

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜRECİNDE
HİDROMETEOROLOJİK AFETLER
VE
TAHMİN SİSTEMİ**

**HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND FORECAST
SYSTEM IN THE PROCESS OF CLIMATE CHANGE**

Hakan DOĞAN

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜRECİNDE HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE TAHMİN SİSTEMİ

Hakan DOĞAN

Meteoroloji Genel Müdürlüğü

Özet

Küresel iklim değişikliğinin etkisiyle, aşırı hava ve iklim olaylarının sıklığı, şiddeti ve coğrafi dağılımında değişiklikler olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin Değerlendirme Raporlarına göre, aşırı hava ve iklim olaylarındaki bu değişikliklerin kuvvetlenerek devam edeceği öngörülmektedir. Buna bağlı olarak, doğa kaynaklı bu tehlikelerin yol açtığı afetlerde de artışlar olacağı beklenmektedir. Doğa kaynaklı afetler denildiğinde, ilk akla gelen depremler olmasına rağmen, şiddetli ve aşırı meteorolojik olaylara bağlı olarak meydana gelen afetler doğa kaynaklı afetlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Farklı iklim bölgelerine sahip olan ülkemizde de son dönemde yaşanan küresel değişimlere bağlı olarak meteorolojik karakterli ve doğa kaynaklı afetlerin daha sık meydana geldiği, can ve mal kayıplarına neden olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yaşanan meteorolojik afetlerin sayılarında ve şiddetinde 2000'li yıllardan itibaren belirgin artış olduğu görülmektedir. Yanlış arazi kullanımı ve yerleşim uygulamaları ile bölgesel ve yerel faktörlerin etkisinin yanı sıra iklim ve hava olaylarından kaynaklanan risklere karşı yeterli hazırlıkların yapılmaması şiddetli ve çok şiddetli meteorolojik hadiselerin birer afete dönüşmesine neden olmaktadır. Yaşanan meteorolojik afetler ve sonuçları, tahmin ve erken uyarıların dikkate alınmasının, şiddetli ve aşırı hava olaylarının birer afete dönüşmeden ya da dönüşse bile olabilecek en az zararlarla atlatılabilmesi için hazır olunmasının ve zamanında doğru önlemler alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Atmosferik olayların tahmin edilebilmesinde teknolojik gelişmelerin artması ile yüksek kapasiteli bilgisayarların kullanımının yaygınlaşması pek çok kolaylığı da beraberinde getirmiştir. Hazırlanan sayısal hava tahmin modelleri ile saatlik, günlük ve haftalık ölçeklerde atmosferde meydana gelebilecek değişimler tahmin edilebilmektedir. Tahminlerin elde edilmesi kadar üretilen erken uyarı ürünlerinin kamuoyu tarafından anlaşılabilir olması da afet tehlikelerinin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Bir tahmin ve erken uyarı kuruluşu olan Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) hazırlamış olduğu meteorolojik tahmin ve erken uyarıları tüm kamuoyu ve ilgili kamu kurum/kuruluşlarının bilgisine sunmakta olup afet risk azaltımı zincirinin ilk parçası olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

Anahtar Kelimeler

İklim, İklim değişikliği, Meteorolojik afetler, Tahmin, Erken uyarı

HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND FORECAST SYSTEM IN THE PROCESS OF CLIMATE CHANGE

Hakan DOĞAN

Turkish State Meteorological Service

Abstract

There are changes in the frequency, intensity, geographical distribution and duration of extreme weather and climate events, with the impact of global climate change. The increase in extreme weather and climate events will continue according to the Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Accordingly, it is expected that there will be an increase in disasters caused by natural hazards. Although earthquakes are the most widely known nature-based disasters, disasters that occur due to severe and extreme meteorological events constitute a large part of nature-based disasters. As in the whole world, meteorological disasters have been occurring quite frequently in our country, which has large geographic and different climatic regions, and have resulted in serious losses of life and property during the recent periods. There has been a considerable increase in the number and the strength of meteorological disasters, especially after the 2000s. The transformation of severe and extreme meteorological events into disasters is a natural consequence of the failure of human systems to be prepared and take precautions against extreme weather and climate risks, as well as local or regional geographical factors such as incorrect settlement and incorrect land use practices. Experienced meteorological disasters and their consequences reveal the importance of considering forecasts and early warnings, being ready to overcome severe and extreme weather events before they turn into disasters, or even if they do, for the least possible damage, taking the right precautions in a timely manner. The prediction of atmospheric events has brought many conveniences because of the widespread use of High-Performance Computing Systems. With the prepared numerical weather prediction models, changes and atmospheric events that may occur in the atmosphere from minute to hour, from day to week can be predicted. It is also very important that the produced early warning products can be understandable by the public, as well as obtaining forecasts to reduce disaster hazards. Turkish State Meteorological Service (TSMS), which is a forecasting and early warning institution, presents the meteorological forecasts and early warnings it has prepared to the information of all public and relevant public institutions/organizations and continues its activities as the first part of the disaster risk reduction chain.

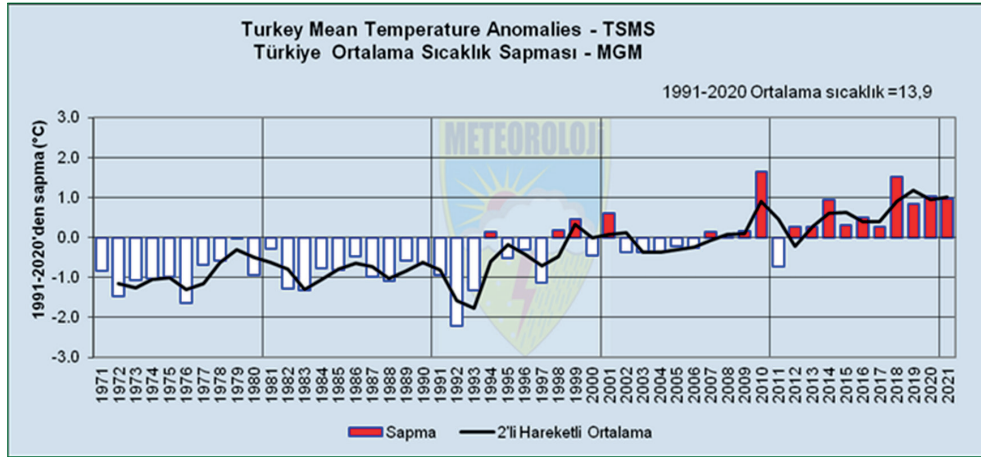
Keywords

Climate, Climate change, Meteorological disasters, Prediction, Early warning

1. İklim İzleme, Analiz Değerlendirme

Geleneksel karbon tabanlı enerji üretim sistemleri ve endüstriyel faaliyetler, atmosferde var olan sera gazı miktarını artırmakta ve iklim değişikliğine insan kaynaklı katkı olarak ortaya çıkmaktadır. Yanlış arazi kullanımı ile hızlı ve plansız kentleşme, önemli yutak alanlarından ormanlar ve tarım alanlarının miktarını azaltmaktadır. Diğer taraftan, asfalt ve betonla kaplanan ve yeşil zeminlerin azaldığı şehirler, kentsel ısı adalarına neden olmaktadır.

İklimde meydana gelen değişiklikler Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) öncülüğünde, ulusal meteoroloji teşkilatları tarafından yapılan gözlem ve ölçümler ile değerlendirilmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre; 2021 yılı Türkiye ortalama sıcaklığı normalin (1981-2010) 1,4°C üzerine çıkarak 14,9°C olarak gerçekleşmiştir. Türkiye’de kaydedilen en sıcak 4. yıl olan 2021 yılı, WMO tarafından kabul edilen yeni sıcaklık normalinin (1991-2020) de 1.0°C üzerindedir (Şekil 1) (MGM, 2022a).



