

## Hava Modifikasyon İşlemlerinde Yapay Yağış Tekniği

Turgut ÖZTÜRK<sup>1</sup> Büşra KOÇ<sup>1</sup>

**ÖZET:** Hava modifikasyon işlemiyle yapay yağış oluşturma ve bu sistemin etkinliği meteorolojistler arasında çok tartışılan bir konudur. Doğru şartlar altında, tekniğine uygun yapılan bulut tohumlama işleminin yağışı % 5-20 arasında artırabileceği ileri sürülmektedir. Yağış zenginleştirme potansiyeli su kaynakları yönetimiyle çok yakından ilişkilidir. Bu potansiyel teknolojinin kullanımı entegre programlara ve bu programların ekonomik olarak sürdürülebilmesine bağlıdır. Bu çalışmada bulut tohumlama işleminin dünya ve Türkiye'deki tarihsel gelişim süreci üzerinde durularak yağış oluşumu ve bulut tohumlama sistemleri ile bulutlarda yağış zenginleştirme işlemleri hakkında bazı özet bilgiler verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapay yağış, bulut tohumlama, hava modifikasyonu

## Artificial Rainfall Technique in Weather Modification Operations



**ABSTRACT:** Formation artificial rainfall by means of weather modification operations and the efficiency of the system among meteorologists are much debated issue. It is reported that rainfall is increases 5-20 % by the cloud seeding operations made according to the technique under the right circumstances. Rainfall enhancement potential is very closely related with water resources management. Using to this potential technology depends on integrated programs and the economic sustainability of these programs. The study is focused on the historical development of cloud seeding systems in Turkey and in the World. Accordingly the brief knowledges concerning the formation of rainfall and cloud seeding systems with rainfall enhancement operations into clouds are given.

**Keywords:** Artificial rainfall, cloud seeding, weather modification

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Samsun, Türkiye

Sorumlu yazar/Corresponding Author: Turgut ÖZTÜRK, turgutoz@omu.edu.tr

## GİRİŞ

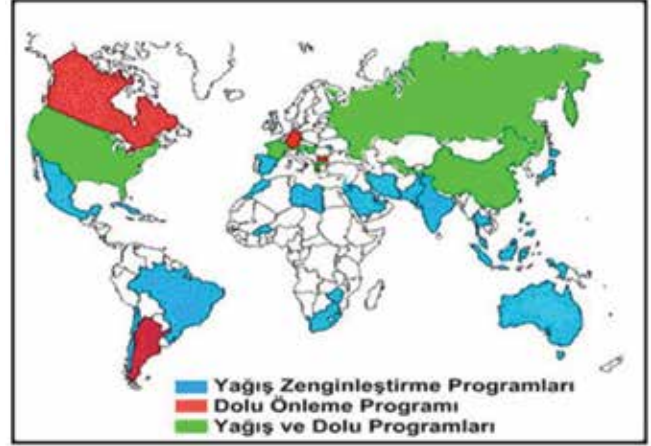
Dünyanın birçok bölgesinde akarsulardan, yeraltı sularından ve geleneksel kaynaklardan suyun tedarik edilmesi; çoğalan nüfus, artan tarımsal kullanım, artan evsel ve endüstriyel kullanım nedeniyle suya olan talebin artmasıyla bahsedilen kaynaklar yetersiz kalmakta veya stres altında bulunmaktadır. Belirli bulut sistemlerinde bulutun mikro-yapısını etkileme ve değiştirebilmenin mümkün olduğu laboratuvar, modelleme ve gözlemsel çalışmalarda gösterilmiş ve doğrulanmıştır. Yağışın artırılması amacıyla bulut tohumlama, azalan su kaynaklarının durdurulmasına yardımcı bir araç olarak kullanılmaktadır (Young, 1996).

