

İsrail Tarafından Bombalanan İran Nükleer Tesislerinden Olası Sızıntıların Meteorolojik Verilere Göre Yayılım Bölgelerinin Tahmini

Rumeysa ZENGİN¹, Tuncay BAYRAM^{2*}, Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU³

Öz

Nükleer kazalar beraberinde çok ciddi çevresel felaketlere ve yaşamsal sorunlara yol açabilmektedir. Haziran 2025 tarihine kadar bilinen güncel nükleer kaza 11 Mart 2011'de Japonya'nın Fukushima Daiichi Nükleer Santralinde meydana gelen kazadır. Bu kaza tarihsel olarak en büyük nükleer kazalardan biri olarak kabul edilir. Bu tip kazalarda atmosferik hava olayları ile radyoaktif taşınım söz konusu olduğundan modelleme çalışmaları ile hava olaylarına bağlı olarak radyoaktif serpininin yayılım bölgelerinin belirlenmesi yaygındır. Bir diğer taraftan 13 Haziran 2025 tarihinde başlayan İsrail'in İran nükleer tesislerine yönelik bombalama olayları Türkiye kamuoyunda kaygı ile izlenmiştir. Bunun sebebi ise Türkiye ve İran'ın komşu ülkeler olması ve bazı İran nükleer tesislerinin ise Türkiye sınırını yakın sayılabilecek uzaklıkta olmasıdır. Bu çalışmada meteorolojik verilere dayalı olarak bombalama eyleminin gerçekleştiği tarihten itibaren 6 günlük sürede hava hareketleri incelenerek olası radyasyon yayılım bölgelerinin tahmini gerçekleştirilmiş ve detaylıca tartışılmıştır. Bu çalışma, Orta Doğu'da sınır ötesi nükleer kirlenme risklerinin değerlendirilmesi için ön bir model sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nükleer Sızıntı, İran, Atmosferik Hava Hareketleri, Radyasyon Risk Bölgeleri.

Prediction of Potential Radioactive Dispersion from Iranian Nuclear Facilities Bombed by Israel Using Meteorological Data

Abstract

Nuclear accidents can lead to severe environmental disasters and critical threats to human life. As of June 2025, the most recent major nuclear incident remains the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant disaster that occurred on March 11, 2011, in Japan. This incident is historically regarded as one of the most significant nuclear accidents. In such cases, atmospheric conditions play a crucial role in the transport of radioactive materials, and modeling studies are commonly employed to estimate the dispersion zones of radioactive fallout based on meteorological factors. On the other hand, the bombing of Iranian nuclear facilities by Israel, which began on June 13, 2025, has been a source of concern for the Turkish public. This concern stems from the geographical proximity between Turkey and Iran, and the fact that some Iranian nuclear facilities are located relatively close to the Turkish border. In this study, based on meteorological data, the atmospheric movement over the one-week period following the bombing incidents was analyzed and discussed to estimate potential radiation dispersion zones. This study provides a preliminary model for assessing cross-border nuclear contamination risks in the Middle East.

Keywords: Nuclear Leak, Iran, Atmospheric Air Movements, Radiation Risk Zones.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye, rumeysazengin999@gmail.com

^{2,3}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye, t.bayram@ktu.edu.tr bel@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Nükleer santrallerdeki normal operasyon süreçlerinde ve olası kazalarda, radyoaktif maddelerin çevreye yayılımı meydana gelir. Bu salınımlar, ekipman arızaları, doğal afetler (deprem veya sel gibi), insan hataları veya tasarım kusurları gibi çeşitli faktörler nedeniyle meydana gelebilir. Bir nükleer reaktörün arızalanması veya ciddi bir kaza geçirmesi, radyoaktif maddelerin sızmasına neden olabilir. Bu kaza ve sızıntılarda radyoaktif salınım için birincil yollar arasında hava yolu ile, su yolu ile ve toprak yolu ile kirlenmeler yer alır. Radyoaktif gazlar (^{133}Xe ve ^{131}I gibi) ve fisyon ürünü parçacıklar (^{134}Cs ve ^{137}Cs gibi), reaktör çekirdeğinin hasar görmesi veya yakıtın erimesi sırasında atmosfere (havadan salınım) salınabilir (Murray ve Holbert, 2015). Bu malzemeler daha sonra rüzgarın yönü ve yağış gibi meteorolojik koşullara bağlı olarak geniş alanlara yayılabilir. Soğutma sistemlerinden, kullanılmış yakıt havuzlarından veya diğer reaktör bileşenlerinden gelen kirlenmiş su sızabilir veya kasıtlı olarak salınabilir (su bazlı salınım). Bu su, radyoaktif izotopları nehirlere, göllere veya okyanuslara taşıyarak su ekosistemlerini etkileyebilir ve potansiyel olarak uzak yerlere ulaşabilir. Radyoaktif parçacıklar yere yerleşerek toprağın kirlenmesine neden olabilir. Bu durum tarımı, bitki örtüsünü ve yeraltı suyu kalitesini etkileyebilir (Bayram ve ark., 2020; WHO, 2011; Kusumi ve ark., 2023).

Radyoaktif maddelerin dağılım modellerini anlamak, potansiyel sağlık risklerini değerlendirmek için çok önemlidir. Hava dağılım modelleri, radyoaktif maddelerin ne kadar uzağa ve hangi yönlere yayılacağını belirler. Bu bilgi, etkilenen bölgelerde yaşayan insanların maruz kalma seviyelerinin tahmin edilmesine yardımcı olur. Farklı izotopların yarı ömürleri, bozunma modları ve biyolojik davranışları farklıdır. Bazı izotoplar (örneğin ^{131}I) çevrede kısa bir süre kalırken diğerleri (örneğin ^{137}Cs) yıllarca doğada kalır. Dağılım modellerini bilmek, hangi izotopların belirli bölgeleri ve popülasyonları etkileyeceğini tahmin etmemizi sağlar. Acil durum müdahale planları, koruyucu önlemlerin uygulanması için doğru dağılım modellemesine dayanır (TAEK, 2012). Potasyum iyodürün tahliye bölgeleri, barınması ve dağıtımı (radyoaktif iyodun tiroit tarafından alınmasını önlemek için) dağılım tahminlerine bağlıdır. Olası nükleer güç santrali kazalarına yönelik olarak meteorolojik veriler yardımı ile risk haritalarının oluşturulması ve radyasyon doz düzeylerinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiş çok sayıda bilimsel çalışma mevcuttur (Cao ve ark., 2016; Feyzinejad ve ark., 2018; Katata ve ark., 2014; Musauddin ve Kim, 2019; Vali ve ark., 2019; TAEK, 2012; Christoudias ve Lelieveld, 2013; Draxler ve ark., 2015).

