

# **YAPAY YAĞIŞ VE YAĞIŞ ARTIRMA ÇALIŞMALARI**

**Meteoroloji Genel M¼d¼rl¼ė¼  
AraŐtırma Dairesi BaŐkanlıėı  
Hidrometeoroloji Őube M¼d¼rl¼ė¼**

**Ankara  
2021**

## 1. GİRİŞ

Yaşamın kaynağı suyun zamansal ve mekânsal olarak değişken olması, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılayamaması ya da şiddetli hava olayları ile zarar vermesi asırlar süren yeni çözüm yolları arayışını doğurmuştur. Hava ve iklimi değiştirmek, diğer bir deyişle hava modifikasyonu bu yollardan biri olarak görülmüştür. Hava modifikasyonu sis dağıtma, dolu azaltma, fırtına etkisini azaltma gibi birçok şekilde denenmiştir. Bunlardan biri de yağış artırımıdır. Bu kapsamda 1940'lı yılların sonunda gümüş iyodür bulut damlacıklarının buz kristallerine dönüştürülmesinde kullanılmasıyla yenilikçi teknoloji ortaya çıkmıştır. Bulut tohumlama adı verilen bu işlem 1960'lı yıllardan itibaren ABD'de geliştirilmiş ve günümüze kadar gelmiştir (Kadioğlu, 2001). Yöntemin ülkemizde ilk uygulaması 1990 yılında İstanbul'da İSKİ tarafından yapılmıştır. Farklı zaman dilimlerinde İstanbul, Ankara ve İzmir'de de kısa süreli olarak aynı yöntemden faydalanılmıştır.

Bulut yapısı karmaşık ve değişken olduğundan tohumlama ile yapılan etkilerin nasıl sonuçlar doğuracağı net değildir. Yapılan deneyler ile elde edilen sonuçların istatistiki ve bulut fiziği açısından değerlendirilmesi ile yeni ölçütlerin ortaya çıkarılmasını sağlamaktadır. Ayrıca haberleşme ağı istasyonları, otomatik yağışölçer ağı, rüzgâr profili belirleyicisi, mikro dalga radyometreler, uydular, radar, hava hareket ölçüm sistemiyle donanmış uçaklar, bilgisayarlar gibi yeni teknolojik ürünler deneylerdeki veri miktarını da artırmaktadır (Orville, 1996). Verilerin işlenmesi ile bulutlara ve hava akımlarına dair yeni bilgiler elde edilmesinin yanı sıra yağış ve bulut klimatolojisi ortaya konmaktadır. Ancak operasyonel programlarda tam olarak gelişmemiş teknolojilerin yaratabileceği riskler hesaba katılmalıdır. Örneğin; belli koşullarda tohumlamanın daha fazla doluya neden olabileceği veya yağışı azaltabileceği göz ardı edilmemelidir.

## 2. YAĞIŞ OLUŞUMU VE BULUT TOHURLAMA

Yağış oluşumunda temel teorilerden biri Bergeron-Findeisen'dir (Dennis, 1980). Bu teoriye göre, buz kristalleri yoğunlaşma çekirdeği görevi görerek (buzun buhar basıncı sudan daha az olduğundan aynı şartlarda yoğunlaşma buz üstünde olurken suda olmaz) su damlacıklarının kristaller üzerinde birikerek büyümesine yardımcı olmaktadır. Büyüyen kristaller aşağıya düşmeye başlar ve düşerken birleşerek ortam sıcaklığına göre yağmur, kar veya dolu olarak değişir.

Bulut tohumlama da aynı mantığa dayanarak küçük katı parçacık süper soğuk (-40 °C) sıvı içerisinde yoğunlaşma çekirdeği görevi görebilir ve buluttaki su molekülleri buz kristali formunda bir çekirdek üzerinde hızla birleşerek yağış oluşturur der. İlk uygulamalar Vincent Schaefer ve Irving Langmuir tarafından 1940'lı yıllarda uçaktan ezilmiş kuru buz (katı CO<sup>2</sup>) parçacıkları atılması şeklinde yapılmıştır. Bulutun içine atılan kuru buz havayı soğutur ve sıvı damlacıkların çoğalarak -40°C sıcaklığın altında donmalarına neden olur. Sonra oluşan buz kristalleri birikme ile büyüyerek yağış olarak düşer (Rogers, 1979).