Yüzyıllar boyunca insanoğlu, su kaynaklarını artırmak, şiddetli hava olaylarının etkisini azaltmak için hava ve iklimi değiştirmenin yollarını araştırmıştır. Hava modifikasyonuna ilişkin modern teknoloji 194' lı yılların sonunda gümüş iyodürün bulut damlacıklarının buz kristallerine dönüştürülmesinde kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Günümüzde birtakım ülkeler artan enerji talebini karşılamak, dünya üzerindeki kurak ve yarı kurak bölgelerde azalan su kaynaklarını tekrar zenginleştirmek, var olan kaynakların seviyesini artırmak için yüzden fazla hava modifikasyon projesi yürütmektedir (Youshida et al., 1999).

Bulut tohumlama yöntemi 1960' lı yıllardan itibaren ABD'de geliştirilmiş ve günümüze kadar uygulanmaya devam edilmiştir. Yağmur bombası yöntemi ülkemizde ilk olarak 1990 yılında İstanbul'da İSKİ tarafından uygulanmıştır. Farklı zaman dilimlerinde İstanbul Ankara ve İzmir'de de kısa süreli olarak aynı yöntemden faydalanılmıştır (Anonim, 2012).

Dünyada 24 ülke bulut tohumlama yöntemini daha fazla yağış sağlamak için kullanmaktadır (Şekil 1). 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, rüzgar 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 çık-

masına yardımcı olmaktadır. Buna paralel olarak aynı değerlerde 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 (Orville, 1996).



Şekil 1. Dünya hava modifikasyon çalışmaları haritası (Bruitjes, 1999)

Kimyasal çalışmalarla beraber yürütülen 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.

## BULUT TOHURLAMA İŞLEMİNİN DÜNYA VE TÜRKİYE'DEKİ TARİHSEL GELİŞİM SÜRECİ

Hava modifikasyon deneyleri için ilk uygulamalar 1881 yılında ABD Hükümeti tarafından patlamalar yoluyla yağmur oluşturmak için fonlar oluşturulmasıyla başlamıştır. Bu bağlamda hava modifikasyon işlemleri için üç çeşit yöntem denenmiştir. Bu yöntemler karbonmonoksit gazı ile doldurulmuş hava balonları, uçurtmalar tarafından gökyüzüne çıkarılan ve potasyum klorid içeren çok miktarda patlayıcı ile yere yakın yerlerde patlatılan dinamit ile doldurulmuş bombaların patlatılmasıdır. Amerikan deneyleri, patlayıcılardaki parçaların yoğunlaşma çekirdekleri olarak hareket edeceği ve sonik dalgaların küçük bulut damlacıkları yapacağı ve böylece yağmur damlaları oluşturacağı varsayımına dayanmaktaydı. Bu uygulamalar başarılı sonuçlar ge-

tirse de meteorologlar bu çabaları işe yaramaz olarak kabul etmişlerdir. 1882'den sonra ise bu deneyler hiç tekrarlanmamıştır. Ancak 1909 yılında Yeni Zelanda'da benzer girişimlerde bulunulmuştur (Chernikov, 2012).

ABD'de Prof. J.P Espy 1837 yılında ısı enerjisi salınarak (örneğin odun yakarak) konvektif bulutların gelişiminin uyarılabileceğini ileri sürmüştür. Buna karşın Prof. A. Macfarlane, bulut sıcaklığını yükseltmek yerine bulut sıcaklığının düşürülmesi gerektiği fikrini önermiştir. Sıcaklığı, ortamın sabit olmayan durumuna göre dikey doğrultuda yükseltmek dikey hava hareketlerine neden olmakta ve bunun sonucunda da yağış ve elde edilen miktar üst katmanlardaki sıcaklık düşüşünün derecesine bağlı olmaktadır. Macfarlane, sıvı karbonik asit buharlaştırma yoluyla hava sıcaklığının yüksek seviyelerde azaltılmasını önermiştir. Ancak, yukarıdaki yaklaşımların ikisi de, sabit atmosferde, ilave tarımsal verimden elde edilecek gelirden daha fazla masraf yapılmasını gerektiren uygulamalar olarak kabul edilmiştir (Chernikov, 2012).

Atmosferin elektriksel durumunun değişiminin, yağışı etkileyebileceği varsayımının doğrulanması üzerinde de çok fazla durulmuştur. 1893 yılında Fransa'da A. Baudouin 1200 m boyunda iletken bir iple bir uçurma havalandırma ve bu durumlarda sis üretildiğini ve yağmur damlalarının çökeldiğini ileri sürmüştür. Ancak, diğer ülkelerde yapılan birçok deney bu yöntemi destekleyen sonuçlar vermemiştir (Chernikov, 2012).