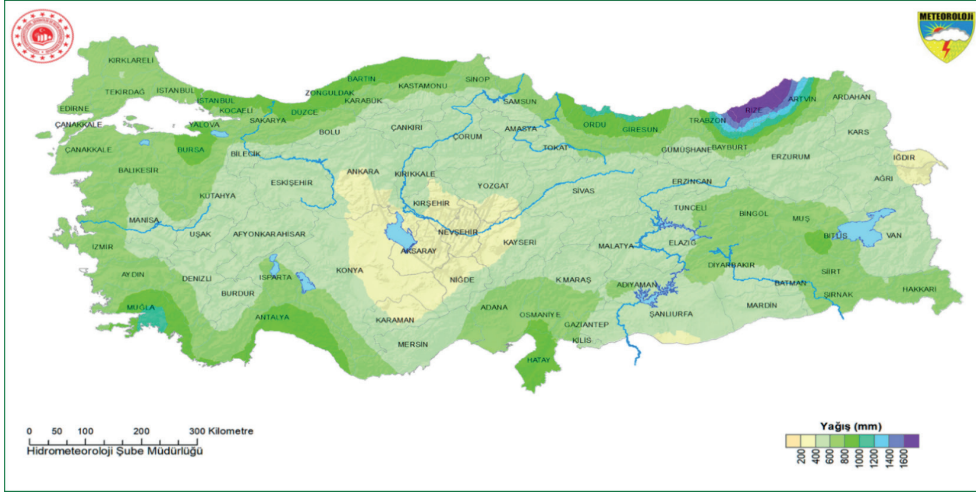
Şekil 1. Türkiye ortalama sıcaklıklarının sapması (1971-2021)

2021 yılı Türkiye alansal yağış ortalaması, 573,4 mm olan yağış normalinin (1991-2020) %8,5 altına düşerek 524,8 mm olarak hesaplanmıştır. 2021 yağışları aynı zamanda, bir önceki yıl yağışlarına göre %4,9 artış göstermiştir (Tablo 1) (MGM, 2022b).

Tablo 1. Türkiye Alansal Yağış Dağılımı ve Geçmiş Dönem Karşılaştırması

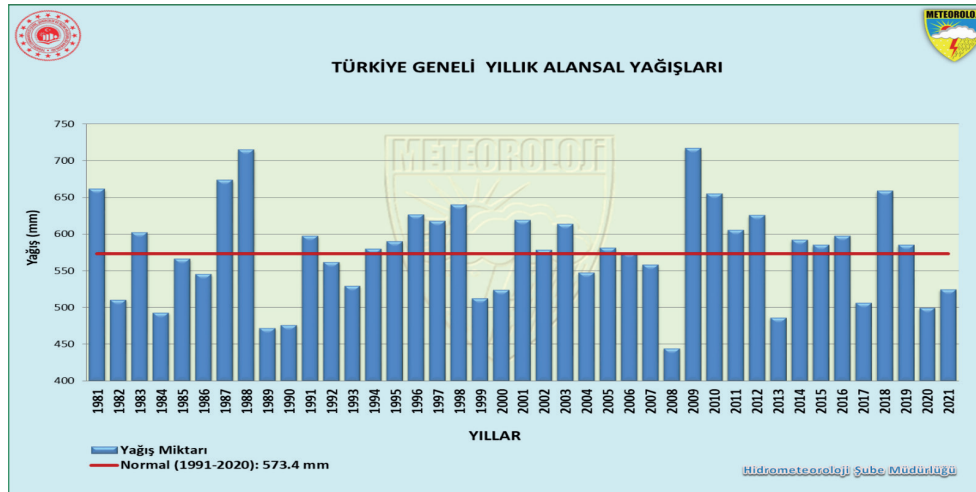
Alansal Yağış Durumu (01 Ocak 2021 - 31 Aralık 2021)					
Bölgeler	Yağış (mm)	Normali (1991-2020) (mm)	2020 Yılı Yağış (mm)	Normale Göre Değişim (%)	2020 Yılına Göre Değişim (%)
Türkiye Geneli	524,8	573,4	500,1	-8,5 Azalma	4,9 Artma

Türkiye geneli yıllık alansal yağış normal 573,4 mm'dir (1991-2020). Türkiye yağış normallerine göre, en yüksek yağış miktarları, 1600 mm'yi aşan yıllık ortalama yağışlar ile Rize ve Artvin kıyıları olurken, en az yağış alan bölgeler İç Anadolu'nun orta kesimleri ile Şanlıurfa ve Iğdır çevreleridir (Şekil 2).

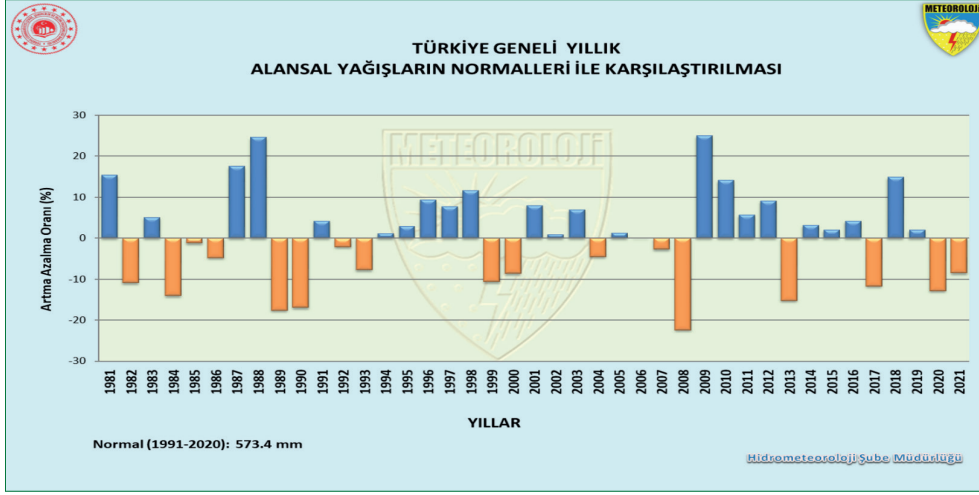


Şekil 2. Türkiye alansal yağış normalleri (1991-2020) (MGM, 2022b)

444,9 mm yıllık ortalamaya sahip olan 2008 yılı, Türkiye yağışlarının kayıt altına alındığı 1930 yılından günümüze kadar görülen en kurak yıl olmuştur. 2020 ve 2021 yılı yağışları da 1991-2020 normalinin altında kalmıştır (Şekil 3 ve 4).



Şekil 3. Türkiye geneli yıllara göre yağış dağılımı (MGM, 2022b)



Şekil 4. Türkiye geneli yıllık yağışların normallerine göre değişim oranları (MGM, 2022b)

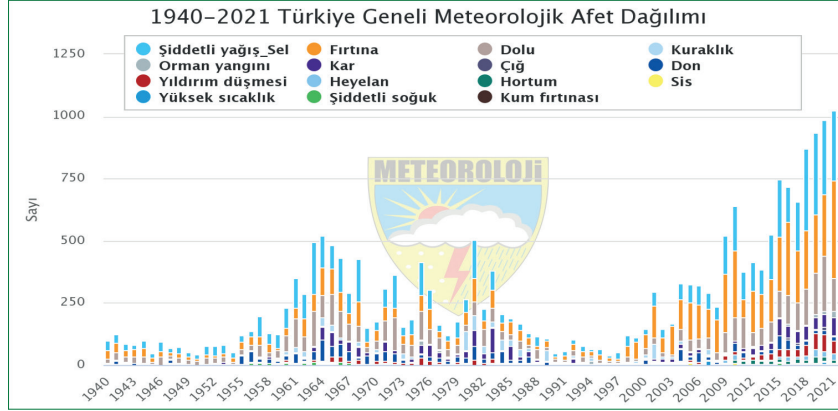
2. Meteorolojik Afetler

Yeryüzünde meydana gelen doğa olaylarının canlı ve cansız varlıklar üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkiler yaratması, doğa kaynaklı afetler veya doğal afetler olarak ifade edilmektedir. Birleşmiş Milletler (BM) tarafından doğa kaynaklı afetler, toplumun sosyoekonomik ve sosyokültürel faaliyetlerini önemli ölçüde aksatan, can ve mal kayıplarına neden olan fakat yerel imkânlar ile baş edilemeyen doğa olayları olarak tanımlanmıştır (Kadioğlu, 2012).