Nükleer güç santralleri, yüksek enerji verimliliği sağlamak için kullanılsa da savaşlar ve kazalar gibi olağandışı durumlarda büyük çevresel ve insani tehditler yaratabilecek potansiyele sahiptir. Geçmişte meydana gelen Çernobil (1986) ve Fukuşima (2011) gibi büyük nükleer kazalar, radyoaktif maddelerin atmosfer aracılığıyla çok geniş alanlara yayılabileceğini açıkça göstermiştir (Nakajima

ve ark., 2019; ApSimon ve Wilson, 1987). Bu tür olaylarda, meteorolojik koşullar (rüzgar yönü ve hızı, basınç, sıcaklık, nem) radyoaktif salınımın yönü, yayılma mesafesi ve etkilediği alanlar üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, 13 Haziran 2025 tarihinde İsrail tarafından İran'daki nükleer tesislere yönelik gerçekleştirilen hava saldırıları nedeniyle konu yalnızca siyasi ve askeri yönleriyle değil aynı zamanda çevresel güvenlik açısından da uluslararası boyutta bir tehdit oluşturduğu söylenebilir (URL-1). İran'ın sınır komşuları arasında yer alan Türkiye, Orta Doğu, Güney Asya ve Kafkasya (Karadeniz ve Hazar denizi arasında yer alan, Avrupa ve Asya'nın sınırında bulunan bölge) gibi bölgelerin, bu tür olası bir radyoaktif sızıntıdan etkilenme potansiyeli oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Bu nedenle, olası bir sızıntı durumuna karşı radyoaktif parçacıkların atmosferik taşınımının modellenmesi, risk bölgelerinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Bu makalede, NOAA-Air Resources Laboratory (URL-2) tarafından geliştirilmiş olan HYSPLIT-Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (Stein ve ark., 2015) modellemesi kullanılarak, İran'daki önemli nükleer tesis noktaları (Bushehr, Natanz, Fordo, Arak, Isfahan, Saghand ve Yazd) temel alınarak oluşturulan radyoaktif salınımın yayılım yolları meteorolojik veriler ile simüle edilmiştir. 13 - 18 Haziran 2025 tarihleri arasındaki atmosferik veriler dayanılarak yapılan modellemelerle hava kütlesi hareketleri analiz edilmiş ve olası radyoaktif serpentinin ulaşabileceği bölgeler tahmin edilmiş ve tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu makalede, atmosferik hava kütlesi taşınımı ve olası radyoaktif salınım bölgelerini analiz etmek amacıyla NOAA tarafından geliştirilen HYSPLIT modellemesi kullanılmıştır. HYSPLIT modellemesi, Lagrangian ve Eulerian yaklaşımlarını birleşimi olan bir yöntemle çalışarak hava kütlelerinin ve parçacıkların atmosferdeki üç boyutlu hareketlerini simüle edebilmesine yardımcı olur. Bu özellik sayesinde model, ileri (forward) veya geri (backward) yönlü atmosferik modelleme hesaplamalarında kullanılmaktadır (Draxler ve Hess, 1988).

Yapılan modellemelerde her bir nükleer tesis için 25 m, 100 m ve 200 m'lik farklı yüksekliklerde başlatılan hava kütlelerinin 144 saat (6 gün) boyunca izlediği yollar analiz edilmiştir. Bu farklı yüksekliklerin seçimi saldırı sırasında kullanılan bombalardan kaynaklı oluşacak yüksek sıcaklıktaki havanın konveksiyon akımı ile yukarı yükselme potansiyelinden ileri gelmektedir. HYSPLIT, küresel ölçekte meteorolojik veri setleriyle (özellikle GDAS1 - Global Data Assimilation System) çalışarak; rüzgar yönü ve hızı, sıcaklık, nem ve basınç değişimlerini dikkate alarak parçacıkların atmosferdeki taşınımını hesaplamakta ve modellemeler oluşturarak radyoaktif salınımlar hakkında veri toplanmasına yardımcı olmaktadır. Modelleme çıktıları, harita tabanlı yörünge grafikleri ile zaman-yükseklik (irtifa) analizlerini de içermektedir.

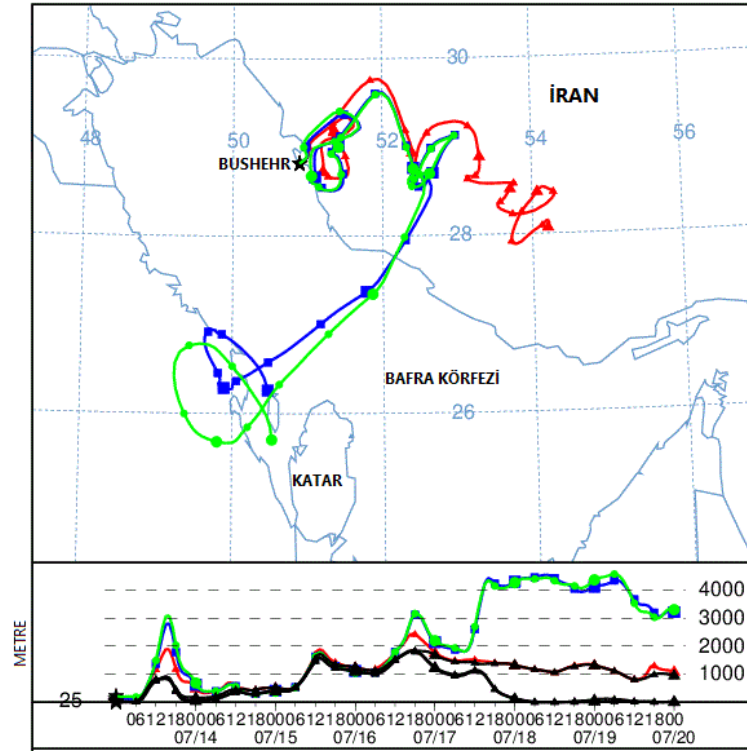
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada 13 Haziran tarihinde bombalanan İran'ın Bushehr Nükleer Güç Santrali, Natanz Uranyum Zenginleştirme Tesisi, Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi, Arak Ağır Su Reaktörü, Isfahan Nükleer Teknoloji Merkezi (ENTC), Saghand Uranyum Madeni ve Yazd Arakan Yakıt Üretim Tesisinde olası meydana gelebilecek radyoaktif salınımların 6 günlük coğrafik yayılımları modellenmiş ve bu radyoaktif yayılımların erişebileceği potansiyel bölgeler belirlenmiştir. Bunun için olası iki farklı senaryo dikkate alınmıştır. Birinci senaryo bombalama sırasında tek seferde radyoaktif salınımın gerçekleştiği varsayılmış, ikinci senaryoda ise 6 gün boyunca sürekli salınımın olduğu varsayılarak bu süre boyunca günlük salınımların coğrafik potansiyel yayılım bölgeleri belirlenerek birlikte değerlendirilmiştir. Söz konusu 7 nükleer tesis için olası sızıntı sonrası potansiyel radyoaktif salınım bölgeler aşağıda detaylıca tartışılmaktadır.

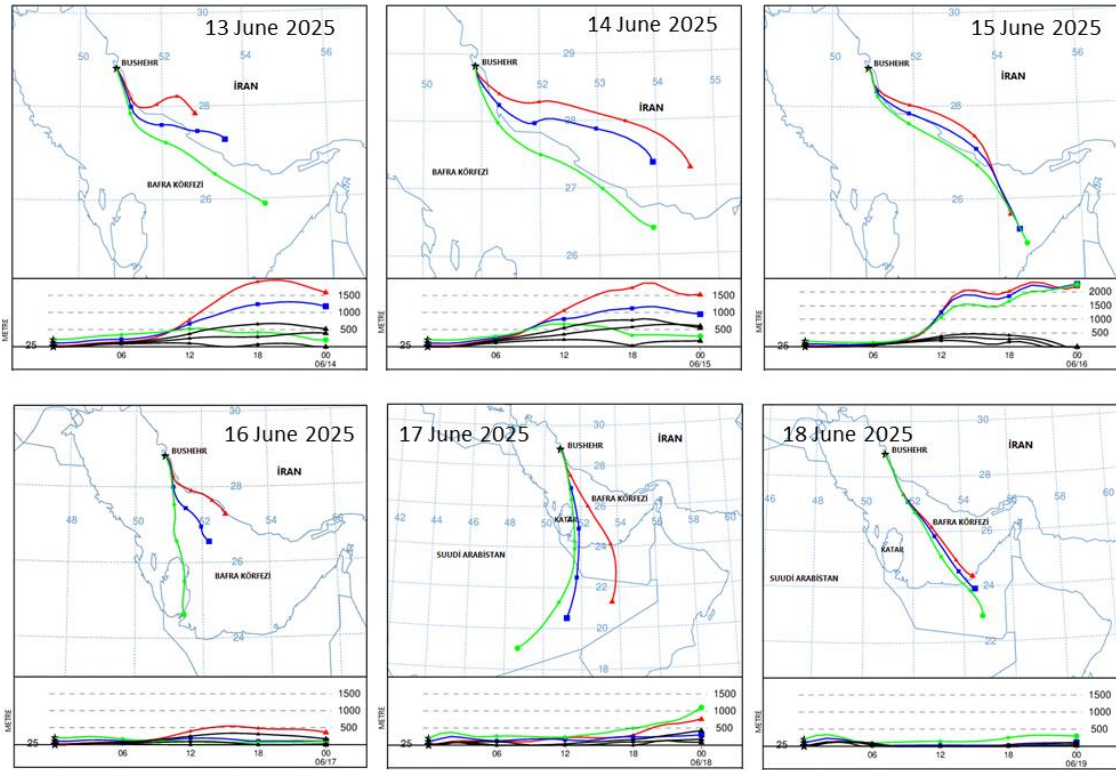
3.1. Bushehr Nükleer Güç Santrali Merkezli Atmosferik Yayılım

