

**Atf İçin:** Baran, B., Keleş, C. ve Alagöz, B.B. (2024). Enerji Denge Modeli Bağlamında Küresel Isınma ve İklim Değişikliği Sorunlarının İncelenmesi: Dünya Enerji Bütçesi ve Radyatif Zorlama Kavramları. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(3), 1075-1093.

**To Cite:** Baran, B., Keleş, C. & Alagöz, B.B. (2024). A Review of Global Warming and Climate Change Problems in the Context of Energy Balance Model: Concepts of World Energy Budget and Radiative Forcing. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(3), 1075-1093.

## **Enerji Denge Modeli Bağlamında Küresel Isınma ve İklim Değişikliği Sorunlarının İncelenmesi: Dünya Enerji Bütçesi ve Radyatif Zorlama Kavramları**

Burhan BARAN<sup>1\*</sup>, Cemal KELEŞ<sup>2</sup>, Barış Baykant ALAGÖZ<sup>3</sup>

### **Öne Çıkanlar:**

- İklim modelleri ile küresel ısınma ve iklim değişimi analizleri
- Enerji denge modeli basitleştirilmiş analizler sağlar
- İklim değişimi konusunda temel modelleri inceler

### **Anahtar Kelimeler:**

- İklim modeli
- Küresel ısınma
- Dünya enerji bütçesi
- Radyatif zorlama
- Albedo

### **ÖZET:**

İklim modelleri, küresel ısınma ve iklim değişimi konularında elde edilen verilerin analizi ile iklim değişimlerinin yakın zamanlı gelişimi konusunda tahminlere olanak tanır. Bu çalışmada, küresel ısınma ve iklim değişimi konularında kullanılan enerji denge modelinin temelleri ve bu model yardımı ile yapılabilen analizler incelenmektedir. Bu basitleştirilmiş enerji denge modeli, güneşten dünyaya gelen ışıma enerjisinin dünyadan uzaya giden ışıma enerjisi ile dengelenmesi durumunu inceler. Bu bağlamda, küresel ısınmaya etki eden faktörlerin, denge durumu üzerinde etkisi olan birer radyatif (ışımmsal) zorlama olarak incelenmesine imkân sağlar. Böylece çok karmaşık ve dinamik olarak değişen meteorolojik ve jeolojik etmenlere bağlı olan iklim değişiminin, enerji bütçesi temelinde basitleştirilmiş analizlerini mümkün kılar. Bu çalışmada, Stefan-Boltzmann ve Wien Yer Değiştirme gibi temel ışıma kanunları çerçevesinde, güneşten gelen ışıma enerjisinin dünya tarafından emilim ve yansıma oranları dünya atmosferinden uzaya enerji çıkışını sağlayan ve elektromanyetik spektrumun uzun dalga boyunda yer alan atmosferik pencere kavramları incelenmiştir. Bu çerçevede, insan aktiviteleri ile değişebilme potansiyeli olan Albedo (yansıtılabilirlik) radyatif zorlaması ve atmosferdeki CO<sub>2</sub> molekülü birikimine bağlı radyatif zorlama etkileri açıklanmıştır. Sunulan temel kavramlar ve modellerin kolay anlaşılabilir olması için açıklayıcı örnekler ve verilere bağlı hesaplama ve analizler sunulmuştur. Bu makalenin küresel ısınma ve iklim değişimi konularında bazı temel kavramların açıklandığı eğitsel bir kaynak niteliği taşıması amaçlanmıştır.

## **A Review of Global Warming and Climate Change Problems in the Context of Energy Balance Model: Concepts of World Energy Budget and Radiative Forcing**

### **Highlights:**

- Global warming and climate change analyzes with climate models
- Energy balance model provides simplified analysis
- Examines basic models of climate change

### **Keywords:**

- Climate model
- Global warming
- World energy budget
- Radiative forcing
- Albedo

### **ABSTRACT:**

Climate models enable an analysis of observation data related to global warming and climate changes, and they allow making predictions for near the future progress of climate changes. In this study, basics of the climate model, which is used in the analysis of global warming and climate change topics, and the analyses that can be carried out by using these models, are reviewed. Simplified energy balance model considers the balance state between the incoming solar energy from the sun and the radiation energy outgoing from the earth to space. In this perspective, the model allows considering the factors, which can influence global warming, as radiative forces that are acting on the balance state. Thus enabling simplified analyzes of climate changes based on the energy budget even though the climate changes depend on very complex and dynamically changing meteorological and geological factors. In this study, within the framework of basic radiation laws, such as Stefan-Boltzmann and Wien Displacement, the absorption and reflection rates of the solar radiation by the earth, and the atmospheric window concepts, which provide energy escape from the earth's atmosphere to the space within the long-wavelength of the electromagnetic spectrum, were reviewed. In this context, the radiative forcing due to the Albedo effect and the radiative forcing effects due to the accumulation of CO<sub>2</sub> molecules in the atmosphere, which have the potential to alter depending on human activities, were explained. Illustrative examples and observation data-based calculations and analyzes are presented to make basic concepts and presented models easy-to-understand. This article is intended to be a tutorial that explains some basic concepts on the topics of global warming and climate change.

<sup>1</sup> Burhan BARAN (Orcid ID: 000-0001-6394-412X), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> Cemal KELEŞ (Orcid ID: 0000-0002-6818-7970), İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup> Barış Baykant ALAGÖZ (Orcid ID: 0000-0001-5238-6433), İnönü Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Burhan BARAN, e-mail: burhanbaran@gmail.com

## GİRİŞ

Dünya enerji bütçesi, güneşten yeryüzüne gelen enerji ile yeryüzünden uzaya doğru yayılan kızılötesi radyasyon arasındaki denge durumudur. Hidrojen ve helyum güneşin yapısında büyük miktarda bulunan temel gazlardır. Helyumun, hidrojen atomlarının birleşimi ile oluşum sürecinde yüksek miktarda enerji açığa çıkmakta ve bu enerjinin bir kısmı ışımaya enerjisi olarak güneşten uzaya yayılmaktadır. Dünyanın güneş etrafında elips benzeri yörüngesi nedeni ile dünyaya gelen güneş enerjisi yıl içinde değişim gösterir. Güneş'ten çıkan enerjinin 2.2 milyarda 1'inin yeryüzüne düşmesi beklenir. Dünyaya gelen enerji ise saniyede yaklaşık  $4 \times 10^{26}$  joule değerlerine ulaştığı tahmin edilir. Güneş ile dünya arasındaki mesafe yörünge geometrisi nedeni ile yıl boyunca değişmektedir. Birim alana bir anda gelen güneş ışınımının değeri sabit değildir. Bu sebeple ortalama güneş ışınması değeri hesaplamalarda tercih edilir. Güneş sabiti olarak adlandırılan bu değer  $1367 \text{ W/m}^2$  olarak belirlenmiştir (Güler ve ark., 2020).

Yeryüzünü ısıtan güneş enerjisi büyük oranda güneşten gelen kısa dalga boylu ışınlar oluşturur. Yeryüzü ısındıkça termal ışımaya (termal radyasyon) yolu ile enerji yaymaktadır. Bu dünyanın enerji kaybını sağlayan ısı transfer yöntemidir. Ancak, ısınan yeryüzünün sıcaklığı düşük olduğundan yeryüzünden uzaya yönelen radyasyon uzun dalga boyunda gerçekleşmektedir. (NASA gezegen gözlemlerine göre güneş sisteminde dünyanın ortalama yüzey sıcaklığı  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğu kabul edilir). Bu nedenle, dünyanın kısa dalga boyunda güneş ışınları ile güneş tarafından ısındığı ve uzun dalga boyunda termal radyasyonla ile soğuduğu kabul gören bir görüştür. Atmosferdeki su buharı ve karbondioksit gazı yeryüzünden uzaya giden radyasyonun önemli bir kısmını tutarlar. Buna bağlı olarak söz konusu bu gazlar atmosferin ısınmasına yol açarlar. Isınan atmosferden yayılan termal radyasyonun bir kısmı ise tekrar yeryüzüne yönelir. Böylece dünya yüzeyi ısınan atmosferden aldığı ışınlarla ısısını muhafaza eder. Bu süreç dünyaya ulaşan enerjisinin 'sera gazları' olarak bilinen moleküller tarafından (su molekülleri,  $\text{CO}_2$  gibi) dünya yüzeyinin yakınında hapsedilmesi ve yüzey ısısının artışı olarak açıklanır (Anonim, 2024 r). Sera gazlarının artışı ile ilişkili olarak radyatif zorlama da artar. Bu durum dünyanın ortalama sıcaklığını artırır ve iklim değişikliklerine yol açar. Dolayısıyla radyatif zorlama ve dünya enerji bütçesi konularının anlaşılması küresel ısınma ve iklim değişikliği ile ilgili gözlemlerin yorumlanması ve mücadele stratejilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayacaktır.

Bu makalenin amacı, enerji denge modeli çerçevesinde küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarının ele alınması ve literatürde öne çıkan temel yöntemlerin tanıtılmasıdır. Bu nedenle bu inceleme makalesinin küresel ısınma ve iklim değişikliği konusuna giriş yapmak isteyen okuyucular için bir eğitsel doküman ve temel bir kaynak olması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, çalışmada radyatif zorlama ve dünya enerji bütçesi kavramları incelenmiştir. Bu kapsamda bilinmesi gereken temel yasalar ele alınmış ve örnekler ile açıklanmıştır. Bu çalışma, önemi ve etkileri giderek artan küresel ısınma ve iklim değişimi konusuna yeni başlayan ve bazı temel kavramların farkına varmak isteyen okuyucular için eğitsel bir kaynak ve başlangıç dokümanı olması amacı ile hazırlanmıştır. Bu konuda, Türkçe literatüründe yeterli miktarda eğitsel makale bulunmamaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda çalışmaya başlayacak olacak araştırmacılar ve bu konularda çalışan kuruluşlar için faydalı bir temel kaynak olabilir.

Bir sonraki bölümde dünya enerji bütçesi, atmosferik pencere, albedo etkisi, radyatif zorlama, global sıcaklık anomalisi gibi temel kavramlar enerji denge modeli kapsamında açıklanmakta ve bazı örnek hesaplamalar sunulmaktadır. Daha sonra ise absorbe edilen (emilen) güneş radyasyonu (Absorbed Solar Radiation-ASR) ve giden uzun dalga radyasyonu (Outgoing Longwave Radiation-

OLR) değerlerinin denkleğinin önemi, karbondioksit kaynaklı radyatif zorlama ve albedo radyatif zorlama konuları incelenmiştir.

## TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK GERİ PLAN

Uzay boşluğu gibi vakum ortamlarda enerji iletimi elektromanyetik dalga yayılımı yardımı ile gerçekleşir. Isınan bir cisim vakum ortamında termal ışınım (radyasyon) yolu ile enerjisini elektromanyetik dalga olarak boşlukta yayabilir. Dünya gibi gezegenler yüzey ısısını, yüzey sıcaklığına karşılık gelen dalga boylarında ışınım ile uzay boşluğuna iletirler. Bu dünyanın güneşten gelen enerji ile sürekli ısınmasını ve yüzey sıcaklığının sürekli artışıını önler. Bu konuda iki temel yasa olan Stefan-Boltzmann kanunu ve Wien yer değıştirme kanunu önem kazanır. Ayrıca, termal radyasyon için Kirchhoff kanunu ve Planck yasası gibi temel fizik yasalarının da bilinmesi faydalı olur. Bu bölümde, bu temel ışınım yasalarına kısaca değinilmektedir.