Meteorolojik ve hidrometeorolojik karakterli afetler, doğa kaynaklı afetlerin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Dünya üzerinde meydana gelen 31 doğa kaynaklı afetin 28'i meteorolojik kaynaklıdır (Kadioğlu, 2012). Yağışlar, şiddetli yerel fırtınalar, tropikal fırtınalar, şiddetli kış şartları, kırağı, don ise hava şartları tarafından doğrudan oluşturulan afetlerdir (Kadioğlu, 2008). Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) tarafından 2020 yılında yayınlanan iklim raporunda; 1970-2019 döneminde yaşanan doğal afetlerin yaklaşık %79'unun doğrudan veya dolaylı meteorolojik kaynaklı olduğu ifade edilmiştir. Doğa kaynaklı afetlerde yaşanan can kayıplarının %56'sı, maddi kayıpların ise %75'i meteorolojik karakterli afetlerden kaynaklanmaktadır. (WMO, 2020).

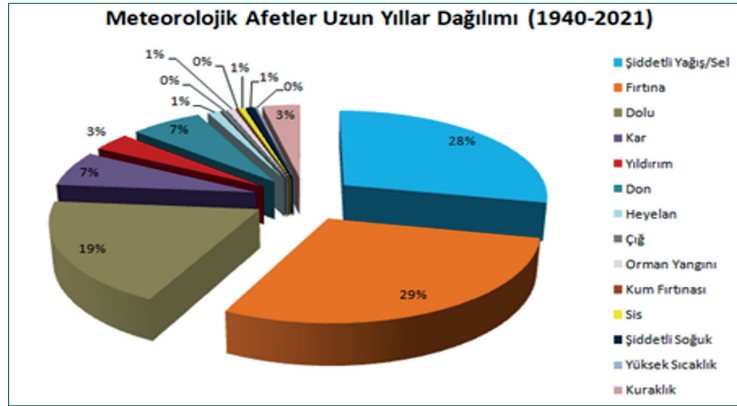
Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı görülmektedir. İklim değişikliğine bağlı olarak; kuraklık, çölleşme, orman yangınları, sel, çığ, heyelan ve fırtına gibi meteorolojik karakterli doğal afetlerin neden olduğu zararların en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. 1940 yılından günümüze Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından tutulan Fevk Kayıtları, başlangıçtan itibaren teknolojinin imkân verdiği çeşitli şekillerde kayıt altına alınmıştır. Son 80 yılda yaşanan meteorolojik ve hidrometeorolojik karakterli afet kayıtları incelendiğinde, özellikle 2000'li yıllardan itibaren daha fazla sayıda afet yaşandığı görülmektedir.

2021 yılında yaşanan meteorolojik karakterli afetler detaylandırıldığında, bölgelere göre afet farklılıkları gözlenmekle birlikte, toplam 1024 afetin büyük bölümünü Fırtına, Şiddetli Yağış/Sel ve Dolu olduğu görülmektedir. (MGM, 2022c). 2021 yılında yaşanan meteorolojik kaynaklı afetlerin toplam sayısının, 1940-2021 dönemi yıllık ortalamasının çok üzerinde olduğu ve gözlem periyodu içinde en fazla afet yaşanan yıl olarak kayıtlara geçtiği görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Türkiye’de 1940-2021 periyodunda gözlenen meteorolojik afetlerin yıllık dağılımları

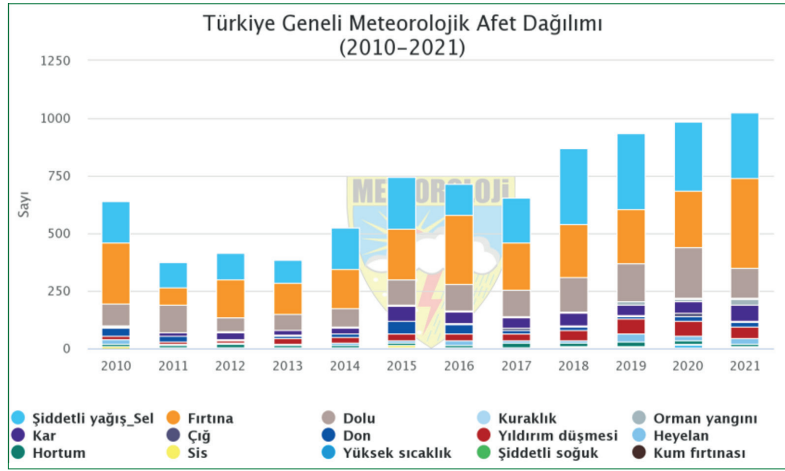
Fevk rasatları veri tabanında, 1940-2021 döneminde yaşanan meteorolojik karakterli doğa kaynaklı afetlerin %29’unun Fırtına, %28’inin Şiddetli Yağış ve Sel, %19’unun ise Dolu olduğu bulunmuştur. Ayrıntılı afet istatistikleri Şekil 6’da verilmiştir.



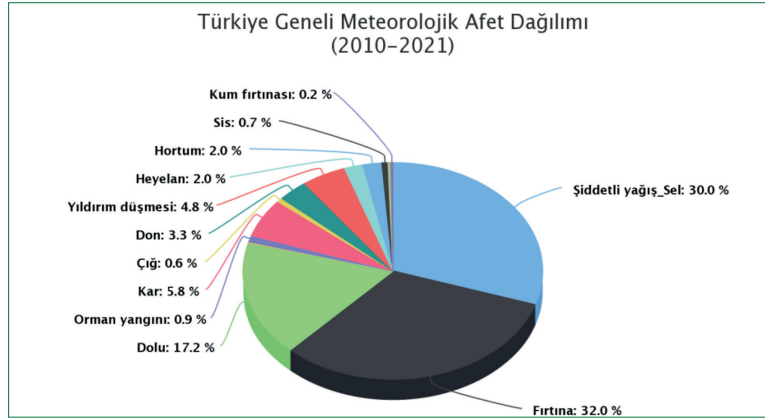
Şekil 6. Türkiye’de 1940-2021 periyodunda meydana gelen meteorolojik afetlerin oluşum yüzdeleri

2000’li yıllardan itibaren hem dünyada hem de ülkemizde yaşanan meteorolojik karakterli afetlerin sayısında ve sıklığında artış yaşanmıştır. İklim değişikliğinin yanı sıra, plansız kentleşme, kentsel ısı adası gibi yerel faktörler meydana gelen afetlerin etkisini daha da artırmaktadır. Günlük yaşam üzerinde önemli etkileri olan sel, taşkın ve fırtınalar can ve mal kayıplarına neden olmaktadır.

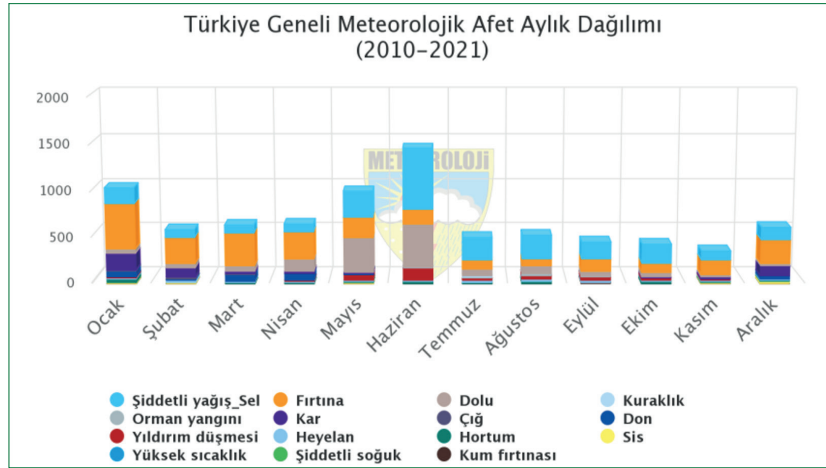
Ülkemizde, 2010-2021 yılları arasında yaşanan 8274 meteorolojik karakterli afetin alansal ve zamansal dağılımında da farklılıklar gözlenmektedir. Yaşanan meteorolojik karakterli afetlerin; afet türü ve afet yoğunluğu ile aylık, yıllık ve coğrafi dağılımları Şekil 7, 8, 9 ve 10’da verilmiştir.