Şekil 1'de yer alan HYSPLIT modelleme haritası, 13 Haziran 2025 tarihinde İran'ın güneybatısında, Basra Körfezi kıyısında yer alan Bushehr kenti (28.83°N, 50.89°E) yakınlarında atmosfere salınan bir hava kütesinin 6 gün süresince atmosferde izlediği yolu göstermektedir. Modellemede, farklı yüksekliklerdeki (25 m, 100 m ve 200 m) hava akımlarının yönelimi analiz edilmiştir. Buradaki senaryo nükleer tesisin bombalama sırasında içeriğindeki tüm radyonüklidlerin çevreye yayılımını dikkate almakta olup farklı yüksekliklerin seçimi ise bombalama sonrasında oluşacak ısı nedeniyle ortaya çıkan konveksiyon akımı ile hava kütesinin yüksekliğe erişme olasılığından ileri gelmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, hava kütleleri doğuya ve güneye yönelmektedir. Doğuya yönelen kütleler İran'ın iç bölgelerine ilerlerken güneye yönelen hava kütlesi Basra Körfezini geçerek Suudi Arabistan kıyılarına kadar erişmektedir.

Bir diğer senaryo ise bombalama sonrası tüm radyonüklidlerin anlık dağılması yerine bir sızıntı şeklinde düzenli olarak havaya karışmasıdır. Bunun için 6 günlük hava kütlesi hareketleri birer günlük zaman aralıkları dikkate alınarak modellenmiştir. Bushehr Nükleer Güç Santrali konumu dikkate alınarak 13 Haziran 2025 tarihinden başlayarak 6 gün süreli günlük hava kütlesi hareketi modelleme sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilk üç gün boyunca farklı yükseklikteki hava kütle yönelimleri İran'ın Basra körfezi kıyıları boyunca uzanmaktadır. Diğer üç gün boyunca ise yönelimin güney yönlü olduğu görülmekte olup hava kütleleri Suudi Arabistan'ın Basra Körfezi kıyılarına kadar uzanmaktadır.



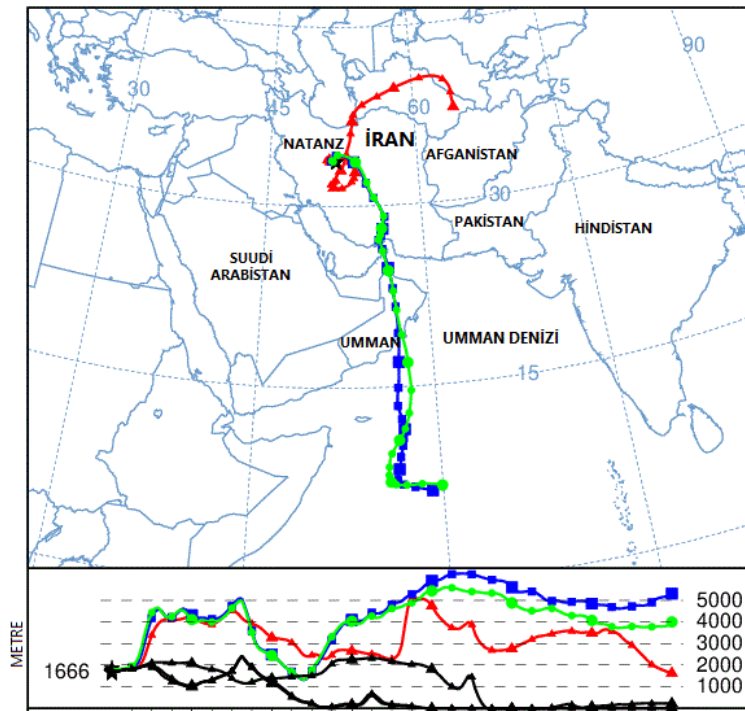
Şekil 1. Bushehr Nükleer Güç Santrali merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



Şekil 2. Bushehr Nükleer Güç Santrali merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

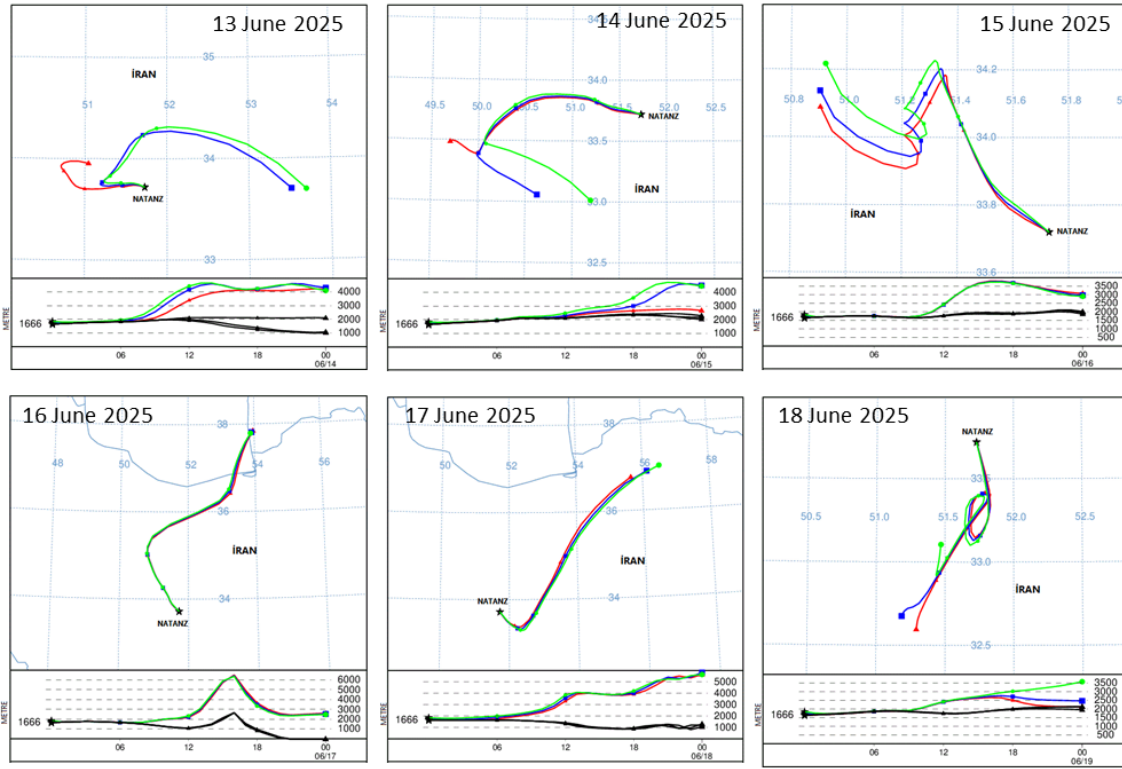
3.2. Natanz Uranyum Zenginleştirme Tesisi Merkezli Atmosferik Yayılım