Yapay 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. İlk olarak 1947'de Bernard Vonnegut tarafından bulut tohumlama işleminde kullanılan gümüş iyodürün etkili bir buz

çekirdeği olmasının nedeni buz kristaline benzer bir kristal yapısına sahip olmasıdır (Mason, 1971; Rogers, 1979). Gümüş iyodür uçağın kanadından veya yer yüzeyindeki kaynaklardan çıkan yanıcı maddelerden buluta taşınabilir olmasından dolayı kullanımını kuru buzdan daha kolaydır. Ayrıca 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. Bu nedenle kurşun iyodür ve bakır sülfür gibi diğer etkili maddelerden daha yaygın kullanıma sahiptir.

Sonuç olarak yapay tohumlama olabilmesi için ilk şart nem oranı yüksek bir bulutun mevcut olması ve bulut üstü sıcaklığın belli bir değere düşmesi yani en azından bulutun bir parçası süper soğumuş olmalıdır. İkinci şart, yoğunlaşma çekirdeği olarak hizmet edecek olan higroskopik maddelerin, bulut içindeki en uygun yere zamanında ve doğru miktarda ulaştırılmasıdır (Pruppacher & Klett, 1979). Ancak yağış oluşum biçimi çok karmaşık 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.

Yapay yağış oluşturabilmek için genelde aşağıda belirtilen bulut sistemlerinde bulut tohumlama işlemi yapılmaktadır.

## 2.1.Orografik Bulutlar

Bir dağı tırmanmaya çalışan havanın yükselme ve soğumasıyla orografik yağışlar meydana gelir. Yapılan çalışmalardan dağın rüzgâr üstü tarafından yapılan yapay tohumlama ile aşırı soğumuş orografik bulutlarda yağış artırımını mümkün görmektedir (Dennis, 1980). Gözlemler ve kullanılan sayısal modellerle desteklenen fiziksel çalışmalarda, eldeki tekniklerin kullanılmasıyla içerisinde aşırı soğumuş su damlacıkları bulunan bulutlardan, daha fazla yağış elde etmek olasıdır.



Şekil 1. Uzungöl, Trabzon, Numan Çam, [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr)

## 2.2.Stratus Tipi Bulutlar

Stratus tipi bulutlar tabaka halinde, belli koşullar altında yağışa neden olan sığ ya da siklon ve cephelerle beraber gelişen ve görülen derin olarak iki farklı şekilde olabilirler. Yapılan çalışmalar bu bulutların belli yerlerinde aşırı soğumuş suyun bulunduğunu ve yağış miktarının artırılabilceğini göstermiştir (Super, 1990; Dong vd., 2020).



Şekil 2. Yarlı Köyü, Hayrat, Trabzon, Serap Başkan, [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr)

## 2.3.Kümülüs Tipi Bulutlar

Kümülüs tipi bulutlar kuvvetli dikey yükselme ve yüksek yoğunlaşma oranlarıyla temel yağış kaynağıdır. Bulut tohumlama deneyleri tek hücreli ve çok hücreli konvektif bulutlarda değişik sonuçlar vermektedir. Bu değişik sonuçlar tam olarak anlaşılabilmiş değildir.