Yirminci yüzyılın başında bilim adamları tarafından gerçekleştirilen temel araştırmalarda, su damlacıklarının çarpışmasının hızlandırılması ve yeni bir tohumlama tekniğinin geliştirilmesi amacıyla kum parçacıkları kullanılmıştır. Yağış geliştirme için S.L. Bestamov tarafından yürütülen bir hava modifikasyon programı Moskova Yapay Yağmur Enstitüsü tarafından bilimsel ve mali açıdan desteklenmiştir. 1931 yılında, bu enstitünün bir bölümü daha sonra Leningrad Deneysel Meteoroloji Enstitüsüne dönüştürülmüştür. Başında Prof. V.K. Obolensky yer aldığı bu enstitünün temel amacı hava modifikasyon çalışmalarıyla kuraklığı engelleme önlemleri geliştirmektir. Aynı enstitüde 1939 yılında, kum parçacıkları kullanılarak bulut tohumlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ne yazık ki, İkinci Dünya Savaşı, bu çalışmaların gerçekleştirilmesine sekte vurmuştur (Chernikov, 2012).

Uçak kullanarak ilk olarak bulut tohumlama teşebbüsüne 1922 yılında başvurulmuştur. Güney Afrika'daki Karoo üzerindeki bulutlara kum atmak için çift kanatlı bir uçak kullanılmıştır. Kuru buz ile bulutları tohumlamanın ilk alan denemeleri, II. Dünya Savaşı'ndan önce gerçekleştirilmiştir. 1931 yılında Hollandalı fizikçi A. Feraart, uçaktan buluta tohumlama yapmak için çekirdeklandırıcı ajan olarak kuru buz (katı karbon dioksit) kullanmıştır (Cotton, 1982).

A.B.D'de General Electric firması laboratuvarlarında 1946 ve 1947 yıllarında Schaefer ve Vonnegut tarafından yapılan deneyler, belirli malzemelerin aşırı soğutulmuş (süper soğuk damlacıklar) sıvı su damlacıklarının buz kristallerine dönüştürülmesinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Vincent Schaefer ve Irving Langmuir kuru buzun (katı karbon dioksit), aşırı soğutulmuş sıvı su damlacıklarından oluşan bir buluttan düştüğünde, damlacıkları bu kristallerine dönüştürdüğünü göstermiştir. Bulutun içine atılan küçük buz parçacıkları havayı yeni sıvı damlacıkların oluşabileceği sıcaklığa kadar soğutmuş ve damlacıklar -40 °C sıcaklığın altında donmuştur. Sonra yeni oluşan bu buz kristalleri birleşme yoluyla yağış olarak düşecek büyüklüğe ulaşmıştır. Vonnegut tarafından gerçekleştirilen deneyler en etkili buz çekirdekleştiricilerin gümüş ve kurşun iyodür (AgI ve PbI) olduğunu göstermiştir. Schaefer ve Vonnegut'un keşifleri, hava modifikasyonunda modern dönemi başlatmıştır (Biswas and Dennis, 1971).

2008 yılında Çinli meteorolojistler 8 Ağustos'taki Pekin 2008 olimpiyatlarının açılış seremonisi için açık bir gökyüzü oluşturmayı garanti etmişlerdir. Temelde Çinli meteorolojistler yağmur oluşturma işleminin tersini uygulamışlardır. Çinli meteorolojistler yağmur damlalarının boyutlarını düşürmek için benzer bir teknik kullanmışlardır. Yağmur damlacıklarının düşmesini engellemek için bulutlar uzaklaşana kadar stadyum üzerinde basit bir şemsiye oluşturulmuştur. Pekin belediyesi meteoroloji bürosu altında örgütlü olan Pekin iklim mühendisleri odası olimpik hava modifikasyon projesinde oldukça önemli rol almıştır. İklim mühendisleri ofisi Pekin banliyölerine komşu illeri de kapsayacak savunma ağı dalgası geliştirmiştir. Bulutların hareketini ertelemek veya bulutları geçiştirmek için 26 adet kontrol istasyonu konuşlandırılmıştır (Uduma, 2012).