Şekil 7. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin yıllara göre dağılımı (MGM, 2022c)



Şekil 8. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin oluşum yüzdeleri (MGM, 2022c)



Şekil 9. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin aylara göre dağılımı (MGM, 2022c)

2010-2021 döneminde kaydedilen afetler incelendiğinde en fazla afetin Haziran ayında meydana geldiği görülmektedir. Haziran ayını kış ve ilkbahar ayları takip etmektedir. Fırtına ile şiddetli yağış/sel afetleri yılın her döneminde yaşanmakla birlikte mevsimsel farklılıklar gözlenmiştir (Şekil 9).

2010-2021 dönemi fevk kayıtları dikkate alınarak oluşturulan meteorolojik afetlerin coğrafi dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. Akdeniz ve Ege kıyılarında daha fazla sayıda afet görülürken, iç kesimlere doğru afet sayılarında nispeten azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Türkiye'de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin illere göre dağılımı (MGM, 2022c)

3. Hava Tahmini

3.1. Sayısal Hava Tahmini (SHT)

Sayısal Hava Tahmini (SHT), atmosferin dinamik yapısı ile fiziksel mekanizmalarını ifade eden bir dizi diferansiyel denklemin nümerik yöntemler yardımı ile çözülerek gelecekteki hava koşullarının tahmin edilmesi sürecidir. Atmosferi tarif eden bu diferansiyel eşitlikler diagnostik ve prognostik denklemler olmak üzere iki başlık altında toplanır. Diagnostik fonksiyonlar basınç, yoğunluk ve sıcaklık gibi parametreleri tanımlar. Prognostik fonksiyonlar ise yatay rüzgâr bileşenleri, yüzey basıncı ve bunların zamanla değişimi gibi parametreleri tanımlar (Kabaoğlu Hatice vd., 2020; Uzun vd., 2018).

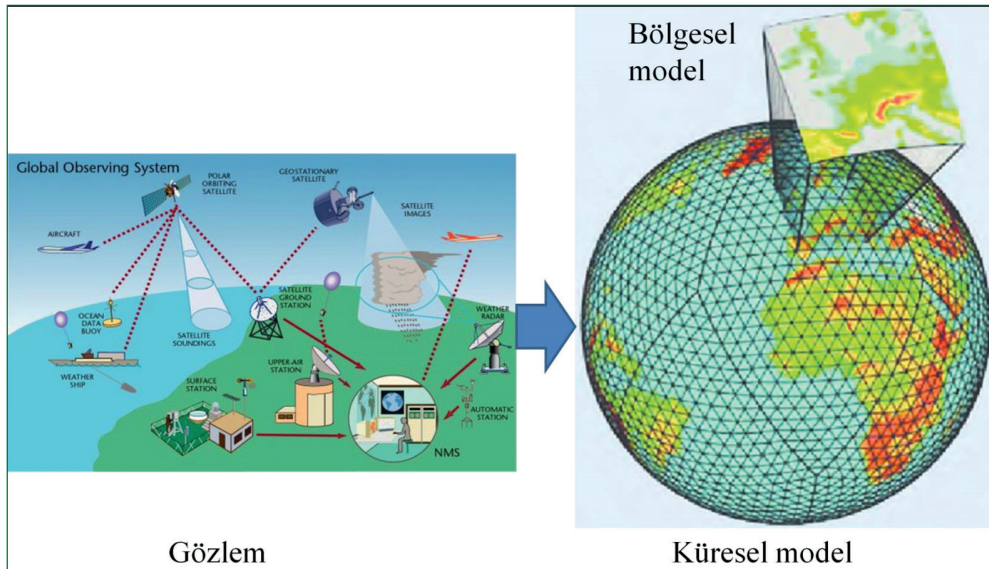
SHT modelleri, hidrostatik ve hidrostatik olmayan modeller olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılır. Hidrostatik modeller, basınç kuvveti ile yerçekimi arasındaki kuvvetin dengede olduğu varsayımına göre çalışır. Bu modeller düşey hareketi doğrudan hesaplamaz. Küresel modellerin çoğu bu esaslara göre çalışır. Büyük ölçekli alanların ve hava olaylarının tahmininde bu modeller kullanılır. Bölgesel modellere göre daha az süper hesaplama kapasitesine ihtiyaç duyar. Küresel modellerin girdilerini meteorolojik gözlem istasyon rasatları, gemi, uçak, şamandıra ve uydu

gözlemleri gibi pek çok kaynaktan elde edilen veriler oluşturur. Hidrostatik olmayan modeller ise düşey hareketi de dikkate alır. Dar bölgelerde gerçekleşen konvektif faaliyetleri tahmin etmede küresel modellere göre daha başarılıdır. Bu tür modeller sınırlı alan modeli olarak da adlandırılır. Çözünürlüğü küresel modele göre daha yüksektir. Hem barındırdığı fonksiyonlar daha karmaşık olduğundan, hem de daha yüksek çözünürlüklü olduğundan küresel modele göre daha fazla süper bilgisayar kapasitesine ihtiyaç duyar (Şekil 11). Bu modellerin girdi verileri küresel model çıktılarından oluşur (Fuka vd., 2014; Lara-Fanego vd., 2012; Min vd., 2019; Skamarock vd., 2019; Yang vd., 2006).

SHT'de yüksek çözünürlük oldukça önemlidir. Çünkü yüksek çözünürlük topografyanın etkilerini daha iyi tanımlar. Ayrıca yüksek çözünürlüklü modeller çok küçük alanlardaki meteorolojik hadiseleri düşük çözünürlüklü modellere göre daha başarılı tahmin eder (Kim vd., 2021).

SHT modellerinde bir diğer önemli konu ise modellerin parametrize ve konfigüre edilmesidir. SHT modelleri atmosferi gridleyerek hesaplar. Parametrizasyonda modelin çalışacağı bazı fizik yaklaşımları ile sabitler belirlenir. Özellikle çok küçük alanlarda gerçekleşen hareketlerin tahmini için parametrizasyon kritiktir. Konfigürasyonda ise çözünürlük, zaman adımı, süre alan gibi ayarlar yapılır.

Çözünürlük, zaman adımı ve süre artırıldıkça model çalışmak için daha fazla süper bilgisayar kaynağı ister. Ayrıca çözünürlüğü artırmak için küresel modellerde daha yoğun gözlem verisi, bölgesel modellerde ise daha yüksek çözünürlüklü bölgesel model verisi sağlanmazsa çözünürlük artırmanın anlamı kalmaz.



