. Zaten buz kristalinden ayrı, atmosferdeki tozların da yoğunlaşma çekirdeği olarak vazife yaptığı bilinmektedir. Suni tohumlamada gümüş iyodür amonyum nitrat, kadmiyum iyodür, diğer higroskopik materyaller çekirdek vazifesi görmek üzere yağmur bulutuna püskürtülmektedir. Bu maddelerin aynı şartlar altında oluşturacağı kristal sayısı birbirinden farklıdır. En tesirli olanı ise gümüş iyodürdür. Ancak bu maddelerin tesir derecesi sıcaklıkla değişir. Örneğin, bir gram gümüş iyodürün oluşturduğu kristal

sayısı $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 10 iken $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ de bu sayı 1010 ise ç ıkar. Netice olarak suni tohumlama olabilmesi için öncelikle nem oranı yüksek bir bulutun mevcut olması ve bulut üstü sıcaklığın belli bir değere düşmesi gerekir. Aslında yağış mekanizması çok komplike olduğundan tohumlama konusunda belirsizlikler vardır. Tohumlama zamanlaması rüzgâr profili, havanın yukarı yükselme hızı ve diğer hava şartları, süper soğumuş su damlacıkları, çekirdek konsantrasyonu, damlacıkların birleşip büyüme durumu ve yönü gibi pek çok faktöre bağlıdır. Genel olarak yağış tahmini yapılır ve diğer şartlar da uygunsa tohumlama yapılır. Tohumlamadan 15 dakika veya birkaç saat sonra yağış olabilir. Orta şiddetle sağanak üreten yaz kümülüs bulutları ve alçak kış bulutları uygun tohumlama imkânı sunar

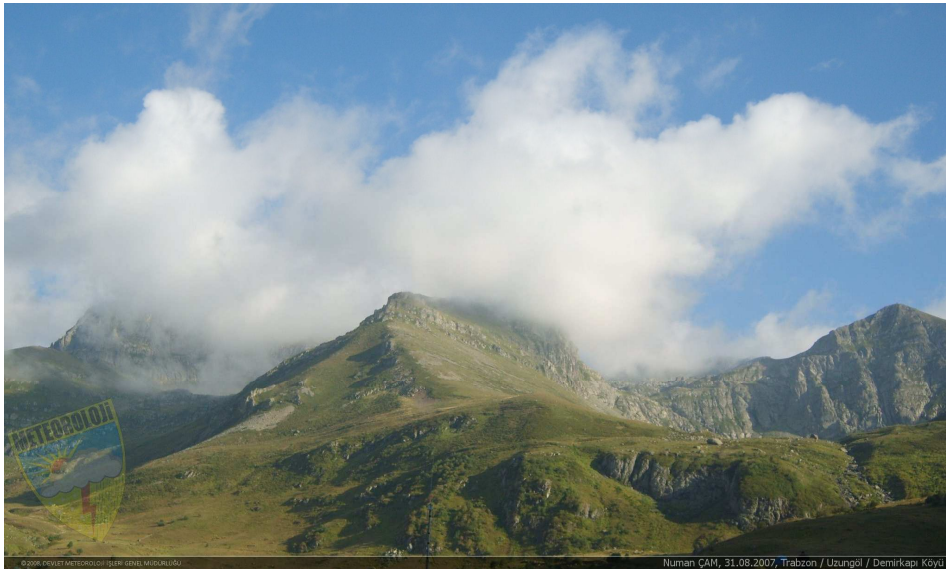
Bulutlarda Yağış Zenginleştirme

Yağmur yağdırmak için yapılan herhangi bir bulut tohumlama işleminde birinci problem tohumlamaya uygun bulutun bulunmasıdır (tohumlama bulutları oluşturmaz). Bulut tohumlama işlemindeki ikinci problem ise, yoğunlaşma çekirdeği olarak hizmet edecek olan higroskopik maddelerin, bulut içindeki en uygun yere zamanında ve doğru miktarda ulaştırılmasıdır. Ayrıca, iyi bir sonuç almak için bulut soğuk olmalıdır. Bulut tohumlamasında bulut partiküllerinin büyümesine neden olan buz kristali yöntemi kullanıldığı için, en azından bulutun bir parçası süper soğumuş olmalıdır (Pruppacher ve Klett, 1979).