### Stefan-Boltzmann Kanunu

Sıcaklığı mutlak sıfırın (-273.15 °C) üzerindeki her cisim elektromanyetik ışınım yolu enerji transfer eder. Bu tür ısı transferleri termal ışınım (termal radyasyon) yayılımı ile gerçekleşir. Yayılan enerjinin miktarı yüzey sıcaklığına bağlıdır ve siyah cisimler için Stefan-Boltzmann kanunu ile açıklanır. Siyah cisim, dalga boyu ve ışınım yönüne bağlı olmaksızın söz konusu bu cisme gelen bütün radyasyonun tamamını absorbe eden (soğurabilirliği 1 değeriinde) ve termal radyasyonunu her yönde maksimum düzeyde yayabilen ideal bir yüzeydir.

Güneşin merkezinde bir saniyede 564 milyon ton hidrojen 560 milyon ton helyuma dönüşür. Uzaya yayılan ışınım enerjisi, aradaki 4 milyon ton farktan kaynaklanır. Güneşin yüzey sıcaklığının 5500 °C ve çekirdeğinin sıcaklığının ise 15.6 milyon °C olduğu göz önüne alındığında Stefan-Boltzmann kanununa göre güneşin çok yüksek enerji değerlerinde ışınım yaptığı sonucu ortaya çıkmaktadır (Güler ve ark., 2020; Anonim, 2024 r). Stefan-Boltzmann kanunu denklem (1) ile ifade edilir (Öztürk, 2020).

$$E = \sigma T_a^4 \quad (1)$$

Burada E, birim yüzey alanı başına ısıl güç miktarını (W/m<sup>2</sup>),  $\sigma$ , Stefan-Boltzmann sabitini (5.67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>), T ise cismin mutlak sıcaklığını (°K) gösterir.

Siyah cismin yaydığı enerji (termal ışınım şiddeti-E) cismin sıcaklığının (T) dördüncü kuvveti ile doğru orantılıdır. Bu daha sıcak cisimlerin daha fazla termal enerji yaydığı anlamına gelmektedir. İdeal siyah cisim varsayımı dışında kalan gerçek malzemeler için yayılan enerji emisyon katsayısı  $\epsilon$  çarpanı ile ( $E = \epsilon \sigma T_a^4$ ) yayılan enerji hesaplanır. Emisyon katsayısı, bir materyalin yüzeyden ışınım yolu ile enerji yayma kabiliyetini ifade eden bir katsayıdır. Genellikle 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. İdeal siyah cisim için emisyon katsayısı, maksimum değeri olan 1 değerini alır. Gerçek malzemeler için emisyon 1'den küçük değerler alır.

*Örnek 1:* Dünyanın ortalama sıcaklığı 15 °C (288.15 °K) olarak kabul edilir. Bu sıcaklığın dünya yüzeyine homojen dağıldığı ve dünyanın düzgün bir küre şeklinde siyah cisim gibi davrandığı varsayılırsa, dünya yüzeyinin tamamından yayılan ısıl güç miktarını hesaplayınız. Dünya yarıçapını 6371 km alınız.

*Çözüm:* 288.15 °K homojen dağılan ortalama yüzey sıcaklığının neden olduğu radyatif zorlama Stefan-Boltzmann kanunu çerçevesinde  $E = \sigma T_a^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times (288.15)^4 = 390.89 \text{ W/m}^2$  hesaplanır.

Düzgün küre formunda dünya varsayımı altında toplam yüzey alanı  $4\pi r^2 = 4\pi(6371000)^2 = 5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$  elde edilir. Dünyanın, siyah cisim olarak davranması durumunda yayacağı toplam ısıl

güç miktarı  $(5.1 \times 10^{14}) \times 390.89 = 1.99 \times 10^{17} \text{ W}$  olarak hesaplanır. Bu gücün bir kısmı atmosferik pencere tarafından uzaya transfer edilir. Bir kısmı ise atmosfer bileşiminde olan sera gazları nedeni soğurulur ve tekrar dünya yüzeyine termal ışıma yolu ile yayılır.

### Wien yer değiştirme kanunu

Siyah cisimler için elektromanyetik enerji yayılımında sıcaklık ile ışığın dalga boyu arasındaki ilişkiyi açıklayan kanundur. Bu kanuna göre, her cisim sıcaklığa bağlı olarak ışınım yapar. Işınım belli bir bant aralığındadır. Işınımın maksimum olduğu noktadaki dalga boyu  $\lambda_m$ , sıcaklık ile ters orantılıdır. Wien Yer Değiştirme Kanunu denklem (2)'deki gibi ifade edilir (Akpootu1 ve ark., 2020; Öztürk, 2020).

$$\lambda_m = A/T \quad (2)$$

Burada,  $\lambda_m$ , spektral ışınımın maksimum olduğu dalga boyu, A, 2898  $\mu\text{m K}$  (yer değiştirme sabiti) ve T ise sıcaklığı ( $^{\circ}\text{K}$ ) ifade eder.

Denklem (2)'den sıcaklık arttıkça siyah cisim ışınımının maksimum olduğu dalga boyunun azaldığı görülür. Stefan-Boltzman kanunundaki T değeri ile Wien Yer Değiştirme kanunundaki T değeri farklı sıcaklıkları ifade etmektedir. Stefan- Boltzman kanunundaki T değeri, cismin kinetik sıcaklığını gösterirken, Wien Yer Değiştirme kanunundaki T değeri cismin ışılan sıcaklığını göstermektedir (Öztürk, 2020).

*Örnek 2:* Dünyanın ortalama sıcaklığı  $15^{\circ}\text{C}$  ( $288.15^{\circ}\text{K}$ ) olarak kabul edilir. Bu sıcaklığın yaydığı termal radyasyonun tepe değerinin bulunduğu dalga boyunu Wien Yer Değiştirme yasasına göre hesaplayınız.

$$\text{Çözüm: } \lambda_m = A/T = 2898 / 288.15 = 10.05 \mu\text{m}$$

Bu termal radyasyon tepe dalga boyu, dünyadan enerji çıkışı sağlayan 8 ila 14  $\mu\text{m}$  dalga boyları arasında yer alan atmosferik pencerenin ortasına yakın düşer. Böylece, dünya yüzeyinde toplanan güneş enerjisinin atmosferik pencere yardımı ile uzaya transfer edilebilmesi ve dünyanın soğuması sağlanabilmektedir.

### Termal radyasyon için kirchhoff kanunu

Termal radyasyon Kirchhoff kanunu şu durumu ifade eder: Termal radyasyon emilimi ve yayılımı yapan, termodinamik dengede bulunan herhangi bir cisim için yayma kuvveti soğurma katsayısına eşit olur. Bu bakımdan iyi bir soğurucunun iyi bir yayıcı fakat kötü bir yansıtıcı olduğunu matematiksel olarak anlatan bir kanundur (Öztürk, 2020). Belirli bir dalga boyunda güçlü yayıcı olan malzemeler aynı zamanda o dalga boyunda güçlü soğurucudur. Bu durum  $\lambda$  dalga boyunda gelen ışınım için

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (3)$$

ile ifade edilebilir. Burada  $\alpha_\lambda$ ,  $\lambda$  dalga boyunda gelen ışınımın yüzey tarafından emilen kısmı olan soğurma gücüdür.  $\epsilon_\lambda$  ise cismin  $\lambda$  dalga boyunda yayma kuvvetini ifade eden emisyon katsayısıdır (Anonim, 2024 e).

### Planck yasası

Sıcaklığına bağlı olarak her dalga boyunda bir siyah cisim tarafından yayılan radyasyon miktarının hesaplanmasını sağlar. Planck yasası, belirli bir sıcaklıkta termal denge durumunda bulunan bir siyah cisim ışınımının yaydığı elektromanyetik radyasyonu ifade eder.

Herhangi bir yüzeyin sıcaklığı arttıkça, termal ışınım dalga boylarında daha çok enerji yayar. Oda sıcaklığında bulunan bir cisim kızılötesi dalga boyunda termal radyasyon yayar. Cisim sıcaklığı artırıldığı zaman kızılötesi bölgede enerji salınımı artarken, düşük dalga boylarına doğru da enerji

yayılmı artar (Anonim, 2024 b; Anonim, 2024 e). Bu durum, aşağıdaki formül ile yapılan hesaplarda görülebilir.

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda k_B T}\right] - 1} \quad (4)$$

Burada  $k_B$  Boltzmann sabiti,  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışığın ortamdaki hızı,  $T$  mutlak sıcaklık,  $B_{\lambda}$  spektral emisyon gücünü ifade eden spektral radyanstır (Anonim, 2024 1).

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Dünya Enerji Bütçesi: Gelen Güneş Enerjisi Ve Giden Termal Radyasyon Enerjisi

Dünyanın enerji bütçesi, güneşten dünyaya gelen enerji ile dünyadan uzaya yayılan enerji arasındaki dengeyi ifade eder. Kısa dalga boyu radyasyonunda dünyaya ulaşan güneş enerjisi, dünya tarafından absorbe edilen güneş radyasyonu (ASR) denklem (5)'deki gibi ifade edilir (Anonim, 2024 h; Anonim, 2024 i):

$$ASR = (1 - A) \times I_0 W/m^2 \quad (5)$$

Burada  $A$  parametresi, bond albedosu olarak bilinen dünyanın net albedosunu temsil eder. Dünyanın net albedosunun değerinin gözlemler sonucunda yaklaşık 0.3 civarında olduğu kabul görmüştür (Goode ve ark., 2001; Kraus, 2024). Dünya yüzeyine ulaşan net ışıma miktarı ise  $I_0 = 340 W/m^2$ 'dir. Emilen güneş enerjisi büyük ölçüde ısı enerjisine dönüştürülür ve dünya yüzeyi ve atmosfer katmanları tarafından depolanır. Depolanan ısı enerjisinin bir kısmı kızıl ötesi bölgesinde bulunan atmosferik pencere olarak bilinen düşük absorpsiyon (emilim) bandından termal radyasyon yolu ile uzaya transfer edilir. Atmosferik pencere, atmosferdeki termal radyasyonu absorbe eden bileşenlerin (su buharı ve sera gazları gibi) elektromanyetik dalga spektrumunda 8  $\mu m$  ile 14  $\mu m$  dalga boyları arasındaki bir spektral boşlukta bulunur (Garth W. ve C. Martin R., 1976). Bu pencere atmosfer bileşenlerinin absorpsiyonun çok düşük olduğu bir spektral boşluktur ve 8-14  $\mu m$  dalga boyları aralığında termal ışınmı uzaya iletir. Bu nedenle elektromanyetik spektrumun düşük dalga boyu (kızıl ötesi) bölgesinde bulunan bu aralık (frekans bandı) atmosferik pencere olarak isimlendirilir. Atmosferik pencere içinde yayılım sağlayan termal radyasyon atmosfer tarafından ciddi bir emilime maruz kalmadan uzaya kaçabilmektedir. Enerji denge modelinde bu mekanizma dünyadan enerji çıkışı ve soğumayı sağlayan etkidir (Hori ve ark., 2013).