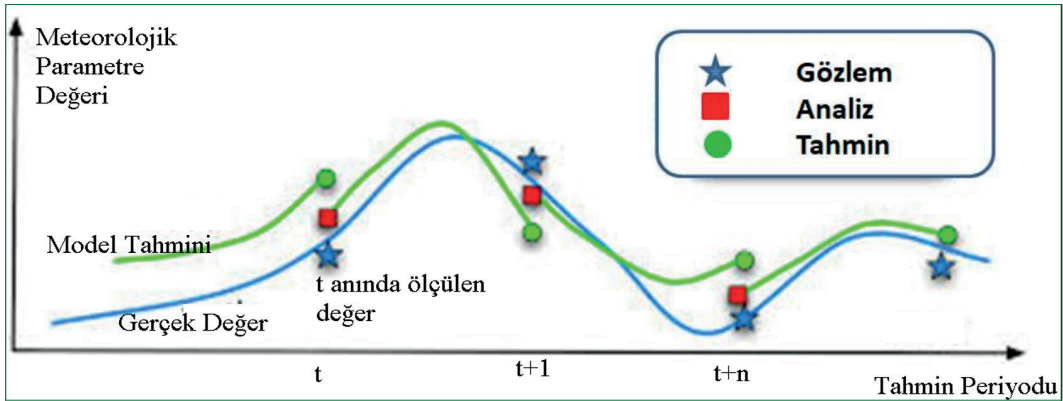
Şekil 11. Gözlemden Sayısal Hava Tahmine Gösterim Şeması (Ernst vd., 2007; WMO, 2015)

3.2. Deterministik ve Ensemble ((Prediction System (EPS)) Modelleri

Atmosferin davranışı kaotiktir. Ayrıca her ne kadar meteorolojik gözlem sayısı dünya genelinde büyük oranda artmış olsa da SHT için halen yetersizdir. Bu gözlemlerde (ölçüm, kalibrasyon vb.) bazı hatalar da mevcuttur. Atmosferin işleyişi hakkında net olarak ortaya konulamamış bazı etkiler de (toz gibi kirleticilerin etkileri ve bunların ölçümü gibi) mevcuttur. Ayrıca dinamik ve fizik denklemlerin nümerik çözümlerinde de yaklaşımdan kaynaklı bir miktar hata ortaya çıkmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı SHT modelleri kaçınılmaz olarak hataya doğru bir miktar eğilim gösterir. Deterministik modeller gözlem verilerinden elde edilen başlangıç veri seti ile çalıştırılır ve tek bir tahmin sonucu üretir. Aynı başlangıç verileri kullanarak model farklı konfigürasyonlarda çalıştırıldığında veya farklı bir model çalıştırıldığında tahmin değişmektedir. Başlangıç verileri istatistiksel yöntemlerle bir miktar değiştirilerek (pertürbasyon) ve farklı model birlikte çalıştırılarak Toplu Tahmin Sistemi (Ensemble Prediction System – EPS) gerçekleştirilmiş olur. Sınırsız sayıda EPS üyesi ortaya konabilir. Fakat bunu süper bilgisayar kapasitesi limitler. EPS modeller genellikle deterministik modellerin yarı çözünürlüğünde ve daha küçük alanda daha kısa bir zaman için çalıştırılır (Bartholmes vd., 2009; Palmer, 2012).

3.3. Veri Asimilasyonu

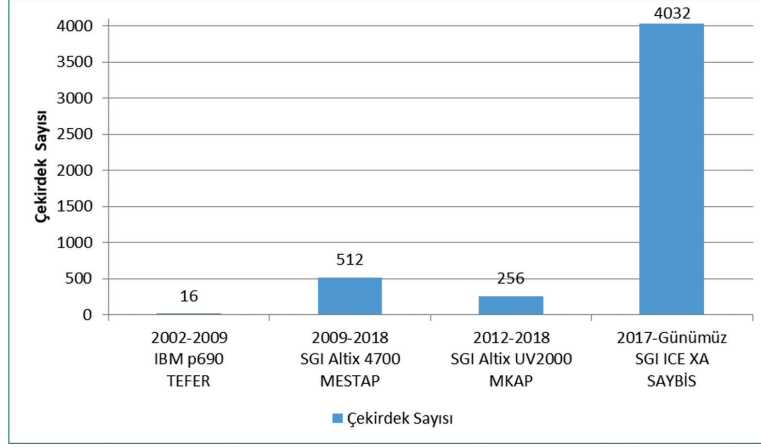
SHT’de modellerin tutarlılık oranını artırmada en verimli yaklaşımlardan biri veri asimilasyonudur (Şekil 12). Veri asimilasyonu; model çalıştırıldığı esnada yeni gelen güncel gözlemlerin tahmin döngüsüne katılarak, modelin hataya olan eğilimini tekrar en doğru tahmine yaklaştırılması işlemidir. Veri asimilasyonu, güncel gözlem bilgileri ile modeli bir araya getirerek atmosferin gerçek durumuna en iyi yaklaşımı bulmaya çalışır. 3DVAR ve 4DVAR olmak üzere iki adet veri asimilasyon tekniği SHT’de sıkça kullanılmaktadır. Veri asimilasyonunda en kritik konu gözlem verilerinin kaliteli ve doğru olmasıdır. Çünkü hatalı veri tahmini büyük oranda bozabilir (Bocquet vd., 2015; Reichle, 2008).



Şekil 12. Veri asimilasyonu

3.4. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde Gerçekleştirilen SHT Çalışmaları

Meteoroloji bilimi multidisipliner alan içerisinde yer almaktadır. Sayısal Hava Tahmini bilgisayar, matematik, fizik başta olmak üzere birden çok farklı bilim dalının bir arada çalıştığı bünyesinde yüksek teknoloji barındıran konulardan biridir. Günümüzde SHT'nin en temel aracı süper bilgisayarlardır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun yıllardır süper bilgisayar çalıştırmaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde SHT Amaçlı Kullanılan Süper Bilgisayarlar

Gelecekte teknolojik ve SHT ihtiyaçlarındaki artışa paralel biçimde YBH sistemi de kaçınılmaz olarak yenilenecektir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü SHT operasyonlarını (Tablo 2)'deki modellerle yürütmektedir.

Tablo 2. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde Kullanılan SHT Modelleri

Model	ECMWF	ALARO	AROME	WRF
Yatay Çözünürlük	9 km	4,5 km	1,5 km	3 km
Düşey Çözünürlük	137 seviye	60 seviye	60 seviye	61 seviye
Tahmin Periyodu	240 saat	72 saat (18 UTC'de 60 saat)	48 saat	72 saat
Güncellenme Sıklığı	00/12 UTC	00/06/12/18 UTC	00/06/12/18 UTC	00/06/12/18 UTC

Meteoroloji yapısı itibari ile uluslararası iş birliğine dayalı bir kuruluştur. Meteoroloji Genel Müdürlüğü küresel model çalıştıran ve geliştiren ECMWF ve ALADIN kuruluşlarının üyesidir. Kurumumuz ECMWF'den ve ALADIN'den küresel model verilerini her gün sunucularına indirmekte ve tahmin operasyonlarında kullanmaktadır. Ayrıca ECMWF kuruluşunun süper bilgisayar olanaklarını kullanmaktadır. WRF bölgesel modeli SAYBİS Yüksek Başarımli Hesaplama (YBH) sisteminde çalıştırılmaktadır ve girdi olarak ise ECMWF küresel model verilerini kullanılmaktadır. ALARO ve AROME modelleri de SAYBİS YBH sisteminde çalıştırılmakta olup küresel model verileri ALADIN'den alınmaktadır.

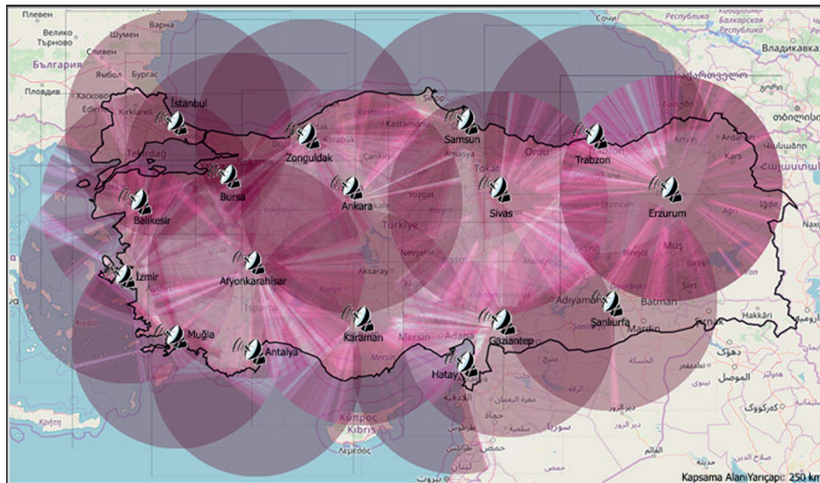
Meteoroloji Genel Müdürlüğünde 17 toplu (ensemble) üyesi bulunan ALAEF EPS modeli çalıştırılmaktadır. Bu modelin yatay çözünürlüğü 10,9 km, dikey çözünürlüğü ise 45 seviyedir. Günde 2 defa (00 ve 12 UTC) çalıştırılan bu sistemin tahmin periyodu 72 saattir.

Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğünde ALARO ve AROME ile veri asimilasyon çalışmaları sürdürülmektedir. Veri asimilasyonuna *sinoptik*, *atmosferik motion vector*, *temp* ve *uydu-radyans* verileri katılmaktadır. Ayrıca veri asimilasyonu için AMDAR, PILOT, BUOY, GNSS, IASI, ASCAT, RADAR, MODE-S, GPS gibi farklı veri kaynakları hakkında kavramsal boyutta çalışmalar sürdürülmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde yer verilerinin asimilasyonunda optimal interpolasyon yöntemi (CANARI), yüksek seviyede ise 3DVAR kullanılmaktadır. Ayrıca GETOBS yöntemi ile gözlem verileri gruplandırılmaktadır.

4. Radar Meteorolojisi

Afetlere neden olan kuvvetli meteorolojik hadiselerin izleme, takip, tahmin ve uyarıları için yaygın olarak kullanılan önemli araçlardan biri meteoroloji radarlarıdır. Meteoroloji radarlarının kullanım amacı özetle;

- Yağış sistemlerinin türü, yönü, hızının belirlenmesi,
- Yağışların yeri, zamanı ve miktarının belirlenmesi,
- Tahmin ve erken uyarı sistemleri desteklenerek can ve mal kayıplarının önlenmesi veya azaltılması,
- Uçuş güzergâhlarının oluşturulması,
- Uçakların kalkış ve inişlerinde önem taşıyan *rüzgar şiri*, *mikroburst*, *makroburst* ve *down-burst* ile kuvvetli rüzgarların büyüklüklerinin alansal ve zamansal olarak tespit edilmesi.



Şekil 14. Meteoroloji radarları kapsama alanları

Meteoroloji Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulan toplam 17 adet C-Band, 2 adet X-Band, 2 adet HF Deniz radarından oluşan bir ağ ile Türkiye'nin hemen hemen tamamı alansal olarak kapsanmıştır (Şekil 14).

5. Meteorolojik Erken Uyarılar

Son yıllarda yüksek tahribat ve kayıplara sebep olan hava ve iklim ile ilişkili şiddetli hava olayları ve bunlara bağlı afetler, dünyanın ve ülkemizin üzerinde önemle durduğu bir konudur. Meteorolojik Afetlere yönelik olarak yapılacak tahmin ve erken uyarıların tutarlılığının artırılması, can ve mal kayıplarının asgari düzeye indirilmesi için zaruridir.

Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı önceki bölümde belirtilmişti. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından afet risk yönetimi kapsamında üretilen tahmin ve erken uyarılar, afet öncesinde olumsuz etkilerin azaltılmasını sağlarken afet sırası ve sonrasında da yapılan çalışmalara katkısı bulunmaktadır.

MGM tarafından afet risklerinin azaltılmasına yönelik hazırlanan tahmin ve uyarılar, basın ve yayın organlarının yanı sıra AFAD ve valilikler başta olmak üzere, merkezi ve yerel kuruluşlar ile paylaşılmaktadır. Tahmin ve uyarıların halkımıza daha yaygın ulaşımı için SMS, e-posta, web sayfası ve cep telefonu uygulaması gibi çeşitli platformlar üzerinden de paylaşılmaktadır.

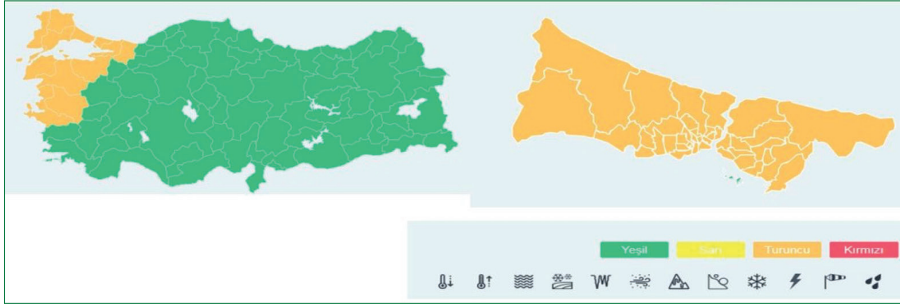
5.1. MeteoUYARI

MGM tarafından yapılan tahmin ve erken uyarıların, yetkililer ve vatandaşlarımız tarafından daha kolay anlaşılması için “MeteoUYARI” sistemi geliştirilmiştir. Günlük hayatı olumsuz etkileyen ve meteorolojik karakterli afetlere neden olması muhtemel kuvvetli ve çok kuvvetli meteorolojik olaylara ilişkin uyarılar, 9 Şubat 2019 tarihinden itibaren “MeteoUYARI” sistemi ile kamuoyuna duyurulmaya başlanmıştır. MGM'nin kendi özkaynakları ile geliştirdiği bu sistemde tanımlanan renk kodları ile her il ve ilçe için 2 günlük uyarılar yayınlanmaktadır. 34 Avrupa ülkesi tarafından da kullanılan renk sınıflandırılmaları ve açıklamaları Tablo 3'te verilmiştir.

MeteoUYARI ile Soğuk/Sıcak Hava Dalgası, kuvvetli rüzgâr ve fırtına, yağmur ve sağanak, sis, zirai don, buzlanma ve don, toz taşınımı, kar erimesi, çığ ve kar hadiseleri için uyarılar yayınlanmaktadır. MeteoUyarı uygulamasında Türkiye geneli 2 günlük uyarılar gösterilmektedir. İlçelere ait detay bilgilere seçilen il özelinde erişmek mümkündür (Şekil 15).