Bir bulut sistemindeki yağış tahmin edilebiliyorsa, o bulut sistemine yapılacak suni bulut tohumlamasının etkilerini kestirmek oldukça kolay olmaktadır. Suni yağış oluşturabilmek için genelde aşağıda belirtilen bulut sistemlerinde, bulut tohumlama işlemi yapılmaktadır.

Orografik bulut sistemleri

Bir dağı tırmanmaya çalışan havanın yükselmesi ve soğumasıyla yağış oluşması model olarak alınırsa, bu model bulut tohumlama işlemi için en ekonomik yollardan birisidir. Hava modifikasyonunda bu tür bulutlar fazlaca dikkat çeken bulutlardır. Elde olan tekniklerle aşırı soğumuş orografik bulutlardan belli koşullarda daha fazla yağış elde etmek mümkündür. Bu tekniklerin uygulandığı yerlerde, yerde yapılan yağış ölçümünün istatistiksel değerlendirmeleri uzun dönemde mevsimsel olarak yağışın arttığını doğrulamaktadır.



Fotoğraf-1 Uzungöl, Trabzon, Numan Çam, www.dmi.gov.tr

Gözlemler ve kullanılan sayısal modellerle desteklenen fiziksel çalışmalarda, eldeki tekniklerin kullanılmasıyla içerisinde aşırı soğumuş su damlacıkları bulunan bulutlardan, daha fazla yağış elde etmek olasıdır. Tohumlama deneylerinde de tohumlama sırasında yağış miktarının arttığı doğrudan gözlenebilmektedir. Bu gözlemlerde istatistiksel analiz sonuçlarını desteklemektedir.

Stratiform Bulutlar

Soğuk stratiform bulutların tohumlanması olayı hava modifikasyon sürecinin modern dönemine rastlar. Sığ stratiform bulutlar belli koşullar altında yağışa neden olabilir ve tohumlamayla yağış sonrasında kaybolur ve yerini açık havaya bırakırlar. Siklon ve cephelerle beraber gelişen ve görülen derin stratiform bulut sistemleri belli miktar yağış yapar. Bir dizi alan deneyleri sayısal uyarlamalar bu bulutların belli yerlerinde aşırı soğumuş suyun bulunduğunu ve yağış miktarının artırılabilirliğini göstermiştir.



Fotoğraf-2 Yarlı Köyü, Hayrat, Trabzon, Serap Başkan, www.dmi.gov.tr

Kümülüform Bulutlar:

Dünyanın birçok bölgesinde, kümülüform bulutlar temel yağış kaynağıdır. Bu bulutlar kuvvetli dikey yükselme ve yüksek yoğunlaşma oranlarıyla karakterize edilir. Bu bulutlar en yüksek yoğunlaşma kapasitesine sahip su kütlesi ve en yüksek yağış miktarı ihtiva ederler. Günümüzde devam eden tohumlama deneyleri tek hücreli ve çok hücreli konvektif bulutlarda değişik sonuçlar vermektedir. Bu değişik sonuçlar tam olarak anlaşılabilmiş değildir.



Fotoğraf-3 Gürpınar, Şabanözü, Çankırı, Aziz Deniz, www.dmi.gov.tr

Buzla tohumlama tekniklerinde yağışı zenginleştirmede kullanılan tohumlar, buz oluşumu sürecini hızlandırarak yağışa dönüşmesini sağlar. Uygulanan tekniğin sonunda ne kadar başarılı olup olmadığı, yerde yapılan doğrudan yağış miktarı ölçümleri ile radarlarla yapılan yağış tahminleriyle belirlenir. Her iki yöntemin de kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

Bulut taban sıcaklığı 10°C ve daha sıcak olan konvektif bulutlarda yapılan buzla tohumlama deneyleri karmaşık sonuçlar vermektedir. Bu tür bulutlarda amaç gizil ısıyı artırarak, dikey yukarı faaliyetleri hızlandırmak ve yere düşecek yağış miktarında artış sağlamaktır. Deneyler tek hücreli konvektif bulutlarda olumlu sonuçlara ulaşıldığını fakat sonuçların çok hücreli konvektif bulutlarda da başarılı olacağını göstermektedir.