Troposferin ortası ve yüzeyi için Stefan-Boltzmann kanunu dikkate alındığında, Giden Uzun Dalga Radyasyonu (OLR) yaklaşık olarak denklem (6)'daki gibi ifade edilir (Anonim, 2024 a; Anonim, 2024 i):

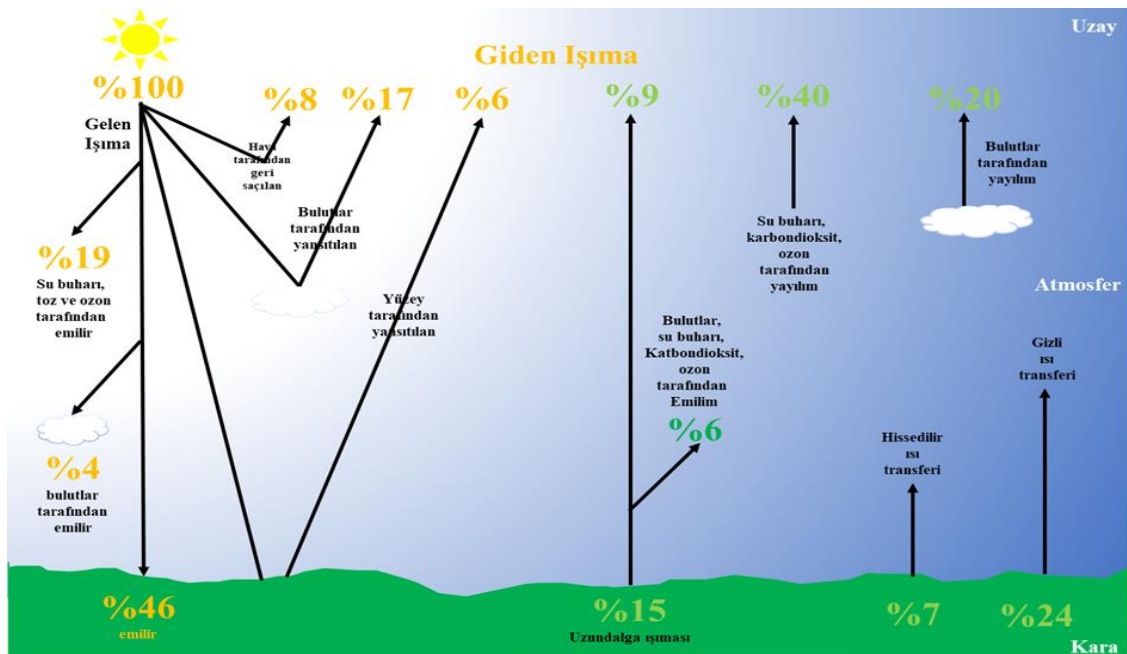
$$OLR \cong \epsilon \sigma T_a^4 + (1 - \epsilon) \sigma T_s^4 \quad (6)$$

Bu tek katmanlı modelde  $\epsilon \sigma T_a^4$  terimi troposferin ortasındaki OLR değerini,  $(1 - \epsilon) \sigma T_s^4$  terimi ise dünya yüzeyindeki OLR değerini ifade eder. Burada,  $\epsilon$  parametresi atmosferin etkin emisyon katsayısını temsil eder. Atmosferdeki sera gazlarının etkisi nedeni ile bu formülde  $\epsilon = 0.78$  değerini alır. Tek katmanlı modelde dünya yüzeyindeki sıcaklık ( $T_s$ ) dünyanın ortalama yüzey sıcaklık değeri olan 288 °K alınır, troposferin ortasındaki sıcaklık ( $T_a$ ) değeri ise 242 °K olarak kabul edilir (Anonim, 2024 a; Anonim, 2024 i).

Dünyanın enerji bütçesi, dünya tarafından absorbe edilen güneş enerjisi (denklem (5)) ve dünyadan uzaya giden kısa dalga boyunda termal radyasyon enerjisinin (denklem (6)) denkliği ile sağlanır. Bu enerji bütçesi (denkliği) oldukça basitleştirilmiş bir denge modeli sağlar. Güneş enerjisi, büyük oranda güneşteki hidrojen atomu çekirdeklerinin helyum atomu çekirdeklerine dönüşümünü sağlayan nükleer füzyonla üretilir ve önemli bir kısmı radyasyon (ışıma) yoluyla uzay boşluğuna

yayılır. Dünya üzerine düşen güneş ışınları, güneşte üretilen toplam enerjinin küçük bir kısmının dünyaya taşınımını sağlar. Bu enerjinin bir kısmı dünya tarafından absorbe edilir ve ısı enerjine dönüşür. Bu etki dünyanın ısınmasına yol açar. Absorbe edilen güneş radyasyonunun ortalama gücü metre kare başına denklem (5) ile modellenmiştir. Dünyanın sıcaklığının bir denge değeri civarında kalabilmesi (ortalama sıcaklık istikrarı) için dünyanın güneşten absorbe ettiği her birim enerjiye denk miktarda enerjiyi uzaya tekrar ışınım yolu ile göndermesi gerekmektedir. Eğer dünyadan uzaya giden enerji, güneşten absorbe edilen enerjiden az olursa dünya ısınır; çok olursa dünya soğur. Basitleştirilmiş enerji denge modeline göre dünya ısıl dengesi gelen ve giden enerjinin denkliği ( $ASR = OLR$ ) ile sağlanabilir (Anonim, 2024 j). Şekil 1, dünyaya güneşten gelen ışınımın atmosfer ve dünya yüzeyinde uğradığı yansıma ve emilim olayları ile oranlarını göstermektedir.

Şekil 1’de güneşten dünyaya ulaşan kısa dalga boyunda ışınım enerjisi %100 oranı ile temsil edilmiştir. Bu enerji atmosfer ve yüzeyde gerçekleşen yansıma ve emilim (absorbsiyon) olayları sonucunda paylaşılmaktadır. Yaklaşık oransal dağılımları şekilde gösterilmiştir. Turuncu renkli olanlar güneş ışımasının dağılımlarını, yeşil renkli olanlar karasal ışımanın dağılımını temsil etmektedir. Yüzey tarafından emilen %46 oranında enerji uzun dalga boyu civarı termal ışınım yolu ile tekrar yayılır. Şeklin üst tarafında yer alan giden ışınım bölümündeki enerji oranları toplandığında toplamın 100’ü vermesi ısıl dengenin sağlanması ve enerji bütçesi denkliği anlamına gelir (Anonim, 2024 j). Dünya yüzeyine ulaşan ışınların bir kısmı yansıtılarak uzaya geri dönerken (albedo etkisi), bir kısmı ise yüzeyde ve atmosferde emilip tekrar termal radyasyon olarak yayılmaktadır. Burada atmosfer içinde termal ışınımı absorbe ederek ısı enerjisini bir süre daha depolayan etken bileşenler atmosfer içerisindeki yeşil sera gazı olarak bilinen moleküllerinin (su buharı, karbondioksit vb.) miktarıdır. Atmosferde bu etken bileşenlerin miktarlarındaki değişimler, dünyanın enerji bütçesinin denkleğini etkileyebilmekte ve iklim değişikliklerine katkıda bulunabilmektedir. Bu gazların absorpsiyon spektrumları atmosferik pencereyi şekillendirir.



Şekil 1. Güneşten Gelen Işımanın Atmosfer ve Dünya Yüzeyinde Uğradığı Yansıma ve Emilim Oranları (Anonim, 2024 m)

Yukarıda denklem (5) ve denklem (6) eşitlikleri ile tanımlanan model “ayrık yüzeyler ve atmosferik katmanlara sahip model” kategorisinde değerlendirilir. Denklem (6) bu kategorinin en

temel modeli olan sıfır-boyutlu bir katmanlı model olarak bilinir (Anonim, 2024 g, Anonim, 2024 t). Daha temel seviyede olan başka bir model “birleşik yüzey ve atmosfere sahip model” olarak bilinmektedir. Dünyanın ışımsal dengesinin çok daha basit bir modeli denklem (7)’de verildiği gibi ifade edilebilir (Anonim, 2024 g; Anonim, 2024 t).

$$(1 - A)S\pi r^2 = 4\pi r^2 \epsilon \sigma T^4 \quad (7)$$

Burada S, güneş sabitini (güneşin dünya yörüngesinde oluşturduğu ışınım gücüdür. Ortalamada değeri  $1367 \text{ W/m}^2$  olarak kabul görür), r, dünyanın yarıçapını (6371 km),  $\sigma$  ise Stefan-Boltzmann sabitini ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ ) ifade eder. Denklem (7)’nin sol tarafı dünya kesit alanına ( $\pi r^2$ ) düşen güneşten gelen toplam kısa dalga boyunda ışınım gücünü (watt) temsil ederken, sağ tarafı Stefan-Boltzmann yasasına göre hesaplanan, dünya yüzey alanından ( $4\pi r^2$ ) uzaya giden toplam uzun dalga boyunda ışınım gücünü (watt) temsil etmektedir (Anonim, 2024 t).

Denklem (7)’deki  $\pi r^2$  terimi denge durumu için “sıfır boyutlu” bir denklem verecek şekilde tekrar düzenlenebilir. Bu durumda, dünya yarıçap boyutundan bağımsız olarak ifade edilen denklem (8) elde edilir (Anonim, 2024 t). Böylece model sıfır boyutlu bir forma kavuşur.

$$(1 - A)S = 4\epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

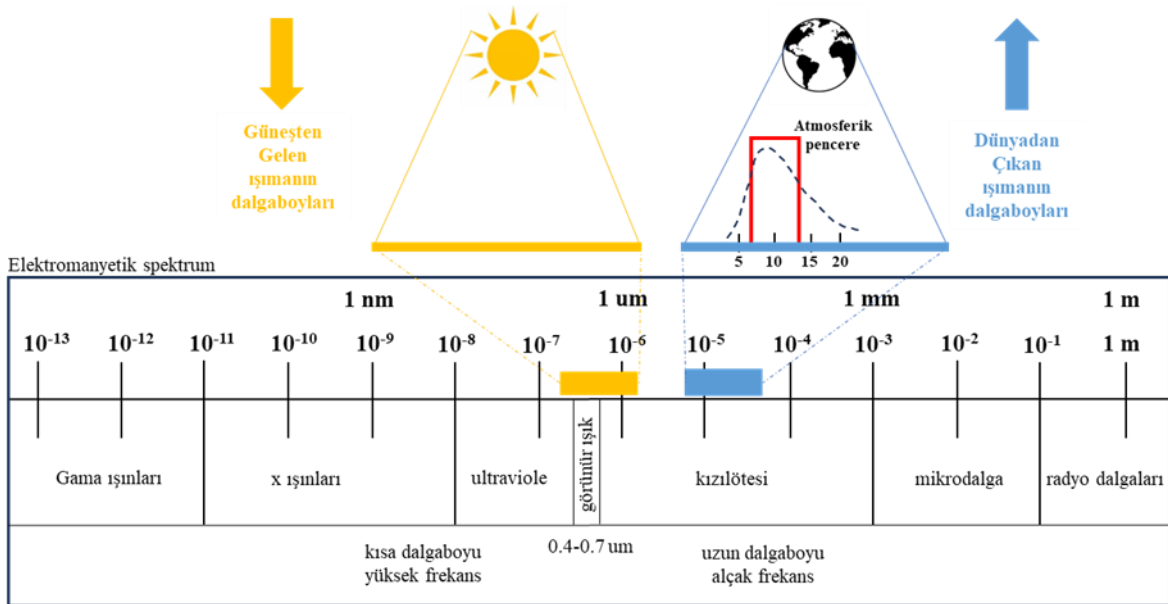
Denklem (8)’in sol tarafı  $\text{W/m}^2$  biriminde güneşten gelen kısa dalga enerji akışını, sağ tarafı ise  $\text{W/m}^2$  biriminde dünyadan çıkan uzun dalga enerji akışını temsil etmektedir. Denklemdaki diğer değişken parametrelerden A, Dünya’nın ortalama albedosudur. Ortalamada 0.3 olarak ölçülmüştür (Anonim, 2001; Goode ve ark., 2001). T, Dünya’nın ortalama yüzey sıcaklığıdır ve 2020 yılı itibarıyla yaklaşık  $288 \text{ }^\circ\text{K}$  olarak ölçülmüştür. Burada  $\epsilon$ , dünyanın yüzey ve atmosfer birleşik etkin emisyonudur. 0 ile 1 arasında bir değere sahip olur, bu modelde dünyanın enerji dengesi durumu için emisyon katsayısının 0.61 olması gerektiği kabul görür (Anonim, 2024 g).