Şekil 3. Gürpınar, Şabanözü, Çankırı, Aziz Deniz, [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr)

Bulut tohumlama sonrasında yağış miktarları yer ölçümleri ve radar verileri ile karşılaştırılarak deneyler değerlendirilmektedir. Bulut taban sıcaklığı 10°C ve daha sıcak olan konvektif bulutlarda gaye gizil ısıyı artırarak düşey hareketleri hızlandırmak ve yere düşecek yağış miktarında artış sağlamaktır. Bu kapsamda bulut tabanında bulunan damlacıkların yoğunlaşmasına ivme kazandırmak ve yağışı çabuklaştırmak için çapları 0,5 ile 1,0 mikrometre arasında değişen parçacıklar ile damlacıkların birleşmesi ve yağışın gelişimini hızlandırmak için çapları 30 mikrometreyi bulan daha büyük higroskopik parçacıkların tohumlamada kullanılmasıdır. Nispeten büyük parçacıkların daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Deneyler tek hücreli konvektif sistemlerde olumlu sonuç verirken çok hücreli sistemler için de umut vaat etmektedir. (Cotton, 1982).

Dünyanın farklı bölgelerinde yapılan deneyler konvektif bulutların düşey hareketli kısımlarında yapılan tohumlamanın radar yağış tahminlerinde miktar artışını sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bulutun ilk evrelerinde tohumlamanın daha büyük damla oluşumuna yardımcı olduğu ve yağış artışının mümkün olduğu görülmüştür (Rosenfeld vd., 2010).

Bulut tohumlamada dikkat edilmesi gereken bir diğer konu, tohumlamanın yapılmasında sonra bir ile dört saat arasında zaman gecikmesi yaşanması ile istenilen bölgeden daha geniş bölgelerde etkili olma olasılığıdır (DeFelice, 2013).

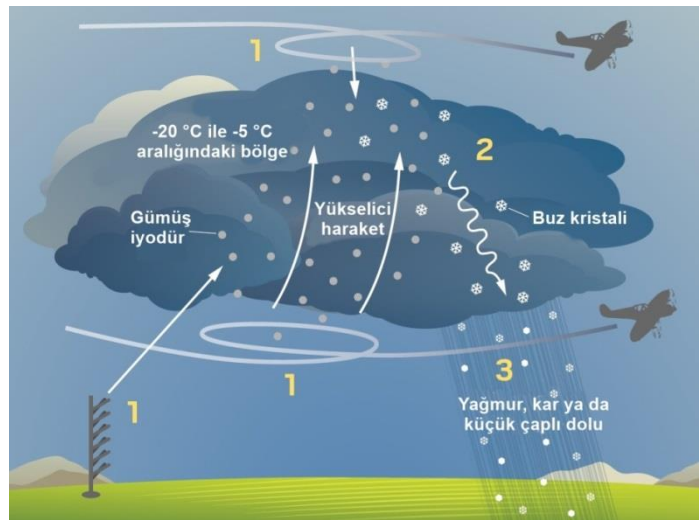
### 3. BULUT TOHURLAMA YÖNTEMLERİ

Bulut tohumlamanın ikinci şartı olan yoğunlaşma çekirdeği olarak hizmet edecek olan higroskopik maddelerin, bulut içindeki en uygun yere zamanında ve doğru miktarda ulaştırılması işlemin en zor kısmıdır. Yapay tohumlama havadan ve yerden olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

#### 3.1.Uçakla Bulut Tohumlama

Havadan tohumlamada uçaklar tohumlama maddesini bulutun tipi, sıcaklığı, düşey akımlar gibi ölçütlere bağlı olarak 3 şekilde bulutun içine bırakabilirler: 1) Tepesinden içine 2) İçine girerek 3) Tabanından yukarı akımlar ile (Şekil 4). Örneğin; sıcaklığı -5 °C üzerinde olan sıcak bulutlar tabanından tohumlanarak düşey hareket yardımıyla çarpma birleşme ile damlacıkların büyümesi sağlanabilir. Ancak elde edilen sonuçlar güvenilir bulunmamıştır.

Bir diğer sorun ise uçuş trafiğinin yoğun olduğu havalimanlarında zamanında kalkış izni almaktır. Kanatlara takılı brülörlerin saldıgı gümüş iyodür dumanı yardımıyla tohumlama yapılır (Şekil 5 ve 6).