Tablo 3. MeteoUYARI Renk Kodları ve Açıklamaları

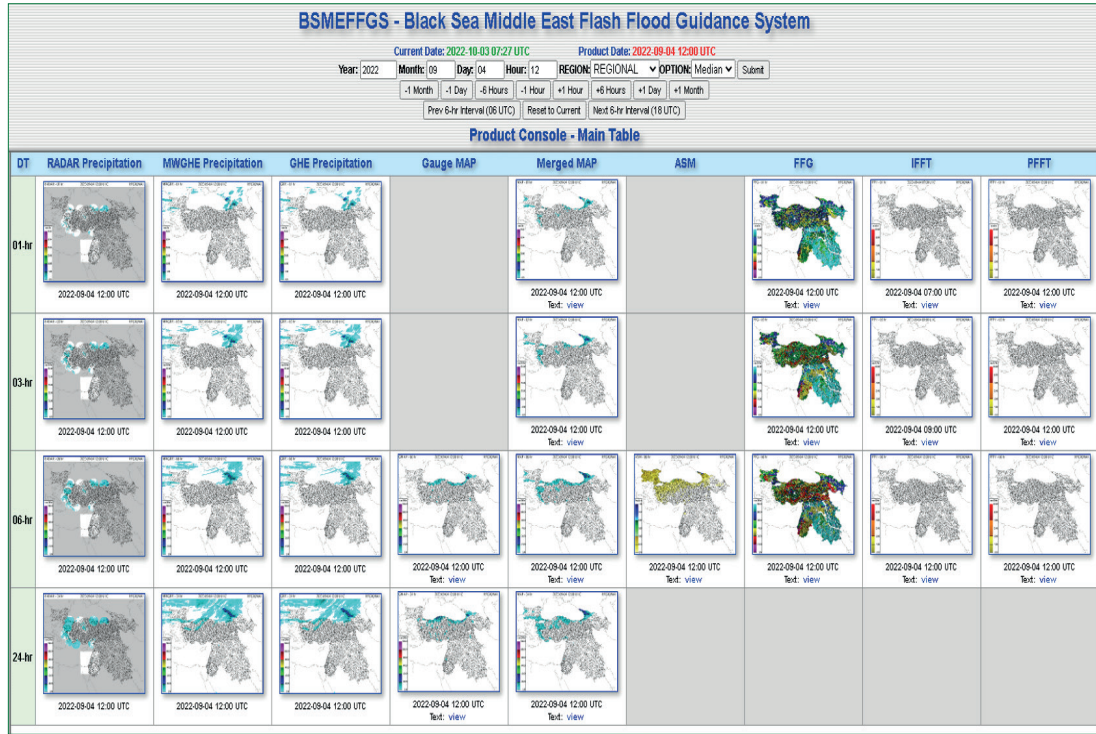
Renk Kodu	Uyarı Seviyesi
YEŞİL	Uyarı yapılmasını gerektiren meteorolojik hadise tahmin edilmemektedir.
SARI	Hava durumu potansiyel tehlikelidir.
TURUNCU	Hava durumu tehlikelidir.
KIRMIZI	Hava durumu çok tehlikelidir.

**Şekil 15. MeteoUYARI, Türkiye geneli ve İstanbul ilçelerine ait uyarılar**

5.2. Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi (Flash Flood Guidance, FFGS)

Ani taşkın, kısa süreli (6 saat ve daha az) ve göreceli olarak yüksek debiye sahip taşkınlardır (WMO, 2022). Ani taşkınlar çevresel ve sosyo-ekonomik zararlara neden olan, yılda 5.000'den fazla kişinin hayatını kaybettiği dünyanın en ölümcül doğal afetleri arasındadır. Taşkın türleri içerisinde ani taşkınlar en yüksek ölüm oranına sahip olanıdır ve %85'ini oluşturmaktadır. WMO tarafından ülke düzeyinde yapılan anket sonuçlarına göre 139 ülkeden 105'i ani taşkınların dünyadaki en önemli iki doğal afet arasında olduğunu bildirmektedir. Ülkemizde de en yaygın görülen meteorolojik karakterli doğal afetlerin başında sel ve taşkınlar gelmektedir; 2000'li yıllardan itibaren sel olaylarındaki artış daha bariz hale gelmiştir (MGM, 2020).

Şiddetli yağış bırakan konvektif sistemler, cephesel sistemler, ani kar erimeleri ve tropik fırtınalar ani taşkınlara neden olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2021) raporları iklim değişikliği ve değişkenliği sebebiyle kısa sürede şiddetli yağış bırakan fırtınaların bu yüzyılın sonuna kadar frekansı ve şiddetinin artacağını göstermektedir. WMO'nun yaptığı araştırmalara göre dünyadaki ulusal hidrometeoroloji teşkilatlarının bir kısmı ani taşkın erken uyarı sistemine sahip değildir ve söz konusu servislerinin kapasitelerinin artırılması gerekmektedir. Kapasite artırımı amacıyla WMO'nun 2007 yılında düzenlenen XV. kongresinde "Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemlerinin (FFGS)" dünya genelinde oluşturulması kararlaştırılmıştır (WMO, 2007). FFGS projesi WMO, Birleşik Devletler Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA), Hidrolojik Araştırma Merkezi (HRC) ve ABD Uluslararası Kalkınma Kurumu (USAID) iş birliği ile geliştirilmiştir. Şekil 16'da ani taşkın erken uyarı sistemleri global yoğunluk haritası görülmektedir.

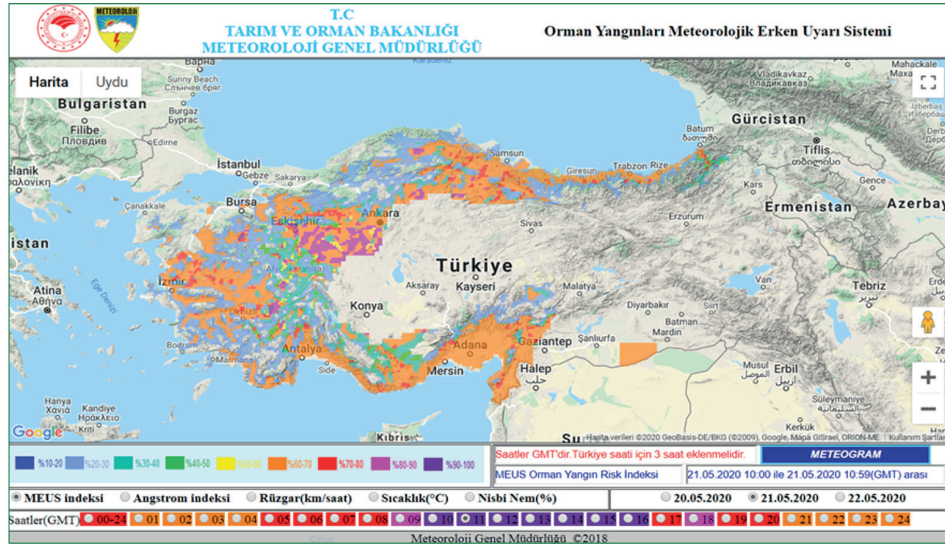


Şekil 17. Karadeniz ve Ortadoğu Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi arayüzü

5.3. Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS)

MGM özkaynakları kullanılarak geliştirilen Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS) ile orman yangını oluşması muhtemel bölgeler ve orman yangınlarının oluşma ihtimali olan zamanlar belirlenerek önlem alınmasının sağlanması hedeflenmiştir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından orman yangınları için önceden tedbir alınabilmesine yönelik, Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS) hazırlanmıştır. Sıcaklık, nem, rüzgâr gibi orman yangınları için önemli olan meteorolojik parametreler değerlendirilerek hazırlanan sistem karar vericiler için önemli bir yardımcıdır. Alaro sayısal hava tahmin modeli çıktılarını kullanan sistem 2018 yılında MGM uzmanları tarafından geliştirilmiştir. Türkiye coğrafyasında meydana gelmesi muhtemel orman yangınlarının 3 gün önceden tahmini kapsayacak şekilde saatlik olarak hazırlanan “Orman Yangını Tehlike Haritaları” Orman Genel Müdürlüğü ile operasyonel olarak paylaşılmaktadır. Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi arayüzü Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS)

6. Sonuç

Doğa kaynaklı afetlerin büyük bölümünü meteorolojik afetler oluşturmaktadır. Meteorolojik şartlar ile doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili olan doğa kaynaklı afetlerin tümü, meteorolojik afetler veya meteorolojik karakterli doğa kaynaklı afet olarak adlandırılır.

Büyük bir coğrafya ve farklı iklim bölgelerine sahip olan ülkemizde afetlere dönüşen çok sayıda ve türde şiddetli meteorolojik olaylar gözlenmektedir. Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı görülmektedir. Özellikle 2000'li yılların başından itibaren meteorolojik afetlerin oluşum sayılarında belirgin bir artış gözlemlenmektedir.

Ülkemizde ise en sık görülen meteorolojik karakterli doğal afetler; dolu, sel, taşkın, don, orman yangınları, kuraklık, şiddetli yağış, kuvvetli rüzgâr ve fırtına, yıldırım, çığ ve kuvvetli kardi.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan tahmin ve erken uyarılarla yetkililerin ve vatandaşlarımızın aldıkları önlemler sayesinde meteorolojik karakterli doğal afetlerin neden olabileceği can ve mal kayıplarının azaltılması mümkün olabilmektedir.