Projede 32000 sivil ve asker görev almıştır. Meteoroloji ofisi için çalışan görevliler tarafından; hafif uçaklar, roketler ve fişeklerle Pekin'in rüzgar alan 50 km karşısındaki bulutların içerisine gümüş iyodür kristalleri veya kuru buz peletleri püskürtülmüştür. Sonuçlar kontrol istasyonları tarafından 10 dakika içinde merkeze bildirilmiştir. Bir gümüş iyodür fişegine 88 yuan (12.75 U.S.doları), bir rokete 2.000 yuan (290 \$) ve bir hafif uçağa daha fazla harcama yapılmıştır. Uzmanlara göre her bir istasyonda 4 roket ve 100'ün üzerinde fişek kullanılmıştır (Uduma, 2012).

Çoğu meteorolojisiler bulut tohumlama teknolojisinin sadece küçük ve orta büyüklükteki bulutlarda etkin olduğunu ve böylece yüzlerce km<sup>2</sup> alanı kaplayabilen dev fırtına bulutu sistemlerinin etkilenmesinin mümkün olduğunu belirtmektedirler. Pekin deneyi göstermiştir ki yağmurun hızını artırmak, yağmuru ertelemek ya da yağmurun düşeceği yeri değiştirmek için kullanılan yöntem oldukça basittir. Bu bağlamda bazı meteorolojisiler hava modifikasyonun etkinliği için yetersiz olan büyük ölçekli iklim koşullarındaki bulut oluşturma çalışmalarını tartışmaya açmıştır. Gökyüzüne gümüş iyodür serpmenin negatif etkileri üzerine olan diğer itirazlarda çevre de yaratacağı etki üzerinedir (Orville, 1996).

Çin son 5 yıldır kuraklık deneyimi geçirmiş dünyanın en büyük tahıl üreticisidir. Son yıllarda sekiz ana üretim vilayetinde kışlık buğday ekili 9.1 milyon hektar alan kuraklıktan etkilenmiştir. Buna bağlı olarak 3.5 milyon insan ve 1.66 milyon çiftlik hayvanı içme suyu yetersizliği çekmiştir. Uygulanan yapay yağmur projesi kapsamında 100.000 km<sup>2</sup> alandan daha fazla bir alanda orta ölçekli yapay yağış oluşturma başarıya ulaşmıştır (Uduma, 2012).

Popeye projesi ya da popeye operasyonu A.B.D. ordusunun Vietnam ordusunun bölgedeki kamyon aktivitesini (hareketliliğini) azaltmak ve yavaşlatmak için Vietnam savaşı boyunca yağmurları artırmak (Laos üzerindeki muson sezonunu uzatmak) amacıyla yapmış olduğu bir operasyondur. Proje 20.03.1967' de başlamış ve 05.07.1972' de sona ermiştir. Gümüş iyodür bulut tohumlama operasyonu hedef alanlarda muson sezonunu ortalama olarak 40-45 gün uzatmıştır. Operasyon çamur nedeniyle kamyon trafiğini yavaşlattığı için kısmen başarılı olmuştur (Young, 1996).

Yağış zenginleştirme çalışmaları Türkiye' de ilk olarak 1990 yılında İstanbul' da İSKİ tarafından uygulanmıştır. Farklı zaman dilimlerinde İstanbul Ankara ve İzmir' de de kısa süreli olarak aynı yöntemden faydalanılmıştır (Anonim, 2012).

## YAĞIŞ OLUŞUMU VE BULUT TOHURLAMA

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-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 (Bergeron, 1949).