### Atmosferik pencere (kızılötesi penceresi) ve yeşil sera gazlarının rolü

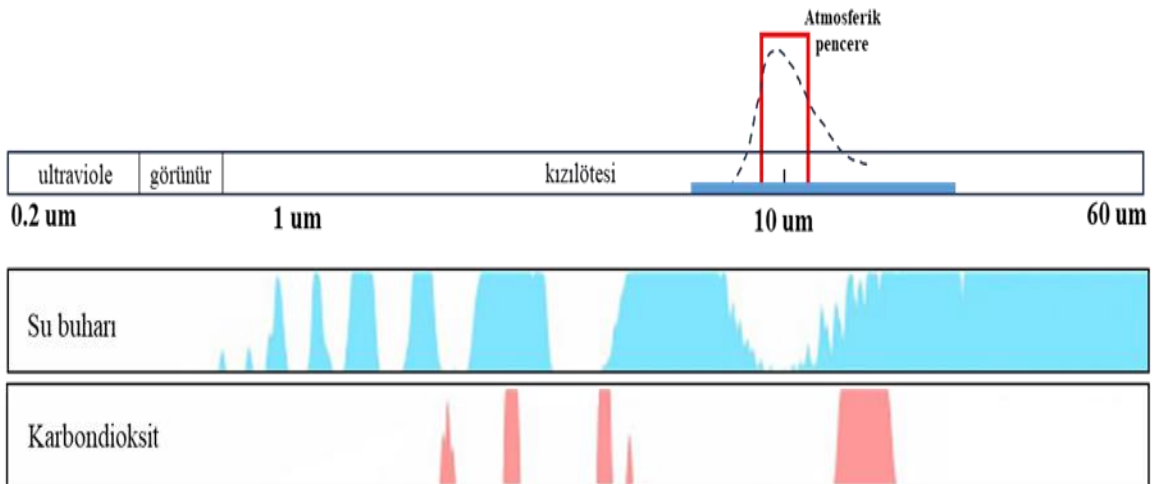
Güneşten gelen elektromanyetik ışımın tüm dalga boyları atmosferde gerçekleşen emilim (absorbsiyon) ve yansıma olayları nedeni ile dünya yüzeyine ulaşmaz. Aynı şekilde ısınan dünya yüzeyinin ve atmosfer katmanlarının yaydığı termal ışımın tüm dalga boyları da uzaya ulaşmaz. Atmosfer içerisinde bulunan su, karbondioksit, ozon ve diğer moleküller ışınım enerjisinin kendi absorpsiyon spektrumlarına denk düşen kısmını emerken diğer dalga boylarının iletimine izin veren spektral boşluklar oluştururlar. Gezegenlerde ışınım enerjisinin pratik olarak absorbe edilemediği ve termal radyasyon enerjisinin büyük oranda transfer edilebildiği spektral dalga boyu bölgelerine “atmosferik pencere” adı verilir. Güneşten dünyaya kısa dalga boyunda iletilen enerjinin nispeten küçük bir kısmı atmosfer tarafından emilirken, ısınan dünya yüzeyi tarafından uzaya gönderilen uzun dalga boyuna sahip termal radyasyon enerjisinin çoğu dünya atmosferi tarafından emilir (Anonim, 2024 p). Atmosfer tarafından emilimin sınırlı olduğu veya neredeyse hiç olmadığı uzun dalga boyu bölgeleri, dünyadan termal radyasyon enerjisinin çıkışı sağlayan pencere işlevi görür ve soğumanın en önemli mekanizmasını teşkil eder. Elektromanyetik spektruma göre güneşten gelen enerji ve dünyadan çıkan enerji ile atmosferik pencerenin temsili gösterimi Şekil 2’deki gibidir.

Güneşten gelen enerji elektromanyetik spektrumun geniş bir frekans aralığını kapsar. Güneş, özellikle görünür ışık bölgesinde yani insan gözü tarafından algılanabilen renklerde ışık üretir. Güneşten gelen enerji atmosferdeki gazlar ve bulutlardan etkilenir, bu durum dünya yüzeyine ulaşan enerji miktarı ve spektrumunu şekillendirir. Güneşten dünya atmosferine ulaşan ortamla ışınım gücü  $1367 \text{ W/m}^2$  olmasına rağmen atmosfer katmanlarını geçerek dünya yüzeyine ulaşan ışınım gücünün ortalama olarak  $340 \text{ W/m}^2$  düştüğü kabul edilir. Dünya yüzeyinden uzaya iletilen enerji ise genellikle

spektrumun kızılötesi bölgesinde uzun dalga boyu termal radyasyon ile gerçekleşir. Dünya tarafından yayılan bu radyasyon, genellikle 8-14  $\mu\text{m}$  dalga boyları arasında yoğunlaşan bir spektral bölgede gerçekleşir. Bu bölge, atmosferik pencereye karşılık gelir ve etkili bir şekilde güneşten alınan enerjinin atmosferik pencereden uzaya dönüşü sağlanarak enerji bütçesi dengelenir. Böylece dünya sıcaklığının ısı dengede kalması sağlanabilir. (Örnek 2’de dünyanın ortalama sıcaklığı olan 15 °C için yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  dalga boyunda tepe değeri olan bir termal ışımaya gerçekleşeceği Wien yer değiştirme kanunu yardımı ile hesaplanmıştır. Bu değer atmosferik pencerenin orta bölgesine denk gelerek termal enerji çıkışını kolaylaştırır). Şekil 3’te bu süreçte en etkin olan atmosfer bileşenlerinden su buharı ve CO<sub>2</sub> gazının absorpsiyon spektrumları ve dünyanın termal radyasyonunun çıkış sağlayabildiği spektral boşluk olan atmosferik pencere görülmektedir. Su buharının çok daha geniş bir spektral bölgede absorpsiyon sağladığı görülür. Bu nedenle su buharı atmosferik pencerenin bant genişliğini belirlemede daha baskın olduğu ve dünyanın ısı tutmasını sağlayan en etkin atmosfer bileşeni olduğu görülür.



Şekil 2. Elektromanyetik Spektruma Göre Güneşten Gelen enerji ve Dünyadan Çıkan Enerji ile Atmosferik Pencere (Anonim, 2024 c;Anonim, 2024 p)



Şekil 3. Elektromanyetik Spektruma Göre Su Buharı ve Karbondioksit Spektrumu (Anonim, 2024 c; Anonim, 2024 f;Anonim, 2024 p)



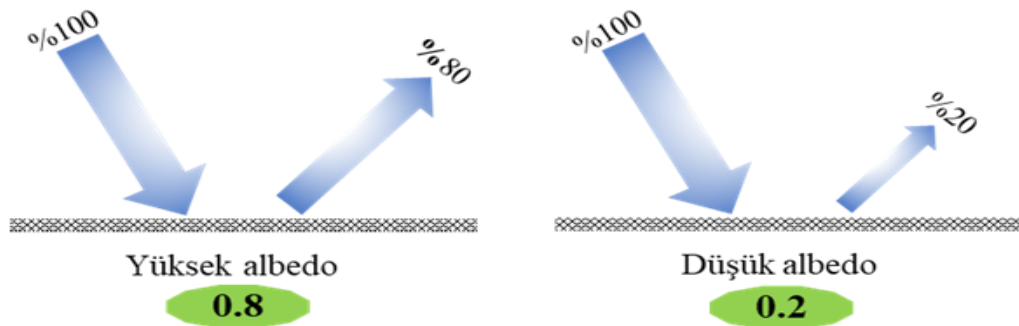
### Albedo etkisi

Güneş tarafından gönderilen ışığın düştüğü yüzeyler tarafından yansıtma kapasitesine albedo (yansıtılabilirlik) denir. Albedo çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösteren bir özelliktir. Albedoyu etkileyen temel parametreler güneş ışığının geliş açısı, yüzey alanı, yüzeyin rengi, cismin fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimidir. Açık renkli yüzeyler, genellikle yüksek albedoya sahiptir. Bu tür yüzeyler, güneşten gelen ışığın büyük bir kısmını yansıtarak atmosfere geri gönderirler. Bu durum özellikle kar, kum veya buz gibi yüzeylerde belirgindir. Diğer taraftan, koyu renkli yüzeyler düşük albedoya sahiptir. Bu yüzeyler güneş ışığını büyük ölçüde absorbe eder, bu da koyu renkli yüzeylerin, açık renkli yüzeylere kıyasla daha çabuk ve daha çok ısınmasına neden olur. Örneğin, asfalt gibi alanlar düşük albedo değerlerine sahiptir. Albedo katsayısı  $A$  ile gösterilir ve  $[0,1]$  aralığında değer alabilir. Üzerine çarpan ışığın tümünü yansıtan cismin albedo değeri 1, üzerine çarpan ışığın tümünü absorbe eden cismin albedo değeri ise 0 olarak kabul edilir (Dolayısıyla  $(1 - A)$  absorpsiyon katsayısı olarak değerlendirilebilir). Dünyanın net albedosu (Bond albedosu) mevsimsel olarak küçük değişimler gösterebilmektedir ancak ortalama olarak 0.31 değeri civarında değiştiği gözlemlenmiştir (Anonim, 2024 c; Goode ve ark., 2001). Bu değer, yeryüzündeki farklı yüzey türlerinin ve iklim bölgelerinin albedo etkilerini dikkate alan ortalama bir değerdir. Bir cisim yüzeyinin albedo etkisini ifade eden albedo katsayısı için denklem (9) kullanılmaktadır.

$$albedo = \frac{\text{nesneden yansıyan enerji}}{\text{nesneye gelen enerji}} \quad (9)$$

Bond albedosu ise soğurma olmaksızın uzaya yansıtılan ışınımın güneşten gelen enerjiye oranı olarak ifade edilir ve ortalamada dünyanın net albedosunu ifade eder.

Şekil 4'te yüksek ve düşük albedo katsayısına sahip yüzeylerin etkisi gösterilmektedir. Yüksek albedo yüzeyinde  $(1 - 0.8) = 0.2$  oranında enerji absorpsiyonu beklenir. Düşük albedoya sahip yüzeyde (sağdaki şekil) ise  $(1 - 0.2) = 0.8$  oranında absorpsiyon gerçekleşir.



Şekil 4. Yüksek ve Alçak Albedo Etkisi (Anonim, 2024 c)

Çizelge 1'de bazı yüzeylere ait albedo değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 1. Bazı Yüzeylere Ait Albedo Değerleri (Spångmyr, 2010; Anonim, 2024 s;)

Yüzey	Albedo	Yüzey	Albedo
Orman	0.05 – 0.18	Tarla	0.26
Bataklık	0.01	Çöl	0.30
Asfalt	0.15	Beton	0.30
Çakıl zemin	0.18	Okyanus buzı	0.050 – 0.70
Çimen	0.18 – 0.23	Alüminyum	0.85
Kum	0.20	Temiz kar	0.80 – 0.90

Denklem (10)'a göre dünyanın enerji bütçesi denkleğinin sağlanabilmesi için gereken bond albedo değeri, denklem (8) ile ifade edilen sıfır boyutlu model yardımı ile

$$A = 1 - \frac{4\epsilon\sigma T^4}{S} \quad (10)$$

elde edilebilir.