Şekil 3'te, 13 Haziran 2025 tarihinde İran'ın orta-kuzey kesimlerinde, yaklaşık 33.72°N enlem ve 51.73°E boylamında bulunan Natanz Uranyum Zenginleştirme Tesisinden atmosfere salınan hava kütesinin 6 gün boyunca izlediği atmosferik hareketi göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 25 m yükseklik başlangıçlı hava kütesinin yaklaşık 4000 metreye kadar çıkarak önce kuzeye ve sonra doğuya yönelerek Afganistan sınırlarına kadar ulaşmaktadır. 100 m ve 200 m başlangıç yüksekliğine sahip hava kütlelerinin 5000 m yükseklik üstüne çıkarak Basra Körfezini geçerek Umman Denizine ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle, olası anlık bir nükleer salınımda yayılım yalnızca İran'la sınırlı kalmayıp, Afganistan, Basra Körfezi ve Umman Denizi gibi bölgelere de taşınarak yaygın radyasyon riski oluşturabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Natanz Uranyum Zenginleştirme Tesisi merkezli toplam 6 günlük hava kütesi hareketleri

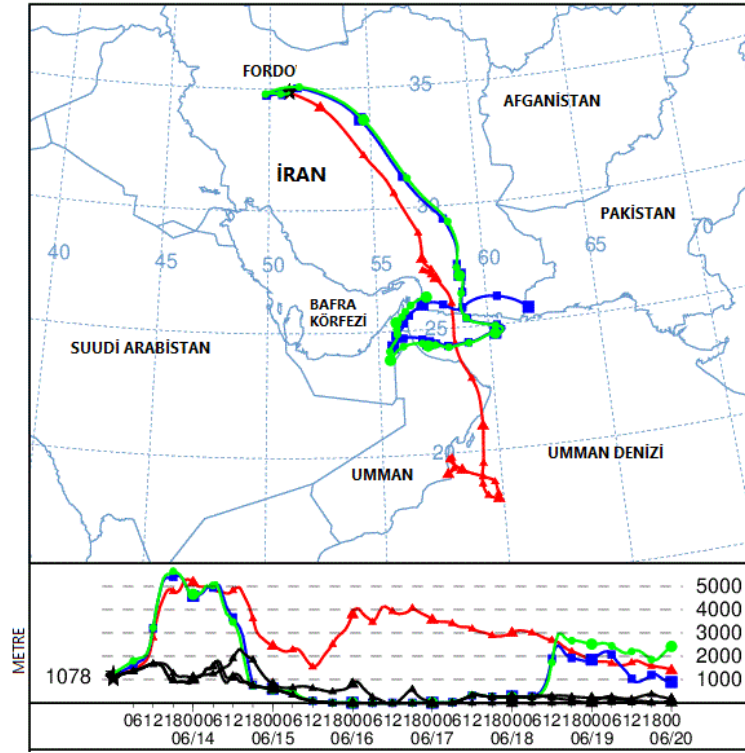
Natanz Tesisinin bombalama sonrası anlık salınım yerine sürekli radyoaktif sızıntı yapması senaryosu için 13 Haziran 2025 tarihinden başlayarak günlük hava kütleleri hareketleri 6 günlük periyod için modellenerek Şekil 4'te sunulmuştur. Şekle göre 13 - 18 Haziran 2025 tarihleri arasında batı, doğu ve kuzey yönünde hava hareketleri görülmekte olup ağırlıklı olarak yayılım İran'ın iç kesimlerinde dağılmaktadır. Böyle bir senaryo için en olası radyoaktif yayılımın İran'ın iç kesimlerinde ve geniş bir alana yayılması anlamında gelmektedir.



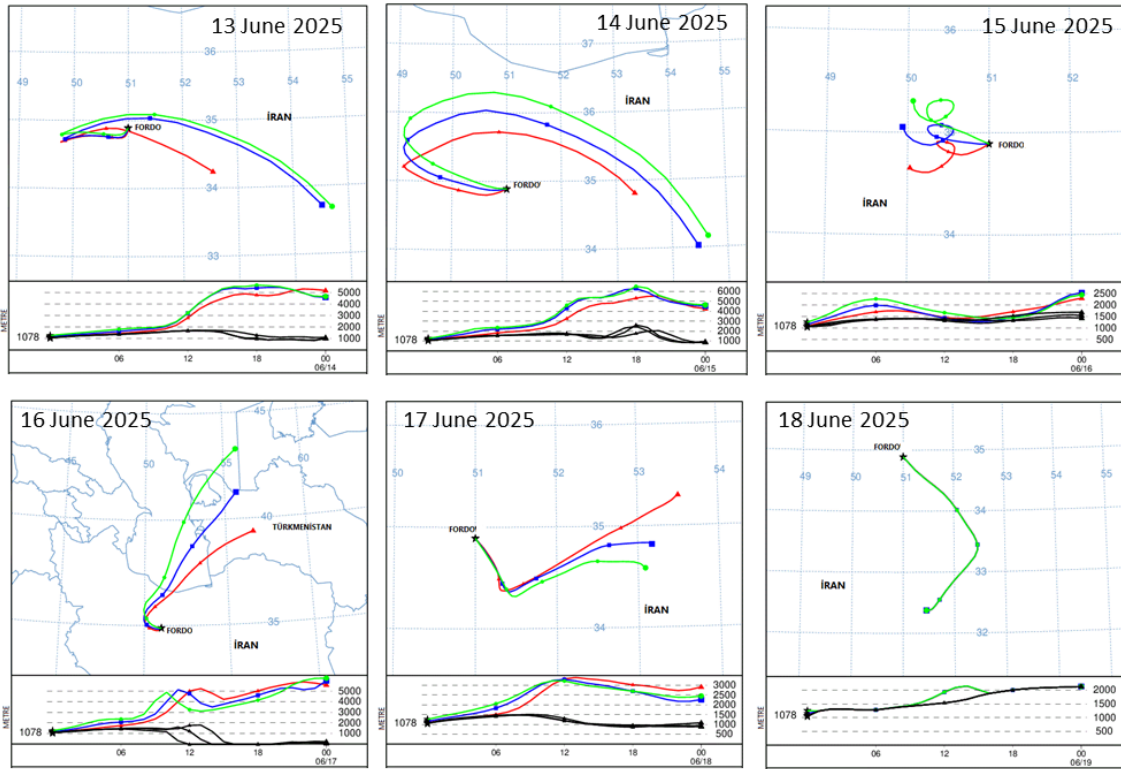
Şekil 4. Natanz Uranyum Zenginleştirme Tesisi merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

3.3. Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi Merkezli Atmosferik Yayılım

Şekil 5’te HYSPLIT modellemesi ile elde edilmiş 13 Haziran 2025 tarihinde İran’ın kuzeydoğusunda bulunan Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi yakınlarında, yaklaşık 34.89°N enlem ve 51.00°E boylamındaki bir noktadan atmosfere salınan hava kütlesinin 6 gün boyunca atmosferde izlediği yayılım gösterilmektedir. Modelleme, üç farklı başlangıç yüksekliğinde (25 m, 100 m ve 200 m) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hava kütleleri yaklaşık olarak 3000 metreye kadar yükselmiş ve İran içerisinden güneydoğuya yönelerek Basra Körfezi ve kıyılarına kadar erişmektedir. Radyoaktif yayılımın anlık olarak değil de düzenli bir sızıntı şeklinde olması senaryosu dikkate alınarak yapılan günlük hava kütlesi hareketleri modelleme sonuçları Şekil 6’da gösterilmektedir. 16 Haziran 2025 tarihi dışında diğer 5 günde farklı yönlerde hava kütlelerinin İran iç bölgelerine taşındığı, 16 Haziran 2025 tarihinde ise hava kütlelerinin kuzeye yönelerek Türkmenistan iç bölgelerine kadar eriştiği görülmektedir.