Bulut tohumlama düşüncesi yukarıdaki teoriye dayanmakta olup esas şudur; eğer küçük katı bir partikül süper soğuk bir sıvı içine sokulursa, sıcaklık derecesi 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

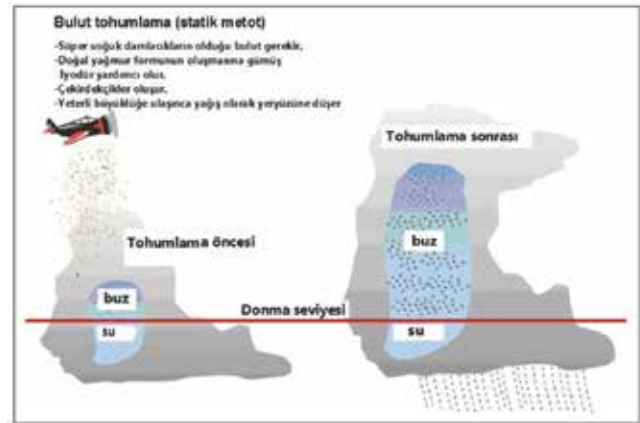
değişir. Örneğin, bir gram gümüş iyodürün oluşturduğu kristal sayısı  $-6^{\circ}\text{C}$  de 10 iken  $14^{\circ}\text{C}$  de bu sayı 1010' a çıkar. Netice olarak suni tohumlama olabilmesi için öncelikle nem oranı yüksek bir bulutun mevcut olması ve bulut üstü sıcaklığın belli bir değere düşmesi gerekir. 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 imkanı sunar (Pruppacher and Klett, 1979).

Bir hava modifikasyon işlemi olan bulut tohumlama işi, bulut içerisinde mikrofiziksel işlemleri oluşturan buz çekirdekçisi veya bulut yoğunlaştırıcı maddelerin hava içerisine dispers edilmesiyle bulutlardan düşen yağışın tipini veya miktarın değiştirme teşebbüsüdür. Genel amaç yağışı (yağmur, kar) artırmaktır. Fakat dolu ve sisin engellenmesi de hava alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Seto et al., 2010).

Bulut tohumlaması için yaygın olarak kullanılan kimyasallar tuzdan ziyade gümüş iyodür ve kuru buzdur. Likit propan gazı da kullanılmaktadır. Likit propan gazı gümüş iyodüre göre daha yüksek sıcaklıklarda bile buz kristalleri üretebilmektedir. Tuz gibi higroskopik materyaller umut verici araştırmalardan sonra popüler olmaya başlamıştır (Rosenfeld et al., 2010).

Bulut tohumlamasında  $0^{\circ}\text{C}$  den daha düşük sıcaklıklarda süper soğuk damlacıklar olarak tanımlanan sıvı damlacıklarına gereksinim vardır. Örneğin gümüş iyodür gibi maddeler buzun yapısıyla benzer kristal yapıya sahip olduğundan uyarıcı donmuş çekirdekçik etkisi yaratır. Havaya verilen genişmiş propan veya kuru buz, su buharını spontone (kendiliğinden) olarak çekirdek buz kristalleri haline gelmesinde yardımcı olmaktadır. Bu kendiliğinden oluşan çekirdekçikler herhangi bir damlacık veya parçacık istemez, çünkü onlar tohum maddesi olarak ekstrem derece yüksek süper soğuk damlacıkları oluştururlar (Klauszura and Todd, 1978).

Bununla birlikte mevcut damlacıkların yağmur olarak düşebilecek yeterli miktarda büyüklüğe ulaşabilmeleri için buz kristallerine ihtiyaçları vardır. Orta enlemlerdeki bulutlarda çoğunlukla tohumlama stratejisi, su üzerindeki daha düşük denge buhar basıncı temelinde dayanır. Süper soğuk bulutlar içindeki buz kristallerinin oluşumu sıvı damlacıkların büyütülmesindeki partiküllere izin verir. Yeterli büyüklük oluşmuşsa partiküller ağırlaşır, yağış oluşturmeyen bulutlardan yağış olarak düşer. Bu işlem statik tohumlama olarak bilinir (Şekil 2).