*Örnek 3:* 2020 yılı itibarıyla dünyanın yüzey sıcaklığı yaklaşık  $T = 288$  °K olarak ölçülmüştür (Anonim,2024 g). Dünya'nın birleşik yüzey ve atmosferinin etkin emisyonu  $\epsilon = 0.61$  değerinde dünya enerji bütçesinin dengelenmesi için ortalama yüzey albedo (A) değeri hesaplayınız.

*Çözüm:* Denklem (10) yardımı ile dünyanın ısıl dengesi için Bond albedosu değerinin

$$A = 1 - \frac{4 \times 0.61 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4 \times (288)^4}{1367 \text{ W/m}^2}$$

$A = 0.304$  olması gerektiği görülür. Bu değer gözlemler sonucunda elde edilen yaklaşık 0.3 değeri ile oldukça uyumludur (Goode ve ark., 2001; Anonim, 2024 c).

### Radyatif zorlama

Radyatif zorlama, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC) tarafından belirli iklim faktörlerinin dünya yüzeyine enerji denge durumuna etkilerini modellemek için önerilmiştir. İklim değişimine yol açan faktörler insan faaliyetlerinden kaynaklanabilen faktörler (sera gazı salınımları gibi) ve doğal süreçlerden kaynaklanan faktörler (güneş ışınımındaki değişimler gibi) olmak üzere iki farklı kategoride ele alınabilir. Her bir faktörün 1750'den günümüze kadar olan zaman dilimi için enerji denge durumuna pozitif ve negatif yönde katkısı, radyatif zorlama (kuvvet) kavramı ile metre kare başına güç olarak ifade edilir. Pozitif değerli radyatif zorlama dünya yüzeyinin ısınmasına katkıda bulunan iklim faktörlerinin etkisini modellemek için uygulanırken, negatif değerli radyatif zorlama dünya yüzeyini soğutan faktörlerin etkisini modellemek için kullanılır (Anonim, 2024 n).

Dünyanın enerji bütçesi denkleğinin, ASR ve OLR değerlerinin birbirine eşit olması durumu olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bu durum dünyaya ulaşan ve dünyadan ayrılan enerjilerin eşit olması ve böylece dünyanın enerji rejiminde net bir kazanç veya kaybın olmadığı ısıl denge durumunu ifade etmektedir. Ancak, enerji bütçe denkleğinde küresel ortalama sıcaklığının değişmeden kalabileceği varsayılır. Dengesizlik durumunda ise dünyanın enerji dengesizliği (Earth's Energy Imbalance - EEI) denklem (11)'deki gibi hesaplanır (Anonim, 2024 i).

$$EEI = ASR - OLR \quad (11)$$

EEI'nin pozitif değeri küresel ısınmanın arttığını gösterirken, negatif değeri küresel ısınmanın azaldığını gösterir. Dengesizliğe yol açan faktörlerin sürece katkıları birer radyatif zorlama terimi olarak toplamsal enerji hesabına girer. Böylece, iklimle ilişkileri oldukça çok karmaşık olabilen faktörlerin enerji boyutunda etkileri toplamsal olarak ifade edilerek, önemli bir analiz ve modelleme kolaylığı sağlanır. EEI bileşenleri iklime etki eden faktörlerin (atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarı artışı, albedo değişimi gibi) radyatif zorlama değerlerinin toplamı formunda denklem (12)'deki gibi ifade edilir (Anonim, 2024 i).

$$EEI = \Delta F_{CO_2} + \Delta F_{TSI} + \Delta F_A + \dots \quad (12)$$

Burada  $\Delta F_{CO_2}$  radyatif zorlaması, atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarı değişimlerinin etkilerini modellemek,  $\Delta F_{TSI}$  radyatif zorlaması güneşte doğal olarak gerçekleşen ve dünyaya ulaşan güneş enerjisinde değişimlere yol açan faktörlerin etkilerini modellemek,  $\Delta F_A$  ise dünya Bond albedosundaki değişimlerin etkilerini modellemek için kullanılır.

### Global sıcaklık anomalisi

Bir radyatif zorlama etkisi  $\Delta F_a$  için küresel ortalama denge yüzey sıcaklığının tepkisi  $\Delta T$  ile ifade edilsin. Burada  $\Delta F_a$  değerinde bir radyatif zorlama, ısıl denge değeri sıcaklığından sapmaya yol açan bir zorlama gücünü olsun. Bu zorlama sonucunda küresel ortalama sıcaklıktan sapma miktarı (Kelvin biriminde) küresel sıcaklık anomalisi olarak ifade edilir. Denklem (13) yardımı ile bir radyatif zorlamanın küresel sıcaklık anomalisine etkisi basitçe modellenmiştir (Shine ve ark., 2003).

$$\Delta T \approx \lambda \cdot \Delta F_a \quad (13)$$

Burada,  $\lambda$  katsayısı iklim duyarlılığı parametresidir. Radyatif zorlamanın türüne göre yaklaşık  $0.4 - 12 \text{ }^\circ\text{K (W/m}^2\text{)}^{-1}$  arasında değişen bir değer dağılımına sahiptir.

*Örnek 4:* Radyatif zorlama etkisi  $\Delta F_a = 1 \text{ W/m}^2$  olan iklime etki eden bir faktörün, küresel sıcaklık anomalisine katkısını hesaplayınız. Bu faktör için iklim duyarlılığı katsayısı  $\lambda = 0.5$  olarak belirlenmiştir.

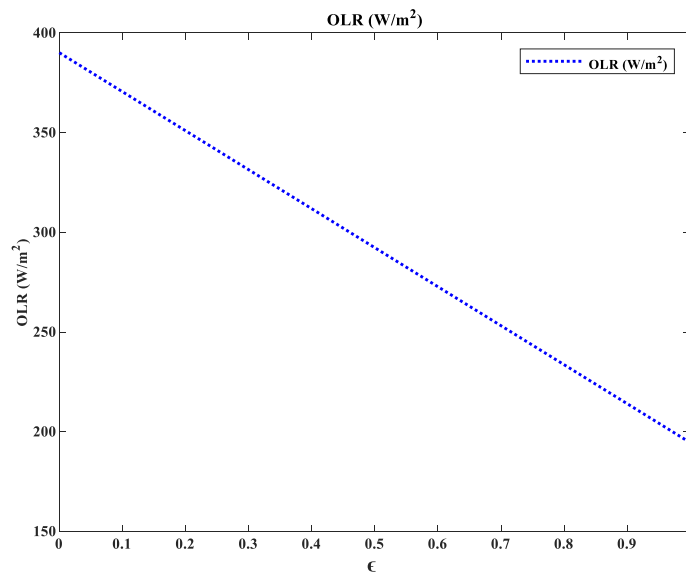
*Çözüm:*  $\Delta T \approx \lambda \cdot \Delta F_a \approx 0.5 \times 1 = 0.5 \text{ }^\circ\text{K}$  olarak küresel sıcaklık anomalisine katkısı hesaplanır.

### ASR ve OLR modelleri ve bazı açıklayıcı analizler

Yukarıdaki açıklamalar çerçevesinde denklem (5) ve denklem (6)'daki ASR ve OLR değerleri hesaplanabilir. A parametresi dünyanın net albedosunu temsil eden bond albedosudur. Değerinin yaklaşık 0.3 olduğu varsayılmaktadır. Buna göre denklem (5) kullanılarak ASR değeri hesaplandığında;

$$\text{ASR} = (1 - 0.3) \times I_0 \cong 238 \text{ W/m}^2$$

olarak elde edilir (Anonim, 2024 i). Denklem (7) kullanılarak atmosferin etkin emisyon katsayısı  $\epsilon$  değerlerinin  $[0,1]$  aralığında değişen değerlerine bağlı olarak OLR değerleri hesaplandığında ise Şekil 5'teki grafik elde edilmektedir. Emisyon katsayısının  $[0,1]$  değişim aralığı içinde, OLR değerlerini neredeyse %50 oranında değiştirebildiği görülebilir. Burada, atmosfer bileşenleri emisyon değerleri, atmosferin etkin emisyon katsayısını belirler. İnsan faaliyetine veya doğal faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin sera gazı salınımında artışın etkisi bu parametre ile OLR modeline yansıtılabilir. Enerji dengesinin sağlanması için gereken etkin değer aşağıdaki örnekte bir katmanlı modele göre hesaplanmıştır.



Şekil 5. Etkin Emisyon Katsayısı  $\epsilon$  Değerlerine Karşılık OLR Değerleri

*Örnek 5:* Bond albedosunun ölçülen  $A = 0.3$  değeri ve ASR'nin hesaplanan  $238 \text{ W/m}^2$  değeri için  $ASR = OLR$  eşitliğinin sağlanması için atmosferin etkin emisyonun  $\epsilon$  değerini belirleyiniz.

*Çözüm:* ASR = OLRkoşulunda denklem (7) kullanılırsa,

$$ASR \cong \epsilon \sigma T_a^4 + (1 - \epsilon) \sigma T_S^4$$

$$\epsilon = \frac{ASR - \sigma T_S^4}{\sigma T_a^4 - \sigma T_S^4} = \frac{238 - (5.67 \times 10^{-8}) \times (288)^4}{(5.67 \times 10^{-8}) \times (242)^4 - (5.67 \times 10^{-8}) \times (288)^4}$$

$\epsilon \cong 0.78$  elde edilir. Bu değer tek katmanlı modelde, enerji dengesi için gereken emisyon değeridir (Anonim, 2024 i).

### Karbondiyoksit kaynaklı radyatif zorlama ve bazı açıklayıcı analizler

Karbondiyoksit ( $\text{CO}_2$ ) için basitleştirilmiş birinci dereceden radyatif zorlama modeli denklem (14) ile ifade edilebilir (Myhre ve ark., 1998; Anonim, 2024 o).

$$\Delta F_{\text{CO}_2} = 5.35 \times \ln \left( \frac{C_0 + \Delta C}{C_0} \right) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (14)$$

Burada  $\Delta C$  değişim konsantrasyonu (ppm biriminde), referans konsantrasyon olan  $C_0$  değerinden (ppm biriminde) sapma miktarıdır. İklim değişikliği araştırmalarında,  $C_0$  referans konsantrasyonu genelde ciddi antropojenik değişikliklerden (insan etkisi sonucu olan değişimlerden) önceki  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu alınır ve yaygın olarak sanayi devrimi öncesi 1750 yılında ölçülen 278 ppm konsantrasyon değeri referans olarak kabul görür.