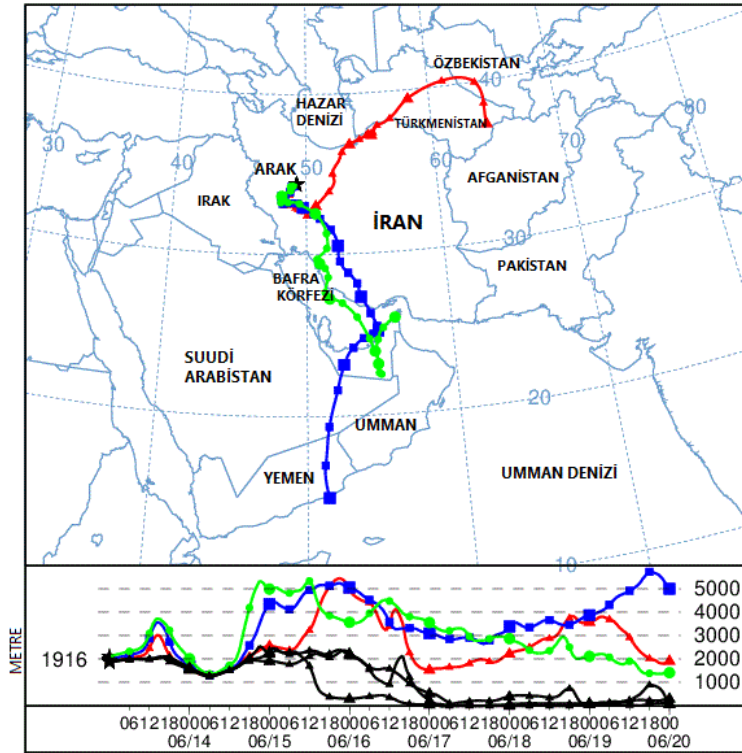
Şekil 5. Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



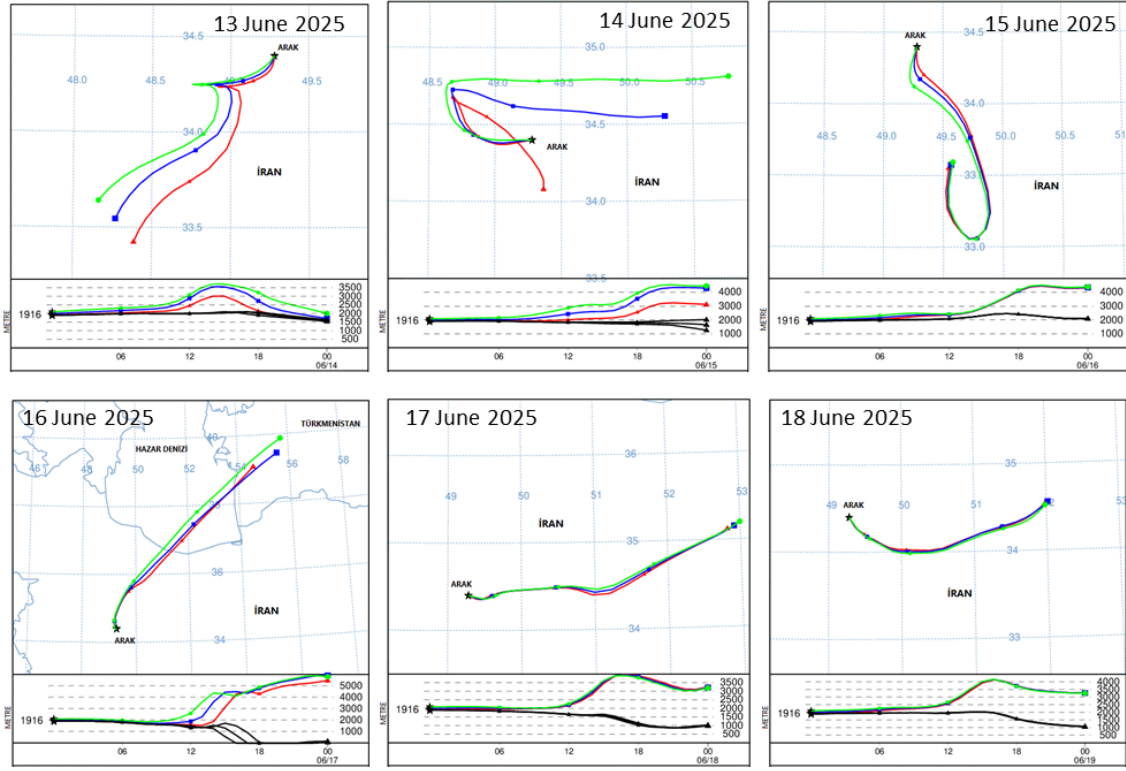
Şekil 6. Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

3.4. Arak Ağır Su Reaktörü (IR-40) Merkezli Atmosferik Yayılım

13 Haziran 2025 tarihinde saldırı düzenlenen ve İran'ın batısında yer alan Arak Ağır Su Reaktörü (IR-40) konumuna yakın, 34.40°N enlem ve 49.28°E boylamındaki bir noktadan atmosfere salınan hava kütesinin 6 gün boyunca izlediği atmosferik yayılım yolu Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere düşük yükseklikteki (25 m) hava kütleleri 5000 m irtifa üstüne çıkarak, kuzey-doğu istikametinde ilerleyerek Türkmenistan sınırlarına kadar erişmektedir. 100 m ve 200 m yükseklik başlangıçlı hava kütleleri ise güneye yönelerek Basra Körfezini geçerek Umman kıyılarına kadar erişmektedir. Arak Ağır Su Reaktörünün saldırı sonrası sürekli sızıntı yapması senaryosu için günlük atmosferik hava yayılım modelleme sonuçları ise Şekil 8'de gösterilmektedir. Fordo Yakıt Zenginleştirme Tesisi için yapılan günlük modelleme sonuçlarına paralel olarak Arak Ağır Su Reaktörü (IR-40) merkezli günlük atmosferik yayılımda da hava kütleleri 16 Haziran 2025'te kuzeye yayılarak Türkmenistan'a ulaşmakta diğer günler için ise farklı yönlerde İran içerisinde yayılım göstermektedir.



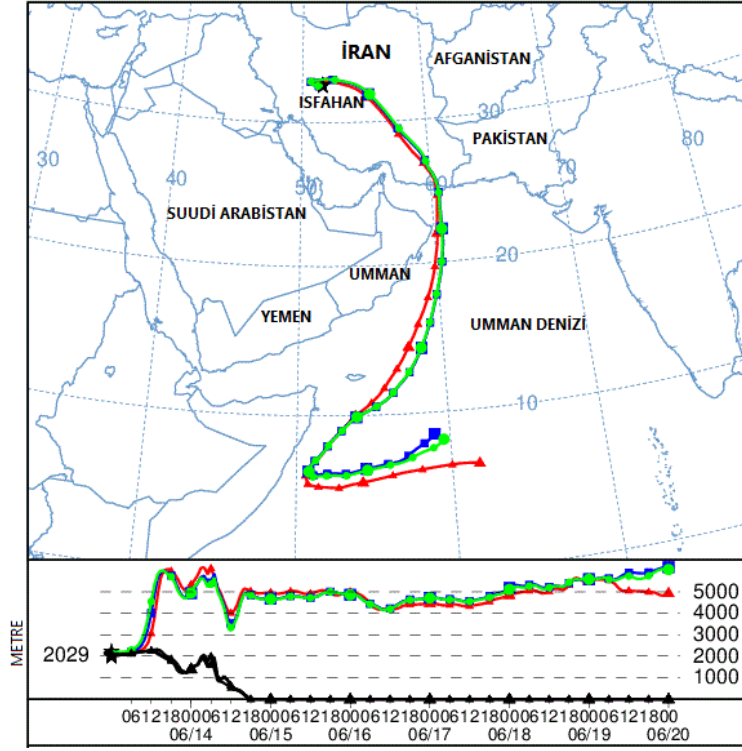
Şekil 7. Arak Ağır Su Reaktörü (IR-40) merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