Şekil 2. Bulut tohumlama (statik metot) (Klauszura and Todd, 1978)

Sıcak mevsim tohumlaması veya tropik kümülonimbus bulutları (konvektif bulutlar) donma nedeniyle serbest kalmış gizli ısıdan yararlanır. Dinamik tohumlama varsayımı ilave ısı dengesi, yukarıya doğru güçlü hareketler, daha düşük seviyelerde konvergenze (yüksek basınç alanı üzerinde alçak basınç alanı-merkeze doğru hareket) stratejisine dayanır. Sonuç olarak mevcut seçilmiş bulutlarda hızlı büyümeye neden olur. Diğer bazı bilimsel kaynaklar tarafından tohumlama işlemi uçaklar tarafından serpiştirilen veya yere konuşlandırılmış cihazlardan (roketler, uçak savarlar, jeneratörler, varillerde yakılan ateşlerden) serpiştirilen tohumlama kimyasalları olarak isimlendirilir. Uçaklardan serbest bırakılan gümüş iyodür fişekleri uçak uçarken bulutun içerisine ateşlenir. Yere konuşlandırılmış cihazlar serbest bırakıldığı zaman ince parçacıklar serbest kalması sonrası aşağı-yukarı hareketlenir (Holroyd et al., 1978).

Geneva Üniversitesindeki araştırmacılar tarafından 2010 yılında Berlin üzerindeki havaya direkt olarak infrared lazer dalgaları elektronik bir mekanizmayla uygulanmıştır. Deneyler pozitif sonuçlanmıştır. Dalga-

lar atmosferik sülfürdioksit ve nitrojendioksitleri partiküller oluşturmaları için teşvik etmiş ve bu parçacıklar daha sonra tohum olarak eyleme geçmiştir.

### BULUTLARDA YAĞIŞ ZENGİNLEŞTİRME

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 and Klett, 1979).

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

**Orografik form bulutlar:** Bir dağı tırmanmaya çalışan havanın yükselmesi ve soğumasıyla yağış oluşması model olarak alınır, 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 (Elliott, 1986).

**Stratus form bulutlar:** Soğuk stratus bulutların tohumlanması olayı hava modifikasyon sürecinin modern dönemine rastlar. Stratus 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 stratus form 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 (Super, 1990).

**Kümüls form bulutlar:** Dünyanın birçok bölgesinde, kümüls form 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 anlaşılabilir değildir. 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 gizli 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 (Cotton, 1982).

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 birisi de yağış artışının tohumlamadan hemen sonra değil de bir ile dört saat sonrasında gerçekleşmesidir.

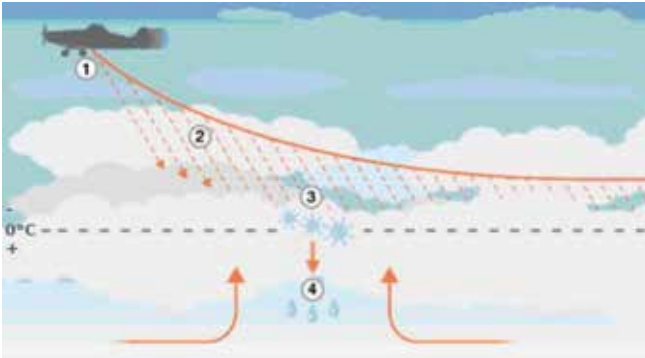
Son zamanlarda yapılan tohumlama deneyleri, karasal konvektif bulutların dikey yukarı hareketli kesimlerinde yapılan tohumlama olaylarında radar tahmini yağış miktarlarında artış olduğunu göstermiştir. Deney-

ler 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 (Rosenfeld et al., 2010).

### UÇAKLA BULUT TOHURLAMA İŞLEMİ

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. Bu problemlerin en büyüğü gümüş iyodür (AgI) gibi yapay yoğunlaşma çekirdeklerinin, bulut içindeki en uygun yere ulaştırılmasıdır. Yapay yoğunlaşma çekirdekleri bulut içine havadan ve yerden olmak üzere iki farklı yolla ulaştırılır. Havadan tohumlamada uçaklar yapay yoğunlaşma çekirdeklerini bulutun;

- Tepesinden içine,
- İçine girerek,
- Tabanından yukarı akımlar ile bulutun içine bırakılabilirler (Şekil 3)



Şekil 3. Kümülonimbus bulutuna fişekler yardımıyla gümüş iyodür uygulaması

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 (Bruintjes, 1999).