Buna göre, paydaki terim  $C_0 + \Delta C$  değeri mevcut yılın  $\text{CO}_2$  konsantrasyonunu ( $C_{\text{CO}_2}$ ) ifade ederken, paydadaki  $C_0$  değeri referans dönemi göstermektedir. Örneğin 2022 yılındaki  $\text{CO}_2$  değişimine bağlı radyatif zorlama hesabı 2020 yılı referans alınarak yapılmak istenirse  $\Delta C$  değeri  $\Delta C = C_{\text{CO}_2}(2022) - C_0(2020)$  ile belirlenebilir. Buna göre denklem (14)'ün düzenlenmiş bir formu olan

$$\Delta F_{\text{CO}_2} = a \times \ln \left( \frac{C_{\text{CO}_2}}{C_0} \right) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (15)$$

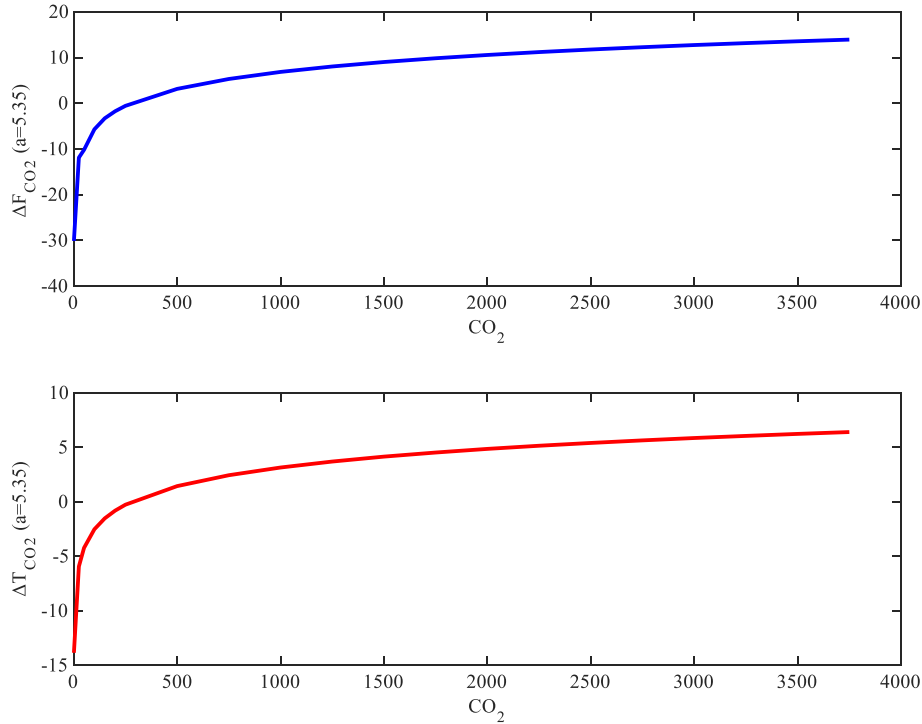
yazılabilir. Buna göre  $a = 5.35$  ve  $C_0 = 278$  (1750 yılı referans değeri) için  $\text{CO}_2$ 'nin farklı konsantrasyon değerleri için radyatif zorlama  $\Delta F_{\text{CO}_2}$ 'nin değişimi denklem (15) yardımı ile hesaplanabilir. Bu zorlamanın global sıcaklık anomalisine katkısını ( $\Delta T_{\text{CO}_2}$ ) incelemek için denklem (13) kullanılabilir. Bu hesaplamalarda elde edilen veriler Çizelge 2 ve Şekil 6'da sunulmuştur. Bu veriler yardımı ile atmosferik  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu artışlarının 1750 yılı referans yılındaki koşullara göre ortalama sıcaklık değişimlerine etkisi analiz edilebilir.

### Çizelge2. Atmosferik $\text{CO}_2$ Konsantrasyonu Değişimine Bağlı $\Delta F_{\text{CO}_2}$ Zorlaması ve Global Sıcaklık Anomalisi ( $\Delta T_{\text{CO}_2}$ ) Değerleri

$a = 5.35$ ve $C_0 = 278, \lambda = 0.46$								
$C_{\text{CO}_2}$	$\Delta F_{\text{CO}_2}$	$\Delta T_{\text{CO}_2}$	$C_{\text{CO}_2}$	$\Delta F_{\text{CO}_2}$	$\Delta T_{\text{CO}_2}$	$C_{\text{CO}_2}$	$\Delta F_{\text{CO}_2}$	$\Delta T_{\text{CO}_2}$
1	-30.11	-13.8506	500	3.14	1.4444	2250	11.19	5.1474
25	-12.89	-5.9294	750	5.31	2.4426	2500	11.75	5.4050
50	-9.18	-4.2228	1000	6.85	3.1510	2750	12.26	5.6396
100	-5.47	-2.5162	1250	8.04	3.6984	3000	12.73	5.8558
150	-3.30	-1.5180	1500	9.02	4.1492	3250	13.15	6.0490
200	-1.76	-0.8096	1750	9.84	4.5264	3500	13.55	6.2330
250	-0.57	-0.2622	2000	10.56	4.8576	3750	13.92	6.4032

Çizelge 2'de,  $\text{CO}_2$ 'nin değişimine bağlı olarak radyatif zorlama ( $\Delta F_{\text{CO}_2}$ ) değerinin değişimi incelendiğinde sanayi devrimi seviyesi olan 278 ppm değerine kadar olan  $\text{CO}_2$  değerlerinde negatif  $\Delta F_{\text{CO}_2}$  olduğu gözlemlenebilir. Bu düzeyler ortalama dünya sıcaklığının düşmesi yani soğuma etkisini ifade eder. 278 ppm değerlerden daha yüksek konsantrasyonlarda pozitif değerli radyatif

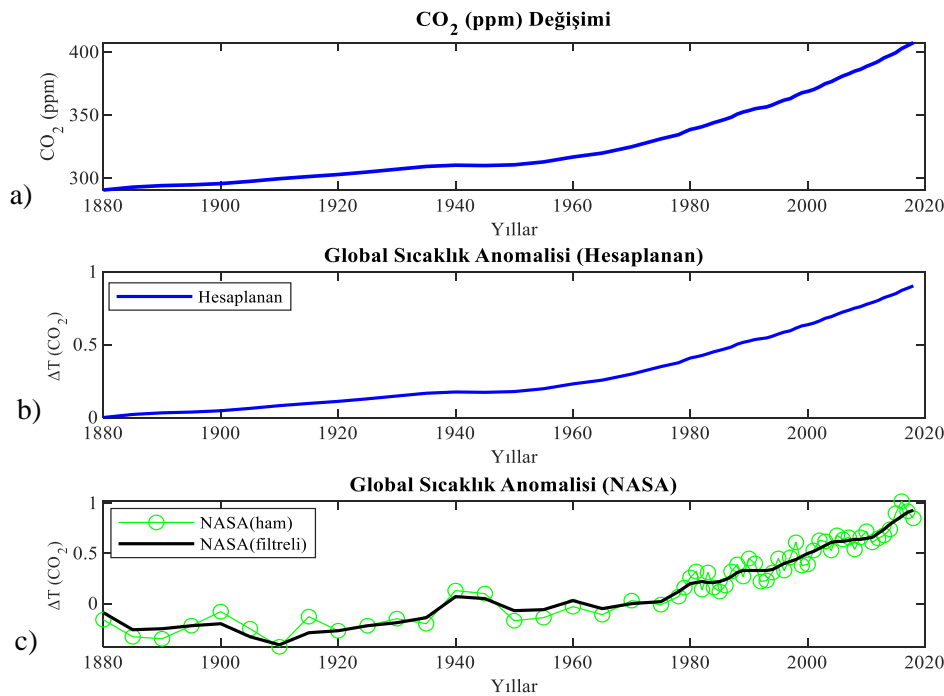
zorlamaya neden olabileceği görülür ( $\Delta F_{CO_2} > 0$ ). Bu değişim sıcaklık anomalisine ( $\Delta T_{CO_2}$ ) pozitif değerlerde etki ederek, global ortalama sıcaklığın artmasına neden olacağı öngörülür. Şekil 6'da farklı  $CO_2$  değerleri için oluşan  $\Delta F_{CO_2}$  ve  $\Delta T_{CO_2}$  değerleri görülmektedir. Şekil 6,  $CO_2$  konsantrasyonunun 4000 ppm değerlerine doğru ortalama global sıcaklıkta  $5\text{ }^\circ\text{C}$  üzerinde artışa yol açabileceği ve iklim değişimleri açısından dünyada yaşam üzerinde oldukça yıkıcı ve radikal değişimlere yol açabileceği öngörülebilir. Atmosfere salınan karbondioksitin kaybolmasının 100 yılı bulabildiği tahmin edilmektedir. Bu açıdan, atmosferde  $CO_2$  birikimi nedeni ile iklim değişim süreçlerinin yıkıcı bir düzeye ulaşmadan önce karbon salınımının azaltılması yönünde tedbirlerin alınmasının gerekliliği anlaşılabilir. Karbon salınımının azaltılması süreçleri yetersiz düzeyde kalırsa, bu çaba birikimin negatif etkilerinin görülmesini sadece geciktirebilir ve biraz zaman kazanılmasını sağlayabilir. Yine de, kazanılan zaman, negatif radyatif zorlamaya yol açabilecek, diğer bir ifade ile dünyanın soğumasına yol açabilecek yeni çözümlerin hayata geçirilebilmesi, dünya sıcaklığının makul seviyelerde tutulması çabaları için kıymetli olabilir. Gelecek bölümde negatif radyatif zorlama etkisi ve iklim kontrolü için albedo etkisi ve uygulamaları incelenecektir.



Şekil 6. Atmosferik  $CO_2$  Konsantrasyon Değerlerine (ppm) Karşılık Gelen  $\Delta F_{CO_2}$  ve  $\Delta T_{CO_2}$  Değerleri

Avrupa Çevre Ajansı verilerine göre 1750 yılından 2018 yılına kadarki  $CO_2$  (ppm) değerleri Şekil 7(a)'daki gibidir. 1750 yılından 2018 yılına  $CO_2$  seviyesi %46.61 oranında artış göstermiştir. Bir önceki yıla göre yüzdelik artışlar incelendiğinde en yüksek artışlar %1.94, %1.56, %1.25 ve %1.00 oranlarında 1975, 1970, 1960 ve 1978 yıllarında gerçekleşmiştir. Bir önceki yıla göre düşüşler ise %0.21, %0.14 ve %0.10 oranlarında 1835, 1840 ve 1945 yıllarında gerçekleşmiştir. Tarihsel süreçte 1750 yılından sonra gelişen endüstriyel faaliyetler ve fosil yakıtların kullanımındaki artış gibi faktörler nedeni ile insana bağlı  $CO_2$  salınımında artış olmuştur. Bu etki atmosferdeki  $CO_2$  konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. Bu artış Şekil 7(a)'da sunulan  $CO_2$  seviyesi ölçümlerinde açıkça görülmektedir. Bu artışın yol açtığı pozitif değerli radyatif zorlamanın yakın zamanlı global sıcaklık

artışına önemli bir katkı sağladığı görüşü yaygın kabul görmüştür. Şekil 7(b)'de sıcaklık anomalisine CO<sub>2</sub> seviyesinin katkısı denklem (15) ve denklem (13) yardımı ile hesaplanmış ve çizilmiştir. Bu grafikteki hesaplanan sıcaklık anomalisi trendi, Şekil 7(c)'de NASA tarafından atmosfer gözlemler için yapılan global sıcaklık anomalisi ölçümlerinin trendi ile ana hatları ile uyum gösterebildiği görülebilir. Bu uyum, 1960 sonrası global sıcaklık artışında CO<sub>2</sub> seviyesinin artışının önemli bir etken olduğunu destekler niteliktedir. (NASA'nın sıcaklık anomalisi gözlemleri 1880'li yıllarda başladığı için verilerin karşılaştırılabilir olması amacı ile Şekil 7(b)'de hesaplanan CO<sub>2</sub> bağlı sıcaklık anomalisi, 1880 yılı CO<sub>2</sub> seviyesi referans alınarak (290.7 ppm) ve  $\lambda = 0.5$  için denklem (13) yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 7(c)'de NASA atmosfer gözlemleri için paylaştığı yıllara göre global sıcaklık anomalisi verileri ham ve filtrelenmiş olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Yıllara Göre CO<sub>2</sub> Seviyesi (ppm), Hesaplanan Sıcaklık Anomalisi  $\Delta T_{CO_2}$  ve NASA Sıcaklık Anomalisi Verileri (ham, filtrelenmiş)  $\Delta T_{CO_2}$  Değerleri (Anonim, 2024 d; Anonim, 2024 k)