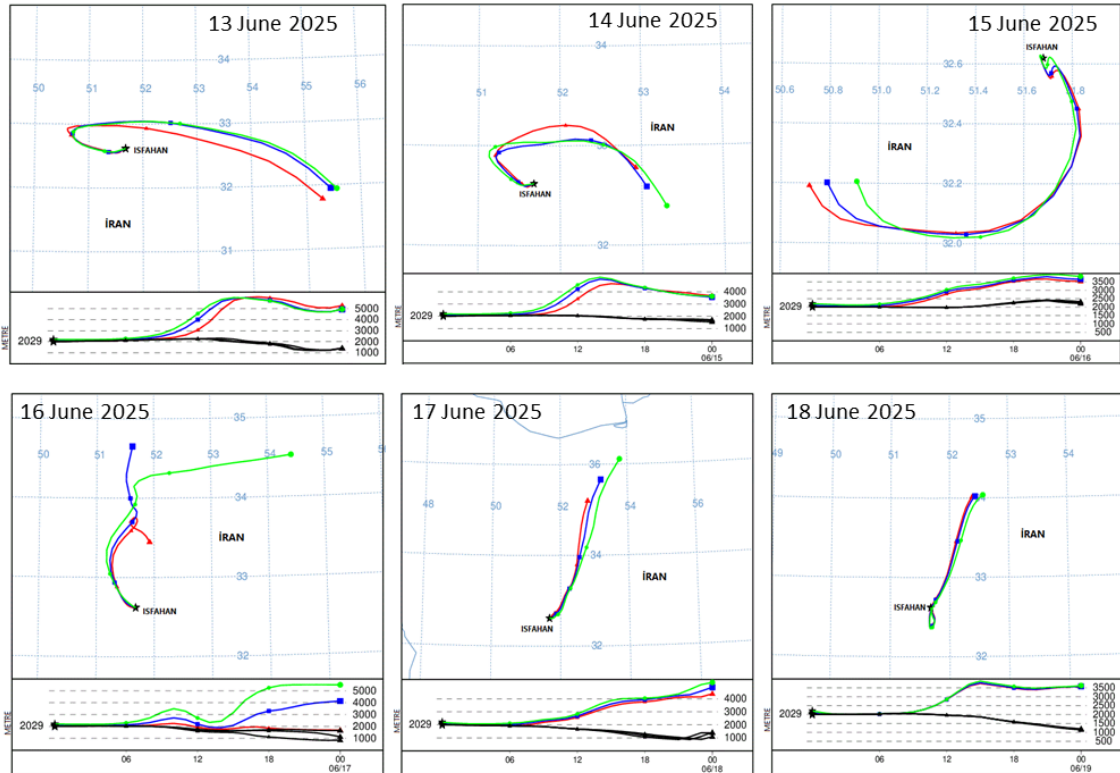
Şekil 8. Arak Ağır Su Reaktörü (IR-40) merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

3.5. Isfahan Nükleer Teknoloji Merkezi (ENTC) Merkezli Atmosferik Yayılım

32.62°N enlem ve 51.68°E boylamındaki ENTC'ye 13 Haziran 2025 tarihli yapılan saldırı sonrası 25 m, 100 m ve 200 m yükseklik başlangıçlı hava kütlelerinin yayılımı modellenmiş olup bu modelde anlık radyoaktif salınımın 6 gün boyunca eriştiği güzergah tahmin edilmiştir (Şekil 9). Modelleme sonucu her seviye başlangıç yüksekliğindeki hava kütlelerinin yüksek irtifa kazanarak İran'ın güneyinden Umman Denizine ulaştığı ve Umman Denzinin ortalarına kadar eriştiğini göstermektedir. Anlık radyoaktif salınım yerine sürekli sızıntı senaryosu için günlük hava hareketleri modellenmesi Şekil 10'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre radyoaktif yayılımın 100-200 km yarıçaplı alanda farklı yönlerde yayılacağını ve İran içlerinde kalacağı anlaşılmaktadır.



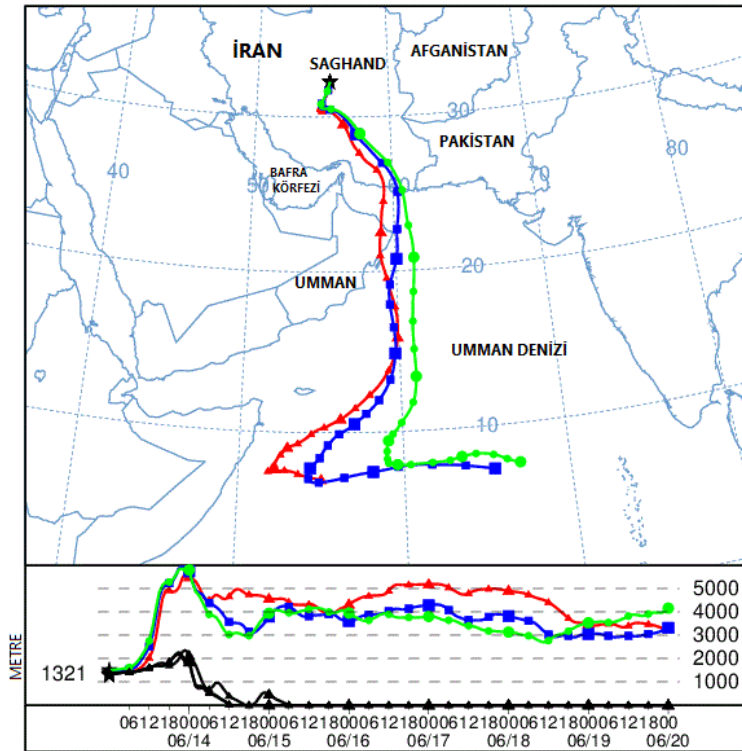
Şekil 9. ENTIC merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