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 sıcaklık altındaki iç bölüme doğru yöneltir (Şekil 4 ve 5). 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 (Bruintjes, 1999).



Şekil 4. Uçaklarda kanatlardan gümüş iyodür dumanı salan brülörler

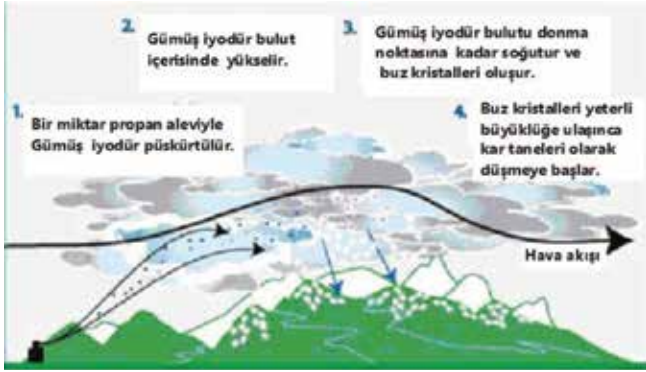


Şekil 5. Uçak kanatlarına yerleştirilmiş gümüş iyodür fişekleri

## YER YÜZEYİNDEN YAPILAN BULUT TOHURLAMA SİSTEMLERİ

### Yüzeyden orografik bulut tohumlama sistemi:

Tanklarda bulunan gümüş iyodür partikülleri jeneratör yardımıyla yerden orografik bulut içerisine enjekte edilir (Şekil 6 ve 7). Yerden bulutun tohumlanması işlemi hedef bölgesinin belirlenmesi ve orografik olarak yükselen bulut içindeki dikey doğrultuda yukarı-aşağı hareketlerden dolayı bulutu tohumlamak oldukça zordur (Elliott, 1986 ; Manton et al., 2011).



Şekil 6. Yüzeyden orografik bulut tohumlama (Elliott,1986)



Şekil 7. Yüzeyden orografik bulut tohumlamada sistem unsurları



Şekil 8. Yer gümüş iyodür roket sistemleri

**Yer roket sistemleri:** Bu sistemde bulut içerisine gümüş iyodür partikülleri yerden fırlatılan roketler ile enjekte edilir (Şekil 8).

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Hava modifikasyon işlemiyle yapay yağış oluşturma ve bu sistemin etkinliği meteorolojisiler arasında çok tartışılan bir konudur. Her şeyden önce bulut tohumlama işleminin sonuçlarını değerlendirmek zordur. Ne zaman tohumlanmış buluttan yağış görülürse, eğer bulut tohumlanmasaydı ne kadar yağacaktı sorusu akıllara gelir. Bu alana yönelik olarak yapılan bazı uygulamalar mevcut yapay yağış tekniğinin yağışın çok düşük olduğu alanlarda ve orta yağışlı alanlarda kurak mevsimde önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Yapay yağış tekniğiyle en iyi sonuçlara yağışın çok iyi olduğu yer ve mevsimlerde ulaşabilmektedir. Bunun yanında bir alanda yapay tohumlama ile yağış artırılırken diğer bir alanda ise yağışta azalma olabilmektedir. Bulut tohumlamasını değerlendirirken bulutun; tipi, sıcaklığı, nem içeriği ve damlacık büyüklüğünün dağılımı gibi diğer faktörler de düşünülmelidir. Doğru şartlar altında, tekniğine uygun yapılan bulut tohumlama işleminin yağışı % 5-20 arasında arttırabileceği ileri sürülmektedir.

Hava modifikasyon işlemleri bazı ülkeler (Başta Çin, A.B.D ve Rusya olmak üzere) tarafından ekonomik bir işlem olarak algılanmaktadır. Bulut tohumlama işlemi; ekonomi, ekoloji, sosyal ve yasal yönlerde hesaba katılmalıdır. Hava modifikasyonunun bitişik ülke sınırlarına yakın yerlerde yapılması durumunda, en fazla dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de 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 etkilenmesi bilinmelidir. Bu çalışmalar sonucunda ekosistemde yaşanabilecek değişimlere karşı önlemler alınmalıdır.