### Toplam solar ışınım zorlaması, albedo radyatif zorlaması ve bazı açıklayıcı analizler

Toplam Solar Işınım (TSI), tüm dalga boylarını içeren güneş ışınımının yoğunluğudur. Bu değer, dünyanın yıllık ortalama yörünge yarıçapının içinde ve atmosferin dışında yaklaşık olarak 1361 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğuna sahip olduğu varsayılır (Kopp ve Lean, 2011). Ancak bu değer atmosferde gerçekleşen yansıma ve absorpsiyon gibi etkenler nedeni ile dünya yüzeyinin metrekaresi başına küresel ve yıllık ortalama güneş ışınımı miktarı  $I_0 = 340 \text{ W/m}^2$  olarak kabul edilir. ASR denklemi göz önüne alındığında, güneş ışınımında  $\Delta\tau$  maksimum kesirli değişimleri için radyatif zorlama aşağıdaki formda ifade edilebilir.

$$\Delta F_{TSI} = (1 - A) \cdot 340 \cdot \Delta\tau \text{ W/m}^2 \cong 238 \cdot \Delta\tau \text{ W/m}^2 \quad (16)$$

Güneş enerjisindeki yıllık değişim miktarı güneş lekeleri veya diğer bazı astronomik etkenlere bağlı olarak  $\Delta\tau = 0.034$  civarında kabul edilebilmektedir. Aslında bu radyatif zorlama yansımaya enerjinin değişiminden kaynaklanır. Yansıyan enerjinin sağladığı radyatif zorlama negatif değerlidir ve soğuma etkisine yol açar. Burada uzaya yansıtılan enerji, dünyanın bond albedo etkisi (etkin

yansıtıcılık etkisi) ile açıklanır. Dünya'nın bond albedosunun yaklaşık  $A = 0.30$  ortalama küresel değere sahiptir. Bu bağlamda, dünya tarafından absorbe edilen güneş enerjisi denklem (16)'da kullanıldığı gibi  $(1 - A) = 0.7$  olarak kabul görür (Jian ve ark., 2018).

Dünya'nın bond albedosunun sağladığı radyatif zorlama ise

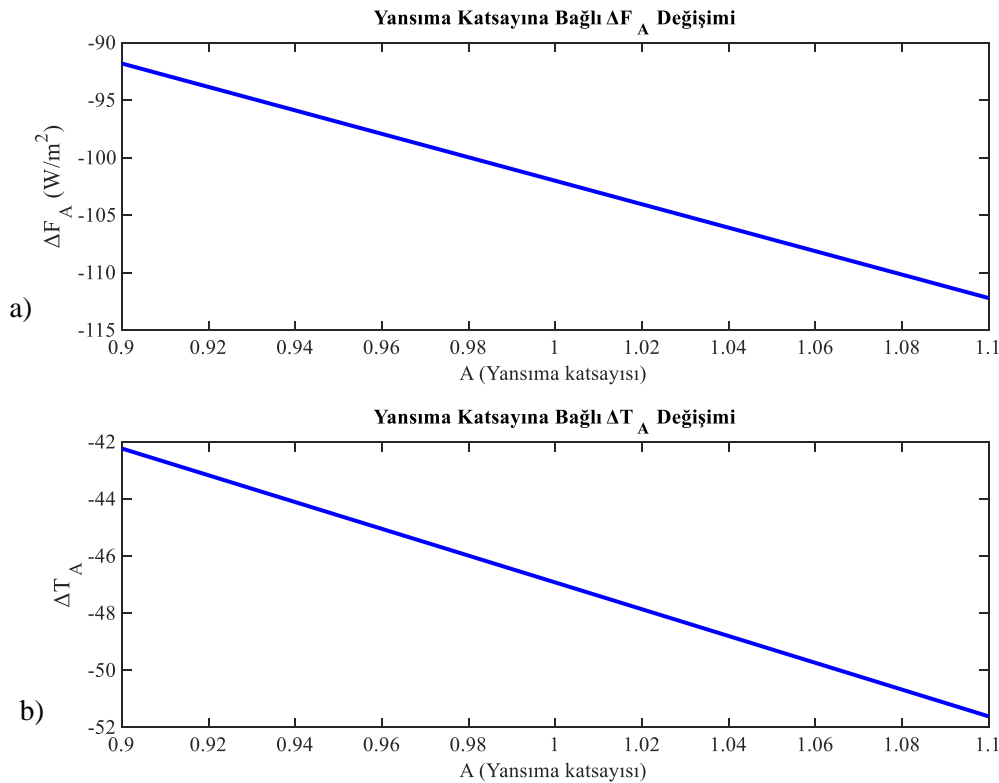
$$\Delta F_A = -A \times 340 \times \Delta \alpha \text{ W/m}^2 \quad (17)$$

ile ifade edilir. Burada  $\Delta \alpha$  bond albedosunda yıllık kesirli değişimini ifade eden çarpandır.  $\Delta \alpha$ 'nın yıllık döngüsünün içinde 10 yıllık gözlemler sonucunda yaklaşık  $\pm 0,07$  aralığında kaldığı görülür (Stephens ve ark., 2015).

Dünyanın bond albedosunun yaklaşık  $A = 0.30$  değeri denklem (17)'de kullanılırsa radyatif zorlama için

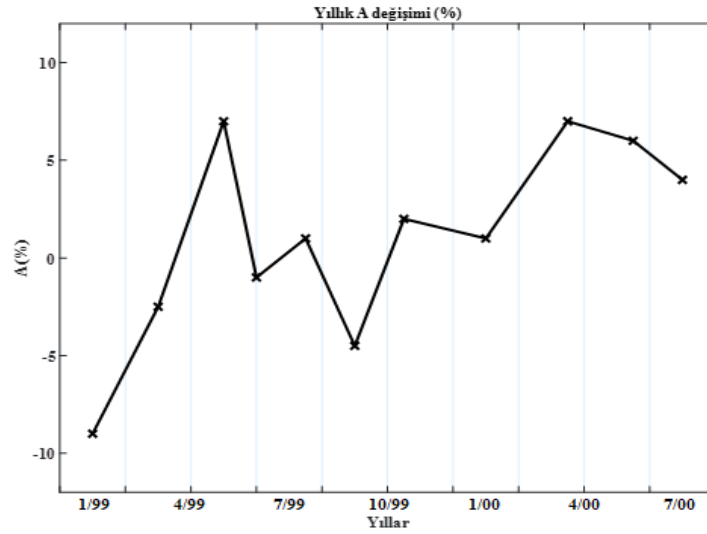
$$\Delta F_A \cong -102 \times \Delta \alpha \text{ W/m}^2 \quad (18)$$

olarak yazılabilir.  $\Delta \alpha$  değerinin 0.9 ile 1.1 aralığındaki değişimi için albedo etkisinin yol açtığı radyatif zorlama değerleri Şekil 8(a)'da görülmektedir. Bu değişim aralığına karşılık global sıcaklık anomalisine etkisi Şekil 8(b)'de denklem (13) yardımı ile tahmin edilmiş ve çizilmiştir. ( $\lambda = 0.46$  alınmıştır.) Bond albedosu soğumaya yol açan bir faktör olduğu için radyatif zorlama negatif değerlidir. Bu grafikler dünya albedosunun ayarlanabilmesi ile negatif zorlama ve soğuma etkisi oluşturulabileceğini gösterir. Bu etkinin iklim kontrolü ve küresel ısınma problemlerinin çözümünde rol oynaması beklenebilir. Bu konuda yapılan araştırma çalışmalarına aşağıda sunulan kısa literatür incelenmesinde değinilmiştir.



Şekil 8. Bond Albedo  $A$  Değerine Bağlı Olarak  $\Delta F_A$  ve  $\Delta T_A$  Değişimi

Şekil 9, 1999 yılı Ocak ayından 2000 yılı Temmuz ayına kadar gerçekleştirilen gözlemlerde dünya bond albedosunun aylık bazda  $\pm 10\%$  aralığında değişebildiğini göstermiştir (Goode ve ark., 2001).



Şekil 9. Bond Albedosu A Değerinin  $\pm 10\%$  Aralığındaki Değişimi (Goode ve ark., 2001)

İklim kontrolü ve küresel ısınma problemlerinin çözümünde albedo etkisine dayalı çözümlerin rol oynaması beklenir. Bu konuda dikkate değer bazı araştırma çalışmaları:

Brown vd. tarafından yapılan çalışmada enerji bütçesi ile küresel ısınmanın büyüklüğü arasındaki ilişkiler gösterilmiştir (Brown ve Caldeira, 2017). Dünya enerji bütçesindeki değişimlere iklim sisteminin hangi bileşenlerinin etki ettiği incelenebilmiş ve bu konuda yapılan gözlemler yorumlanabilmiştir (Loeb ve ark., 2018). Diğer bir çalışmada, yüzey albedosunun iyileştirilmesinin küresel ısınma ile mücadele için uygulanabilirliği, Tunus'ta bulunan bir çimento fabrikasının üzerine yüksek yansıtıcı özelliğe sahip yüzey kaplaması uygulamasının etkilerinin incelenmesi ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda özellikle karbon emisyonuna sebep olan sanayileşmiş ülkelerde tesis çatılarına yüksek yansıtıcı özelliğe sahip yüzey kaplaması uygulamasının önemli derecede fayda sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Cotana ve ark., 2014). Menon vd. yürüttükleri bir çalışmada dünyanın ılıman ve tropik bölgelerinde bulunan kentsel alanlardaki çatıların ve kaldırımların albedosunun 0.1 oranında artırılmasıyla elde edilebilecek radyatif zorlama ve arazi yüzeyi sıcaklığındaki değişimi incelemişlerdir (Menon ve ark., 2010). Jones vd. arazi örtüsü değişikliğinden kaynaklanan (orman ve çalılıklardan mahsul ve otlaklara doğru değişim) radyatif zorlamayı ölçebilmişlerdir (Jones ve ark., 2015).

Hou vd. tarafından yapılan çalışmada hızlı kentleşme sırasında yeşil bitki örtüsü oranı ile albedo arasındaki ilişki ölçülmüştür. Kentsel büyüme ile değişen bitki örtüsünün yüzey yansımaları ve yüzey enerjisini değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Bitki örtüsüne bağlı albedo değişimini belirlemek için kullanılan yeşil bitki örtüsü oranı için 0.21 eşik değeri tahmin edilmiştir (Hou ve ark., 2014).

Yang vd. yaptıkları çalışma ile tek bir binadaki enerji yükünden bölgesel hidroklime kadar çeşitli ölçeklerde yansıtıcı malzemelerin çevresel etkilerini incelemişlerdir. Yansıtıcı malzemelerin kullanım oranının bina özellikleri, kentsel çevre, meteorolojik ve coğrafi koşullar gibi bazı faktörlere göre değiştiği belirtilmiştir. Kentsel ısı adası oluşumunun önüne geçmek için yansıtıcı malzeme kullanımının tek başına bir çözüm olamayacağı sonucuna varılmıştır (Yang ve ark., 2015).