Şekil 4. Bulut tohumlama (Yang H. Ku, 2021)



**Şekil 5.** Yağmur damla çapını ölçen sistem ve uçaktan gümüş iyodür dumanı püskürterek gerçekleştirilen bir bulut tohumlama işlemi



**Şekil 6.** Uçak kanadına takılmış bulut tohumlama fişekleri ve 50 gr gümüş iyodür içeren bulut tohumlama fişekleri

### 3.2.Yer Yüzeyinden Yapılan Bulut Tohumlama

Yerden bulut tohumlama işlemi havan topları, roketler ile tanklarda bulunan gümüş iyodürün yer jeneratör yardımıyla buluta püskürtülmesi ile yapılır. İşlemden hedef bölgenin belirlenerek dikey hareketlerden kaçınmak zorluk yaratır. Bu nedenle en pahalı fakat en isabetli olan tohumlama yöntemi roketlerdir.



**Şekil 7.** Yer Tohumlama Sistemleri ve Yer Gümüş İyodür Roket Sistemleri

#### 4. YAĞIŞ ARTIRMA ÇALIŞMALARININ ÇEVRESEL, SOSYAL VE EKONOMİK YÖNLERİ

Yağış artırma çalışmalarının ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi gelecek için önem arz etmektedir. Ekonomik olarak fayda zarar analizlerinin tarım, hidroelektrik enerji üretimi farklı sektörler için ortaya konması gerekmektedir. Benzer şekilde tohumlamada kullanılan gümüş iyodür gibi kimyasal maddelerin etki analizleri yapılmalıdır. Örneğin; yapılan çalışmalara göre suda çözünmeyen gümüş iyodürün toprakta ve nehir yataklarında biriktiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sosyal olarak toplumun bulut tohumlama gibi deneysel yeni teknolojileri değerlendirebilmesi için farkındalık ve bilinçlendirme çalışmaları yapılmalıdır. Dahası yerelden küresele karşılaşılabilecek hukuki sorunlara karşı da düzenlemelerin yapılması gerekliliği mevcuttur (Dennis, 1980).

#### 5. SONUÇ

Yapay yağış çalışmalarının temelini bulut tohumlama uygulamaları oluşturmaktadır. Bulut Tohumlama, yağış miktarı ve türünü değiştirmek için bulutların içine başta gümüş iyodür olmak üzere çeşitli kimyasal maddeler serpiştirerek bulutlarda meydana gelen fiziksel süreçleri etkileme için kullanılan bir hava modifikasyonu yöntemidir. Yapay yağış su açığını gidermek ve su kaynaklarını artırmak amacı ile kullanılan bir yöntem olup sadece gerekli sıcaklık ve nem koşullarına sahip bulutlara uygulanabilir. Bu yöntem ülkemizde ilk olarak 1990'lı yıllarda İstanbul'da denenmiştir.

Yapay tohumlamada gümüş iyodür, amonyum nitrat, kadmiyum iyodür ve diğer higroskopik materyaller çekirdek vazifesi görmek üzere yağmur bulutuna püskürtülmektedir. Bu maddelerin aynı şartlar altında oluşturacağı kristal sayısı birbirinden farklıdır. En etkili olanı ise gümüş iyodürdür.