Potansiyel yağış zenginleştirme potansiyeli su kaynakları yönetimiyle çok yakından ilişkilidir. Bu potansiyel teknolojinin kullanımı entegre programlara ve bu programların ekonomik olarak sürdürülebilmesine bağlıdır. Hava modifikasyon araştırmaları son 40 yıldır dramatik gelişmelere sahip olmuştur. A.B.D' de 1970



yılında 19.000.000 \$ bir destek yapılmışken, 1990'lı yıllarda bu değer 5.000.000 \$ olmuştur. Bu konuda en büyük destekte Devlet Atmosfer Modifikasyonu Programından sağlanmıştır. Bu program alana yönelik heyecan dolu bazı yeni üretimlere neden olmuşsa da, program 1995 yılında iptal edilmiştir. A.B.D' de bu alandaki araştırmalara yapılan destek miktarı yıllık olarak 500.000 \$ civarındadır. Son birkaç yıldır konuya yönelik operasyonel programlarda artış olmuştur. Yağış zenginleştirme araştırmalarının çoğu da A.B.D. dışında yürütülmüştür.

Hava modifikasyon işlemlerinde yapay yağış teknolojisinin bilimsel temelini geliştirmek için sürekli ve daha yoğun bilimsel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

### KAYNAKLAR

- Anonim, 2012. Suni yağış. <http://www.mgm.gov.tr/genel> (Erişim tarihi: 04.03.2013).
- Bergeron, T., 1949. The problem of artificial control of rainfall on the globe. I. General Effects Of Ice-Nuclei In Clouds. *Tellus*, 1: 32-43.
- Biswas, K.R., Dennis, A.S., 1971. Formation of rain shower by salt seeding. *Journal of Applied Meteorology*, 10: 780-784.
- Bruinjes, R.T., 1999. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bulletin of American Meteorology Society*, 80: 805-820.
- Chernikov, A.A., 2012. Artificial rainfall. Central Aerological Observatory, Roshydromet, Russia.
- Cotton, W.R., 1982. Modification of precipitation from warm clouds a review. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63: 146-160.
- Elliott, R.D., 1986. Review of wintertime orographic cloud seeding. *American Meteorology Society*, 87-103.
- Holroyd, E.W., Super, A., Silverman, B., 1978. The practicability of dry ice for on-top seeding of convective clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 17: 49-63.
- Klazura, G.E., Todd, C.J., 1978. A model of hygroscopic seeding in cumulus clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 17: 1758-1768.
- Manton, M.J., Warren, L., Kenyon, S.L., Peace, A.D., Bilish, S.P., Kemsley, K., 2011. A confirmatory snowfall enhancement project in the snowy mountains of Australia. Part I: Project design and response variables. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50: 1432-1447.
- Orville, H.D., 1996. A review of cloud modeling in weather modification. *Bulletin of American Meteorology Society*, 77: 1535-1555.
- Pruppacher, H.R., Klett, J.D., 1979. Microphysics of clouds and precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(446): 759-1095.
- Rosenfeld, D., Duncan A., William L.W., Ronen L., 2010. A quest for effective hygroscopic cloud seeding. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49: 1548-1562.
- Seto, J., Tomine, K., Wakimizu, K., Nishiyama, K., 2011. Artificial cloud seeding using liquid carbon dioxide: comparisons of experimental data and numerical analyses. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(7): 1417-1431.
- Super, A.B., 1990. Winter Orographic cloud seeding status in the intermountain west. *The Journal of Weather Modification* 22: 106-116.
- Uduma, K., 2012. Using artificial rain to fight african droughts. <http://www.vanguardngr.com/2012> (Erişim tarihi: 04.03.2013).
- Young, K.C., 1996. Weather modification: A theoretician's viewpoint. *Bulletin of American Meteorology Society*, 77: 2701-2710.
- Yoshida Y., Murakami, M., Kurumizawa, Y., Kato, T., Hashimoto, A., Yamazaki, T., Haneda, N. 2009. Evaluation of snow augmentation by cloud seeding for drought mitigation. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 22(3): 209-222.