Kuvvetli meteorolojik olayların yol açacağı olumsuzlukların en aza indirilmesi ve ilgili kurumlar tarafından gerekli önlemlerin zamanında alınabilmesi amacıyla erken uyarılar hazırlanmakta olup bu uyarıların daha etkin bir şekilde vatandaşlara iletilmesi ve meteorolojik okuryazarlığın artırılmasına yönelik çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca kentlerin planlanmasında tüm paydaşlarca ekstrem meteorolojik eşik değerlerin kullanılması afetlerin olası etkilerini azaltmada önemli bir araç olacaktır.

7. Kaynaklar / References

- Anderson, E. A. (2006). *Snow accumulation and ablation model-SNOW-17*. US National Weather Service, Silver Spring, MD.
- Bartholmes, J. C., Thielen, J., Ramos, M. H., & Gentilini, S. (2009). The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 141–153. <https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009>
- Bocquet, M., Elbern, H., Eskes, H., Hirtl, M., Žabkar, R., Carmichael, G. R., Flemming, J., Inness, A., Pagowski, M., Pérez Camacho, J. L., Saide, P. E., San Jose, R., Sofiev, M., Vira, J., Baklanov, A., Carnevale, C., Grell, G., & Seigneur, C. (2015). Data assimilation in atmospheric chemistry models: Current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 5325–5358. <https://doi.org/10.5194/acp-15-5325-2015>
- Ernst, B., Oakleaf, B., Ahlstrom, M., Lange, M., Moehrlen, C., Lange, B., & Rohrig, K. (2007). Predicting the Wind. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(99), x5-78. <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.4317489>
- Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613–5623. <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>
- Georgakakos, K. P. (2006). Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1-2), 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.009>
- IPCC. (2021). *Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>
- K. Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 112–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.033>
- Kabaoğlu Hatice, UÇAR, E., & DURAN, F. (2020). Buzlanma Tahmini Yapan Mobil Uygulama Geliştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 24(4), 1543–1555. <https://doi.org/10.2339/politeknik.735408>
- Kadioğlu, M. (2008). *Sel, Heyelan ve Çığ İçin Risk Yönetimi*. <https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3941.pdf>
- Kadioğlu, M. (2012). *Türkiye’de İklim Değişikliği Risk Yönetimi*. Ankara, Türkiye. Türkiye’nin İklim Değişikliği II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını.
- Kim, S., Shen, H., Noh, S., Seo, D.-J., Welles, E., Pelgrim, E., Weerts, A., Lyons, E., & Philips, B. (2021). High-resolution modeling and prediction of urban floods using WRF-Hydro and data assimilation. *Journal of Hydrology*, 598, 126236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126236>
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., & Tovar-Pescador, J. (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, 86(8), 2200–2217. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.014>

- MGM. (2015). *Black Sea and Middle East Flash Flood Guidance System User Guide*. Ankara, Türkiye. Turkish State Meteorological Service.
- MGM. (2020). *2019 Yılı Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- MGM. (2022a). *2021 Yılı İklim Değerlendirmesi*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2021-iklim-raporu.pdf>
- MGM. (2022b). *2021 Yılı Yağış Değerlendirmesi*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/yagis-degerlendirme/2021yagisdegerlendirmesi.pdf>
- MGM. (2022c). *Türkiye Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi (2010-2021) Raporu*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- Min, M., Bai, C., Guo, J., Sun, F., Liu, C., Wang, F., Xu, H., Tang, S., Li, B., Di Di, Dong, L., & Li, J. (2019). Estimating Summertime Precipitation from Himawari-8 and Global Forecast System Based on Machine Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5), 2557–2570. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2874950>
- Palmer, T. N. (2012). Towards the probabilistic Earth-system simulator: A vision for the future of climate and weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(665), 841–861. <https://doi.org/10.1002/qj.1923>
- Reichle, R. H. (2008). Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in Water Resources*, 31(11), 1411–1418. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.01.001>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., & ... & Huang, X. Y. (2019). *A description of the advanced research WRF model version 4*. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:576/datastream/pdf/download/citation.pdf>
- Uzun, M., Babagiray, S., Akbaş, A. İ., Yorulmaz, Ö., Soylu, M., Yılmaz, Ö., & Altın, O. (Eds.) (2018). *Orman ve Su İşleri Bakanlığı bünyesinde kurulan Taşkın Tahmini ve Erken Uyarı Merkezi (TATUM) çalışmaları*. https://www.researchgate.net/profile/salihbabagiray/publication/343097787_orman_ve_su_isleri_bakanligi_bunyesinde_kurulan_taskin_tahmini_ve_erken_uyari_merkezi_tatum_calismalari/links/5f16963e299bffe548c8dd3d/orman-ve-su-isleri-bakanligi-buenyesinde-kurulan-taskin-tahmini-ve-erken-uyari-merkezi-tatum-calismalari.pdf
- WMO (Ed.) (2007). *Resolution 21 (Cg-XV). Strategy for the enhancement of cooperation between national meteorological and national hydrological services for improved flood forecasting*. Final Report of Fifteenth World Meteorological Congresses. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5225#page=212

- WMO. (2015). *Global Observing System*. <https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system>
- WMO. (2020). *2020 State of Climate Services Report*. WMO.
- WMO. (2022). *Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage*. World Meteorological Organization. <https://community.wmo.int/hydrology-and-water-resources/flash-flood-guidance-system-ffgs-global-coverage>
- Yang, F., Pan, H.-L., Krueger, S. K., Moorthi, S., & Lord, S. J. (2006). Evaluation of the NCEP Global Forecast System at the ARM SGP Site. *Monthly Weather Review*, 134(12), 3668–3690. <https://doi.org/10.1175/MWR3264.1>

Yazar Hakkında / About Author

**Dr. Hakan DOĞAN | Meteoroloji Genel Müdürlüğü |
hadogan[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0000-0003-3505-5864**

Dr. Hakan DOĞAN 1977 yılında doğdu. 1995 yılında Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesi'nden mezun olduktan sonra Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nde istidlalci olarak göreve başladı. 2000 yılında Çukurova Üniversitesi'nden Ziraat Mühendisi olarak mezun olan Dr. Hakan DOĞAN, 2004 yılında yüksek lisansını yaptı. 2016 yılında aynı üniversiteden doktora derecesini aldı. Ayrıca ileri hava tahminleri, orman yangınları ile mücadele, tarımsal meteoroloji, iklim değişikliği, sel ve kuraklık yönetimi ve kalite yönetim sistemleri konularında kısa süreli eğitimlere katıldı. Adana, Gaziantep ve Mersin'de mühendis, ekip şefi ve müdür olarak hizmetlerde bulunan Dr. Hakan DOĞAN halen Meteoroloji Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanı olarak görev yapmakta olup zirai meteorolojik uygulamalar ve uzaktan algılama sistemleri üzerine çalışmalar sürdürmektedir. İyi derecede İngilizce bilen Dr. Hakan DOĞAN evli ve iki çocuk babasıdır.

**Dr. Hakan DOĞAN | Turkish State Meteorological Service |
hadogan[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0000-0003-3505-5864**

Dr. Hakan DOĞAN was born in 1977. After graduating from Meteorological Technical High School in 1995, he started to work as an forecaster at Turkish State Meteorological Service. After graduating from Çukurova University as an Agricultural Engineer in 2000, Dr. Hakan DOĞAN completed his master degree in 2004. In 2016, he received his Ph.D. degree from the same university. He also attended short-term trainings on advanced weather forecasting, combating forest fires, agricultural meteorology, climate change, flood and drought management and quality management systems. Having served as an engineer, team chief and manager in Adana, Gaziantep and Mersin, Dr. Hakan DOĞAN still works as the Head of the Research Department of Turkish State Meteorological Service and continues to work on agricultural meteorological applications and remote sensing systems. Fluent in English, Dr. Hakan DOĞAN is married and has two children.