Geçmiş yıllarda, yağış miktarını artırmak amacıyla soğuk ve sıcak konvektif bulutların kimyasallarla tohumlanması işlemi günümüzde hem deneylerde hem de alan çalışmalarında yeniden yapılmaya başlanmıştır. Sıcak yağmur sürecinin zenginleştirilmesinin iki yöntemi belirlenmiştir: Birincisi; bulut tabanında bulunan damlacıkların yoğunlaşmasına ivme kazandırmak ve yağışı çabuklaştırmak için tohumlamada çapları 0.5 ile 1.0 mikrometre arasında değişen yapay küçük parçacıkların kullanılması, ikincisi; damlacıkların birleşmesi ve yağışın gelişimini hızlandırmak için tohumlamada çapları 30 mikrometreyi bulan daha büyük higroskopik parçacıkların kullanılması. Yapılan istatistiksel değerlendirmeler ve radar bilgilerine göre ikinci teknikte yağış belirgin olarak artmaktadır. Bilinen fakat nedeni açıklanamayan olgulardan biriside yağış artışının tohumlamadan hemen sonra değil de bir ile dört saat sonrasında gerçekleşmesidir.

Son zamanlarda yapılan tohumlama deneyleri, karasal konvektif bulutların dikey yukarı hareketli kesimlerinde yapılan tohumlama olaylarında radar tahminli yağış miktarlarında artış olduğunu göstermiştir. Deneyler dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleştirilmiş, farklı coğrafi özelliklere rağmen istatistiksel sonuçların birbirinin aynı olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak; fiziksel ölçümlere göre, bulutun yaşam evresinin

ilk başlarında bulut tabanında yapılan tohumlamayla daha büyük yağmur damlaları elde etmek ve yağışı zenginleştirmek mümkündür.

Uçakla Bulut Tohumlama İşlemi

Bulut tohumlama işlemlerinde en zor iş, çekirdek olarak görev görece küçük parçacıklarla bulutu doğru bir şekilde tohumlamaktır. Günümüzde bulut tohumlama ile ilgili çözülmesi gereken birçok teknik problemler vardır (Pruppacher ve Klett, 1978; Mason, 1971). Bu problemlerin en büyüğü gümüş iyodür (AgI) gibi suni yoğunlaşma çekirdeklerinin, bulut içindeki en uygun yere ulaştırılmasıdır.

Suni yoğunlaşma çekirdekleri bulut içine havadan ve yerden olmak üzere iki farklı yolla ulaştırılır;

Havadan tohumlamada uçaklar suni yoğunlaşma çekirdeklerini bulutun

1-Tepesinden içine

2- İçine girerek

3- Tabanından yukarı akımlar ile bulutun içine bırakabilirler.

Havadan tohumlamada uçaklar ile söz konusu çekirdekler, bulutun tepesinden, bulutun içine girilerek veya tabanından bulutun içine bırakılabilir. Uçakların yoğun hava trafiği yaşanan havalimanlarında kuleden izin alarak zamanında kalkıp uçuşunu gerçekleştirmesi önemli bir problemdir. Yerden tohumlamada, Rusların yaygın olarak kullandığı havan topları ve roketler ile beraber renkli dumanlar çıkartan ateşe bezer bir işlevi olan yer jeneratörleri kullanılır. Bütün bunlardan roketler, en pahalı fakat en isabetli olan tohumlama yöntemidir.

Sıcaklığı $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerinde olan sıcak bulutlar ise yağmur üretmek için tohumlandığında, küçük su damlaları ve kimyasal tuz parçacıkları bulut tabanına enjekte edilir. Bu partiküller düşey hareketle bulut içine taşındığında, çarpma ve yapışma işlemi ile de büyüyen büyük bulut damlacıkları meydana gelebilir. Fakat bu metodun kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar güvenilir bulunmamıştır.