Carrer vd. tarafından yapılan çalışmada nadas dönemindeki boş arazilerde örtü bitkilerinin kullanılmasının Avrupa'daki ekim alanlarının yüzey albedosuna olan etkisi araştırılmıştır. Uydu verileri kullanılarak nadas döneminde örtü bitkilerinin kullanılmasının Avrupa'nın %4.17'sinde albedoyu artıracığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, örtü bitkisinin 3 aydan daha uzun süre muhafaza



edilmesi durumunda albedonun artabileceği, sulama yapılmaması durumunda ise albedonun azalabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Carrer ve ark., 2018).

Zhu vd. tarafından yapılan çalışma ile kurak alanlardaki otlak ekosistemlerin albedoya etkileri incelenmiştir. Sonuçlar için uydu verileri kullanılmıştır. Mevsim boyunca albedoyu etkileyen başlıca faktörlerin bitki örtüsünün yeşilliği ve yüzey toprağının hacimsel su içeriği olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bitki örtüsünün yeşilliği ve hacimsel su içeriğindeki değişikliklerin CO<sub>2</sub> eşdeğerinde 0.004 ila 0.113 kg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> yıl<sup>-1</sup> aralığında olacağı tahmin edilmiştir (Zhu ve ark., 2024).

Weihls vd. tarafından yapılan çalışmada bir dağ bölgesinde kar yapımının albedo ve yerel radyatif zorlama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Avusturya'daki Saalbach-Hinterglemm kayak alanında incelemeler yapılmıştır. 3 boyutlu ışımsal transfer modelini kullanılmıştır. Simülasyonlarda güneş zenit açısı için bulutsuz koşullarda 0.61 ile 0.62, bulutlu koşullarda 0.64 ile 0.65 arasındaki kar albedo değerleri kullanılmıştır. Kayak pistleriyle ilgili olarak -7 ile -35 W/m<sup>2</sup> arasında bir ışımsal zorlama elde edilmiştir. Kar oluşumunun sadece Mart ve Nisan aylarında albedoda değişikliğe neden olduğu sonucuna varılmıştır. Albedodaki artış Nisan ayında 0.10 civarında, Mart ayında ise 0.02'nin altında olmuştur. Bu değerlerin ise sırasıyla -12 W/m<sup>2</sup> ve -1.5 W/m<sup>2</sup> civarında ışımsal zorlamaya sebep olduğu ölçülmüştür (Weihls ve ark., 2021).

## SONUÇ

Küresel ısınmanın negatif etkileri günümüzde görülmeye başlanmış ve iklim kontrolü konusunda araştırma ve geliştirme çalışmalarına olan ihtiyaç artmıştır. Bu çalışma, önemi ve etkileri giderek artan küresel ısınma ve iklim değişimi konusuna yeni başlayan ve bazı temel kavramların farkına varmak isteyen okuyucular için eğitsel bir kaynak (tutorial) ve başlangıç dokümanı olması amacı ile hazırlanmıştır. Bu amaçla hazırlanmış yeterince Türkçe kaynak bulunmadığı fark edilmiştir.

İklim modelleri; iklim değişimi, iklim değişimine etki eden faktörlerin analizi ve iklim değişimi etkilerinin değerlendirilmesi için önemli araçlar sunar. Elde edilen gözlem verilerinin yorumlanması ve trendlerin tahmini için iklim modellerine dayalı analizler yapılması gerekmektedir. Bu inceleme çalışmasında, ortalama global sıcaklığa etki eden global faktörleri basitçe modellemeyen ve verileri değerlendirmeye imkan sağlayan enerji denge modeli incelenmiştir. Bu kapsamda, dünya enerji bütçesi ve enerji dengesi, etki eden faktörlerin radyatif zorlamaları, atmosferik pencere gibi temel kavramlar ilişkili oldukları fiziksel mekanizmaları ile açıklanmaya çalışılmıştır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazar katkılarına uygun olarak yazar sıralaması kapak sayfasında yazılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akpootul, D.O., Nnaemeka, O.C., Fagbemi, S.A., Iliyasu, M.I., Onwubuya, I.O., Salifu S.I. ve Garba, M. (2020). A Comparative Study on Estimation of the Earth's Albedo and Its Variation with other Meteorological Parameters between two Tropical Stations in Nigeria. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 6(2).
- Anonim. (2001). 'Scientists Watch Dark Side of the Moon to Monitor Earth's Climate', *American Geophysical Union*. 17 April.

- Anonim. (2024 a). ACS Climate Science Toolkit - Atmospheric Warming - A Single-Layer Atmosphere Model. American Chemical Society. URL: <https://climatescienceteaching.org/tool/single-layer-atmosphere-model> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 b). Kızılötesi: Isıtma kanunları. URL: <https://www.ceramicx.com/tr/information/support/why-infrared-laws-of-infrared-heating/> (Erişim tarihi: 4 Temmuz, 2024).
- Anonim. (2024 c). Albedo Etkisi Nedir? URL: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/albedo-nedir> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 d). Atmospheric Concentration of Carbondioxide. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5/download.table> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 e). Radiation Laws. URL: <https://mmg.atm.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2014/11/radiation.pdf> (Erişim tarihi: 4 Temmuz, 2024).
- Anonim. (2024 f). Clear-Sky Atmospheric Transmission. URL: <https://twitter.com/RARohde/status/1196762005136392192> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 g). One-Layer Energy Balance Model. PennState College of Earth and Mineral Sciences, Department of Meteorology and Atmospheric Science. URL: <https://www.e-education.psu.edu/meteo469/node/198> (Erişim tarihi: 4 Temmuz, 2024).
- Anonim. (2024 h). Earth's Energy Budget. URL: <https://myasadata.larc.nasa.gov/basic-page/earths-energy-budget> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 i). Earth's Energy Budget. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s\\_energy\\_budget](https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_energy_budget) (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 j). Earth Energy Budget. URL: <https://socratic.org/questions/what-is-described-by-the-earth-s-energy-budget> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 k). Global Mean Estimates based on Land and Ocean Data. URL: [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph\\_data/Global\\_Mean\\_Estimates\\_based\\_on\\_Land\\_and\\_Ocean\\_Data/graph.txt](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph_data/Global_Mean_Estimates_based_on_Land_and_Ocean_Data/graph.txt) (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 l). Planck yasası. URL: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Planck\\_yasas%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Planck_yasas%C4%B1) (Erişim tarihi: 4 Temmuz, 2024).
- Anonim. (2024 m). Planetary Energy Balance. URL: <https://www.ei.lehigh.edu/learners/cc/planetary/planetary1.html> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 n). Radiative Forcing. URL: <https://www.britannica.com/science/radiative-forcing> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 o). Radiative Forcing. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative\\_forcing](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_forcing) (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 p). The Atmospheric Window. URL: <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 r). What is the greenhouse effect?. URL: <https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 s). Yansıtılabilirlik. URL: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Yansıtılabilirlik> (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Anonim. (2024 t). Climate model. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Climate\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_model) (Erişim tarihi: 14 Haziran, 2024).
- Brown, P.T. ve Caldeira, K. (2017). Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget. *Nature*, 552 (7683), 45–50.
- Carrer, D., Pique, G., Ferlicoq, M., Ceamanos, X. ve Ceschia, E. (2018). What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters*, 13(4).

- Cotana, F., Rossi, F., Filipponi, M., Coccia, V., Pisello, A.L., Bonamente, E., Petrozzi, A. ve Cavalaglio G. (2014). Albedo control as an effective strategy to tackle Global Warming: A case study. *Applied Energy*, 130, 641–647.
- Garth W.P. ve C. Martin R.P. (1976). *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*. Elsevier, ISBN 0-444-41444-4.
- Goode, P.R., Qiu, J., Yurchyshyn, V., Hickey, J., Chu, M.C., Kolbe, E., Brown, C.T. ve Koonin S.E. (2001). Earthshine observations of the earth's reflectance. *Geophysical Research Letters*, 28(9), 1671–1674.
- Güler, A.G., Şakirali, E. ve Alakour, A. (2020). Fotovoltaik Panellerde Isı Transfer Analizi. Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi.
- Hori, M., Aoki, T., Tanikawa, T., Hachikubo, A., Sugiura, K., Kuchiki, K. ve Niwano, M. (2013). Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window. *Applied Optics*, 52(30), 7243.
- Hou, M., Hu, Y. ve He, Y. (2014). Modifications in vegetation cover and surface albedo during rapid urbanization: a case study from South China. *Environmental Earth Sciences*, 72(5), 1659–1666.
- Jian, B., Li, J., Wang, G., He, Y., Han, Y., Zhang, M. ve Huang, J. (2018). The Impacts of Atmospheric and Surface Parameters on Long-Term Variations in the Planetary Albedo. *Journal of Climate*, 8705–8718.
- Jones, A.D., Calvin, K.V., Collins, W.D. ve Edmonds, J. (2015). Accounting for radiative forcing from albedo change in future global land-use scenarios', *Climatic Change*, 131(4), 691–703.
- Kopp, G. ve Lean, J.L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1). 1–7.
- Kraus, S.F. (2024). *Astronomical Methods and the Terrestrial Climate: An Estimation of the Earth's Albedo Based on Self-Obtained Data*. *Physics Education Today. Challenges in Physics Education*. Springer, p.149-159.
- Loeb, N.G., Thorsen T.J., Norris, J.R., Wang, H. ve Su, W. (2018). Changes in Earth's energy budget during and after the "Pause" in global warming: An observational perspective. *Climate*, 6(3).
- Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I. ve Levinson, R. (2010). Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO2 offsets', *Environmental Research Letters*, 5(1), 1–11.
- Myhre, G., Highwood, E.J., Shine, K.P. ve Stordal, F. (1998). New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 25(14), 2715–2718.
- Öztürk, D. (2020) *Uzaktan Algılamanın Temel Esasları, Uzaktan Algılama İle Veri Elde Edilmesi Ders Notları, Spektral Etkileşim. Samsun. URL: https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/dozturk/71478/dozturk\_ua\_ders2.pptx* (Erişim tarihi: 21 Nisan, 2024).
- Shine, K.P., Cook, J., Highwood, E.J. ve Joshi, M.M. (2003). An alternative to radiative forcing for estimating the relative importance of climate change mechanisms, *Geophysical Research Letters*, 30(20), 1–4.
- Spångmyr, M. (2010). Global effects of albedo change due to urbanization. Department of Earth and Ecosystem Sciences. Division of Physical Geography and Ecosystems Analysis, Lund University, Lund, Sweden.
- Stephens, G.L., O'Brien, D., Webster, P.J., Pilewski, P., Kato, S. ve Li, J.L. (2015). The albedo of earth. *Reviews of Geophysics*, 53(1), 141–163.
- Weih, P., Laimighofer, J., Formayer, H. ve Olf, M. (2021). Influence of snowmaking on albedo and local radiative forcing in an alpine area. *Atmospheric Research*, 255(January), 105448.
- Yang, J., Wang, Z.-H. ve Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a "silver bullet" for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843.
- Zhu, Q., Chen, J., Wu, L., Huang, Y., Shao, C., Dong, G., Xu, Z. ve Li, X. (2024). Changes in albedo and its radiative forcing of grasslands in East Asia drylands. *Ecological Processes* 13(17), 1–15.