Yağış arttırmak için yapılan herhangi bir bulut tohumlama işleminde birinci problem tohumlamaya uygun bulutun bulunmasıdır. Zira tohumlama işlemiyle bulut oluşturulmaz. Yağış arttırma çalışmalarında tohumlama için yeterli miktarda ve uygun bulut gerekmektedir. Halen ülkemizde yaşanan yağış azlığının temelinde yatan neden; yüksek basınç sistemi etkisinde bulut oluşumunun az ve tohumlamaya uygun bulutluluğun oluşmamasıdır. Bulut tohumlama işlemindeki ikinci problem ise, yoğunlaşma çekirdeği olarak hizmet edecek olan higroskopik maddelerin, bulut içindeki en uygun yere zamanında ve doğru miktarda ulaştırılmasıdır. Bulut tohumlama işleminden sonra yağışın nereye düşeceği kontrol edilememektedir. Uygun bulutluluk durumu olsa bile, tohumlama sonucunda oluşacak yağışın hedef havzaya düşeceği belirsizdir. Bununla birlikte hedeflenmeyen bölgelere fazla yağış düşebilir ve bazı olumsuzluklara sebep olabilir. Söz konusu olumsuzluktan etkilenen vatandaşlardan dolayı hukuki problemlerle karşılaşılabılır. Doğru şartlar altında, tekniğine uygun yapılan bulut tohumlama işleminin yağışı %5-20 arasında artırabileceği ileri sürülmektedir. Ancak yağışın ne kadar arttığı bilimsel yöntemlerle ve kesin olarak ölçülememektedir.

Sonuç olarak; bulut tohumlama yolu ile yapılan yapay yağış işlemi, yağış azlığının ve kuraklığın su kaynakları üzerindeki olumsuz etkisini gidermek amacı ile fayda/maliyet analizinin yüksek olduğu bölgelerde ve uygulanma potansiyeli olan bir hava modifikasyonu işlemidir ve sadece

uygun sıcaklık ve nem koşullarına sahip bulutlara uygulanabilmektedir. Yağış azlığından veya kuraklıktan kaynaklanan koşulların olumsuz etkilerini en aza indirmek için yapay yağış yöntemleri yerine diğer su kaynaklarından sulama ve enerji maksatlı barajlar için su temini yoluna gidilmesi, su tasarrufu ve kuraklığa daha dayanıklı bitki türlerine yönelmek daha ekonomik çözüm olarak görülmektedir. Ayrıca yağmur hasadı ve yeraltı su depolama tesisleri ile yağışlı dönemde suyun depolanması diğer alternatif bir çözüm olarak görülmektedir

## Kaynakça

- Cotton, W. R. (1982). Modification of precipitation from warm clouds. *Bulletin of American Meteorology Society*(63), 146-160.
- DeFelice, T., Golden, J., Griffith, D., Woodley, W., Rosenfeld, D., Breed, D., . . . Boe, B. (2013). Extra area effects of cloud seeding — An updated assessment. *Atmospheric Research*(135-136), 193-203.
- Dennis, A. S. (1980). *Waether Modification by Cloud Seeding*. Academic Press.
- Dong, X., Zhao, C., Yang, Y., Wang, Y., Sun, Y., & Fan, R. (2020). Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment. *Earth and Space Science*(7).
- Kadıoğlu, M. (2001). *Bulut Tohumlama Kuraklığa Çare mi?*  
<https://m.bianet.org/kadin/cevre/1463-bulut-tohumlama-kurakliga-care-mi> adresinden alınmıştır
- Ku, Y. H. (2021). *Does cloud seeding really work?* Cehmical & Engineering News:  
<https://cen.acs.org/articles/94/i22/Does-cloud-seeding-really-work.html> adresinden alınmıştır
- Mason, B. J. (1971). *The Physics of Clouds*. Oxford University Press.
- Munoz, L. M. (2017). *Seeding Change in Weather Modification Globally*. World Meteorological Organization: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/seeding-change-weather-modification-globally> adresinden alınmıştır
- Orville, H. D. (1996). A Review of Cloud Modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1535-1556.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (1978). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel Publishing Company.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (1979). Microphysics of clouds and precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(446), 759-1095.
- Rogers, R. R. (1979). *A Short Course in Cloud Physics*. Pergamon.
- Rosenfeld, D., Duncan, A., William, L., & Ronen, L. (2010). A quest for effective hygroscopic cloud seeding. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*(49), 1548-1562.
- Super, A. B. (1990). Winter orographic cloud seeding status in the intermountainweat. *The Journal of Weather Modification*(22), 106-116.