Kanatlara takılı brülörlerin saldıgı gümüş iyodür dumanı, yükselen havayı, belirli fırtına bulutlarının sıfır derece altındaki iç bölüme doğru yöneltir. O yükseklikte gümüş iyodür parçacıkları, bulut suyunun etrafında donabileceği birer çekirdek işlevini görür. Yeterli ağırlığa ulaşan buz taneleri düşmeye başlar ve iniş sırasında eriyerek yağmura dönüşür. Kuramsal olarak bakıldığında, bu strateji sadece yağış miktarını artırmakla kalmaz, nemin bulutlar içinde yukarıya sürüklenerek dolu haline gelmesini de önler.



Fotograf-4 Yağmur damla çapını ölçen sistem



Fotoğraf-5 Resimde uçaktan gümüş iyodür dumanı püskürterek gerçekleştirilen bir bulut tohumlama işlemi görülmektedir

Aşağıdaki resimlerde günümüzde kullanılan gümüş iyodür ve bulut tohumlama cihazlarından bazıları görülmektedir:



Fotoğraf-6 Uçak kanadına takılmış bulut tohumlama fişekleri



Fotoğraf-7 50 gr gümüş iyodür içeren bulut tohumlama fişekleri



Fotoğraf-8 Bir bulut tohumlama cihazının deneme atış

Yer Yüzeyinden Yapılan Bulut Tohumlama İşlemi

Tanklarda bulunan gümüş iyodür partikülleri jeneratör yardımıyla yerden orografik bulut içerisine enjekte edilir. Yerden bulutun tohumlanması işleminde hedef bölgesinin belirlenmesi ve orografik olarak yükselen bulut içindeki dikey yukarı aşağı hareketlerden dolayı bulutu tohumlamak oldukça zordur.



Fotoğraf-9 Yer Tohumlama Sistemleri

Yer roket sistemleri. Bulut içersine gümüş iyodür partikülleri yerden fırlatılan roketler ile enjekte edilir.



Fotoğraf-10 Yer Gümüş İyodür Roket Sistemleri

Bulut Tohumlama Yağışı Artırır mı?

Gümüş iyodür ile suni tohumlama yağış artışında nasıl etkilidir? Bu soru, meteorolojistler arasında çok tartışılan bir konudur. Her şeyden önce bulut tohumlama işleminin sonuçlarını değerlendirmek zordur. Ne zaman tohumlanmış bulut dan yağış görülürse, eğer bulut tohumlanmasaydı, ne kadar yağacaktı? Sorusu akıllara gelir.

Mevcut teknikler yağışın çok düşük olduğu alanlarda ve orta yağışlı alanlarda, kurak mevsimde önemli bir tesire sahip değildir. Eğer öyle olsaydı Afrika'nın kurak ülkelerindeki açlık meselesi çözülebilirdi. En iyi neticeye yağışın çok iyi olduğu yer ve mevsimlerde ulaşabilmektedir. Bir yerde suni tohumlama ile yağış arttırılırken diğer bir yerde azalma olabilmektedir.

Bulut tohumlamasını değerlendirirken, bulut tipi, sıcaklığı, nem içeriği ve damlacık büyüklüğünün dağılımı gibi diğer faktörler de düşünülmelidir. Bazı deneyler bulut tohumlamasının yağışı artırmadığını göstermesine rağmen, diğerleri doğru şartlar altında tohumlama işlemi yağışı %5-20 arasında artıracağı görülmüştür.

Hava Modifikasyonunun Çevresel, Sosyal Ve Ekonomik Yönleri

Hava modifikasyonu bazı ülkeler tarafından ekonomik bir aktivite olarak algılanmaktadır. Bulut tohumlama işleminde ekonomi, ekoloji, sosyal ve yasal yönlerde hesaba katılmalıdır.

Hava modifikasyonunun bitişik ülke sınırlarına yakın yerlerde yapılması durumunda, en fazla dikkat edilmesi gereken hususlardan biriside yasal düzenlemelerdir. Günümüzde yasal düzenlemeler ve bilimsel bilgiler bu tür hava modifikasyonu olaylarında daha tam olarak yeterli değildir.

Uzun dönem veya uzun süreli gerçekleştirilecek hava modifikasyon işlemlerinde ekosistemin etkileneceği bilinmelidir. Bu çalışmalar sonucunda ekosistemde yaşanabilecek değişimlere karşı önlemler alınmalıdır. Özellikle operasyonel süreçte olası olumsuz etkilere çözümler üretilmelidir.