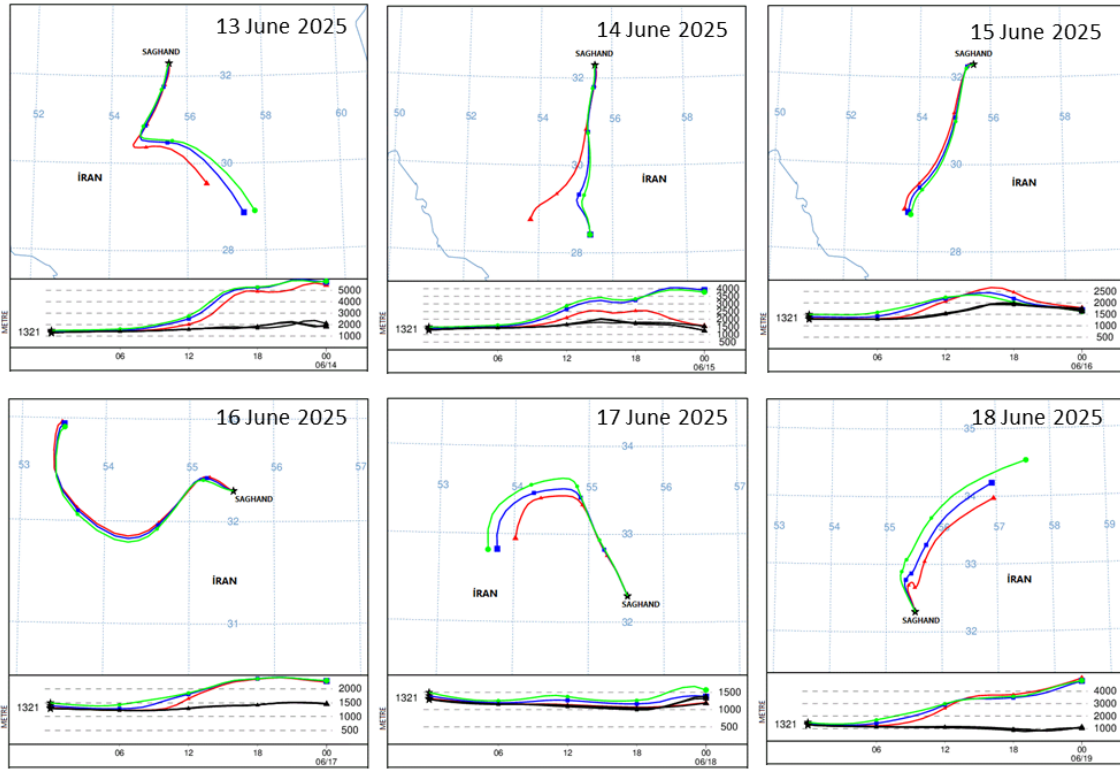
Şekil 10. ENTIC merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

3.6. Saghand Uranyum Madeni Merkezli Atmosferik Yayılım

Şekil 11’de gösterilen HYSPLIT modellemesi, 13 Haziran 2025 tarihinde İran’ın güneydoğusunda yer alan Saghand Uranyum Madeni yakınlarındaki 32.30°N enlem ve 55.52°E boylamındaki bir noktadan atmosfere salınan hava kütesinin, 6 gün boyunca atmosferde izlediği yayılım yolunu göstermektedir. Modelleme çalışması, 25 m, 100 m ve 200 m olmak üzere üç farklı başlangıç yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre, yüksek irtifaya ulaşan hava kütlesi yaklaşık 4000 metreye kadar yükselmiş ve güneye yönelerek Umman Denizi ve Arap Yarımadası’nın doğu kesimlerine kadar yayıldığı görülmektedir. Şeklin alt panelinde görüldüğü gibi, hava kütlelerinin 1000 ile 4000 metre arasında hareket ettiği ve bu sayede hem yüzeye yakın hem de orta irtifalarda etkili taşınımın mümkün olduğunu göstermektedir. Bu yayılım, olası bir anlık nükleer yayılımın yalnızca İran’la sınırlı kalmayacağını Arap Yarımadası coğrafyasında radyasyon riski oluşturabileceğini göstermektedir. Bir sızıntı durumu için aynı durum incelendiğinde radyoaktif yayılımın İran iç bölgeleri ile sınırlı kalacağı Şekil 12’den açıkça görülmektedir.



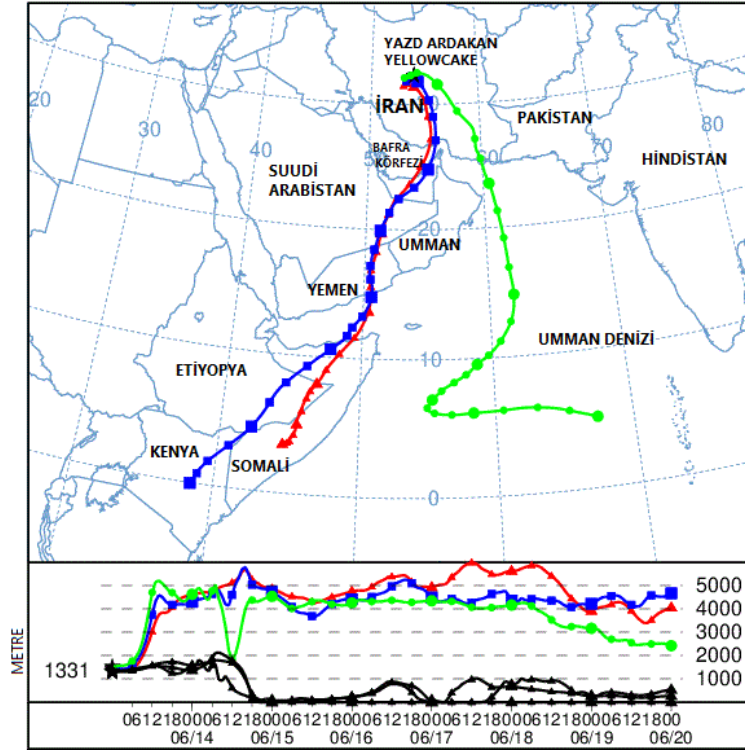
Şekil 11. Saghand Uranyum Madeni merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



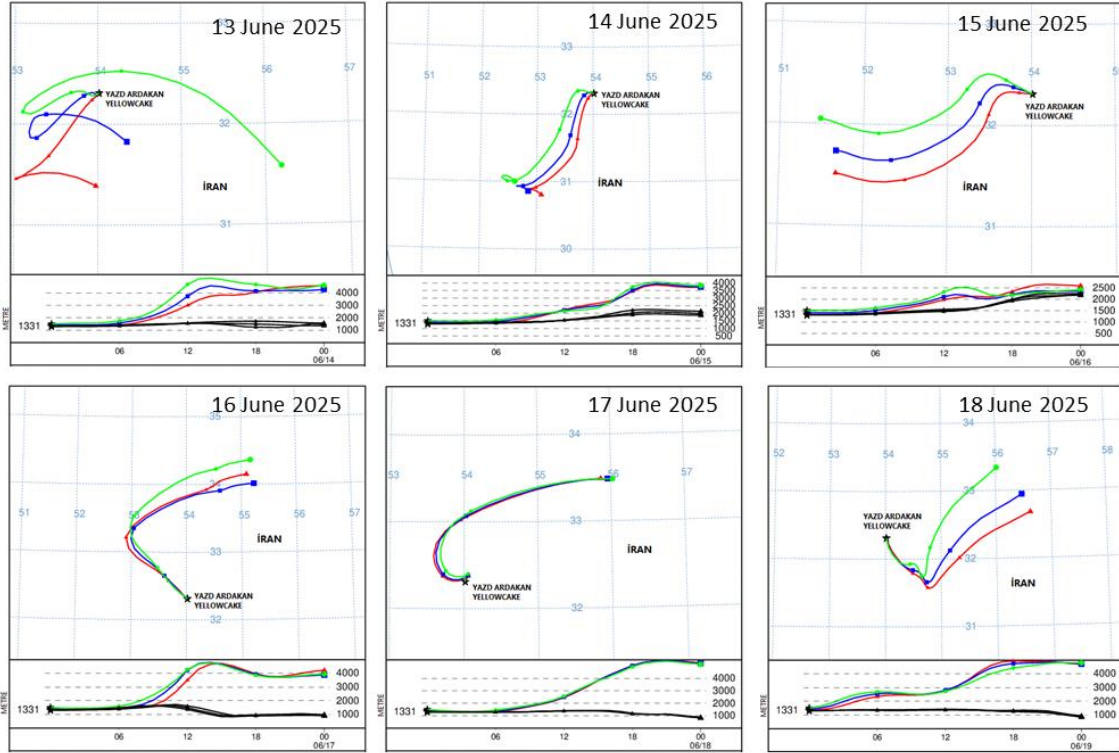
Şekil 12. Saghand Uranyum Madeni merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

3.7. Yazd Ardakan Üretim Tesisi Merkezli Atmosferik Yayılım

Yazd Ardakan Üretim Tesisi (32.31°N , 54.01°E) temel olarak nükleer enerji reaktörleri için sarıpasta (nükleer yakıt) üretimi yönünde faaliyet gösterdiği bilinmektedir. Bu tesise 13 Haziran 2025 tarihli yapılan saldırı sonrası bu tarih başlangıçlı atmosfere salınan hava kütlesinin, 6 gün boyunca atmosferde izlediği hareketi Şekil 13’te göstermektedir. Bu modelleme anlık toplu bir yayılımı dikkate almakta olup bu durumda ortaya çıkabilecek radyoaktif salınımın şekilden görüleceği üzere Arap Yarımadası ve Afrika ülkelerini kapsayacak şekilde oldukça geniş bir bölgede yayılabileceğini göstermektedir. Düzenli sızıntı olması durumunda ise radyoaktif kontaminasyonun 100-200 km yarıçaplı bir alanda İran iç bölgelerinde olacağı öngörülmektedir (Şekil 14).



Şekil 13. Yazd Ardakan Üretim Tesisi merkezli toplam 6 günlük hava kütlesi hareketleri



Şekil 14. Yazd Ardakan Üretim Tesisi merkezli günlük hava kütlesi hareketleri

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, 13 Haziran 2025 tarihinde İsrail tarafından İran'daki çeşitli nükleer tesislere gerçekleştirilen saldırıların ardından meydana gelmiş olabilecek olası radyoaktif salınımların atmosferik yayılımı meteorolojik verilere (rüzgar hızı ve yönü, nem, sıcaklık ve basınç) dayalı olarak HYSPLIT modellemesi ile incelenmiştir. Bushehr, Natanz, Fordo, Arak, Isfahan, Yazd ve Saghand gibi önemli nükleer tesis noktalarından başlatılan ileri yönlü (forward) hava kütlesi modellemeleri, farklı yüksekliklerdeki (25 m, 100 m ve 200 m) atmosferik yayılım senaryoları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın kapsayıcılığı açısından her bir nükleer tesis için iki farklı senaryo dikkate alınmıştır. Bu senaryolardan ilki anlık tüm nükleer içeriğin (radyoizotopların) havaya karışması şeklinde olup 6 gün boyunca hava kütlesi ile hangi bölgelere taşınabileceği tahmin edilmiştir. İkinci senaryoda ise radyoaktif salınının bir sızıntı şeklinde gerçekleştiği varsayımına dayanarak ulaşabileceği noktaların kestirilmesidir.

Modelleme sonuçlarına göre Bushehr, Natanz, Fordo, Arak, Isfahan, Yazd ve Saghand tesislerinde sızıntı şeklinde gerçekleşebilecek radyoaktif salınımların hava kütlesi ile birlikte 100-200 km yarıçaplı bir alanda yayılacağı ve İran'ın iç bölgeleri (Tesisin konumuna bağlı olarak Türkmenistan ve Suudi Arabistan sınırlarına da ulaşabileceği) ile sınırlı kalacağı tahmin edilmiştir. Bunun aksine ilgili nükleer tesislerden anlık salınım durumunda ise radyoaktif yayılımların Türkmenistan, Umman, Yemen, Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri ve bazı Afrika ülkelerine kadar erişebildiği ve Basra Körfezi civarında yoğunlaşabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Yukarıda bahsedilen ve farklı senaryolara göre çalışılan olası radyoaktif kirliliklerin tespiti için yerinde deneysel incelemeler gerekmektedir. Elde edilen model sonuçları insan sağlığı ve tarımsal etkiler açısından geniş bir bölgede radyasyon riski olabileceğini göstermektedir. Olayın siyasi ve askeri nedenlerinden ötürü İran iç bölgelerinde spektroskopik tekniklerle bu incelemelerin yapılmasının zor olduğu anlaşılmakla birlikte Umman ve Birleşik Arap Emirliklerinin Basra Körfezine kıyı kesimlerinden alınacak ölçümlerin anlamlı olacağı değerlendirilmektedir.

Yapılan bu modelleme çalışması, olası bir nükleer kazanın ya da saldırının yalnızca bir ülkeyi değil, yakın çevredeki ülkeler içinde ciddi çevresel riskler ve insan sağlığı tehditleri barındırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bölgesel düzeyde kurulacak erken uyarı sistemleri, atmosferik izleme sistemleri ve acil durum planlamaları büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 16011.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Etik ve Güvenlik Notu

Bu çalışma yalnızca bilimsel modelleme amaçlıdır.

Kaynaklar

- ApSimon, H.M., Wilson, J.J.N., (1987). Modelling atmospheric dispersal of the Chernobyl release across Europe. *Boundary-Layer Meteorol*, 41, 123–133.
- Bayram, T., Zayachuk, Y. ve Gupta, D. K. (2020). *Environmental Radioactivity in Turkish Environment*. Sivas: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.
- Cao, B., Zheng, J., Chen, Y., (2016). Radiation Dose Calculations for a Hypothetical Accident in Xianning Nuclear Power Plant. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 3105878.
- Christoudias, T. ve Lelieveld, J. (2013). Modelling the global atmospheric transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1425–1438.
- Draxler, R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., Leadbetter, S., Malo, A., Maurer, C., Rolph, G., Saito, K., Servranckx, R., Shimbori, T., Solazzo, E., Wotawa, G., (2015) World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J Environ Radioact*. 139, 172-184.
- Draxler, R.R., ve Hess, G.D., (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, 295-308.
- Feyzinejad, M., Malakooti, H., Sadrinasab, M., Ghader, S., Yagi, D., (2018). Simulation of atmospheric dispersion and dose assessment by a coupled WRF-HYSPLIT model for Bushehr power plant. *Iranian Journal of Geophysics*, 12, 19-50.
- Katata, G., Chino, M., Kobayashi, T. vd., (2014). Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 14, 14725-14832.
- Kusumi, T., Miura, A., Ogura, K., Nishikawa, K., (2023). Attitudes toward possible food radiation contamination following the Fukushima nuclear accident: a nine-year, ten-wave panel survey. *Journal of Risk Research*, 26, 502-523.
- Murray, R. ve Holbert, K. E. (2015). *An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*. New York: Butterworth-Heinemann.
- Musaaddin, A. ve Kim, J. (2019). Offsite Radiological Consequence Analysis of Hypothetical Accidents for APR1400. *Journal of Radiation Industry*, 13(2), 147-155.

- Nakajima, T., Ohara, T., Uematsu, M., Onda Y., (2019). *Diffusion in the Atmosphere. In: Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned*. Cambridge: Cambridge Environmental Chemistry Series.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., ve Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077.
- TAEK, (2012). *Ermenistan'daki Metsamor nükleer santralinde meydana gelebilecek kaza sonrası doz seviyeleri için acil koruyucu önlemlerin belirlenmesi*. Ankara: TAEK.
- URL-1: https://ceobs.org/the-emerging-environmental-consequences-of-the-israel-iran-war/?utm_source=chatgpt.com (Erişim Tarihi: 5 Ağustos 2025).
- URL-2: <https://www.noaa.gov/> (Erişim Tarihi: 5 Ağustos 2025).
- Vali, R., Adelikhah, M. E., Feghhi, S. A. H., Noorikalkhoran, O., Ahangari, R., (2019). Simulation of radionuclide atmospheric dispersion and dose assessment for inhabitants of Tehran province after a hypothetical accident of the Tehran Research Reactor. *Radiat. Environ. Biophys.* 58(1), 119-128.
- WHO, (2011). *Nuclear accidents and radioactive contamination of foods*. <https://www.who.int/publications/m/item/nuclear-accidents-and-radioactive-contamination-of-foods> (Erişim Tarihi: 2 Ağustos 2025).